



Développement d'un essai Arcan dynamique

Benjamin Valès

► To cite this version:

Benjamin Valès. Développement d'un essai Arcan dynamique. Matériaux. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2017. Français. NNT : 2017TOU30315 . tel-01945229

HAL Id: tel-01945229

<https://theses.hal.science/tel-01945229>

Submitted on 5 Dec 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Fédérale



Toulouse Midi-Pyrénées

THÈSE

En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par:

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Discipline ou spécialité:

Génie Mécanique, Mécanique des Matériaux

Présentée par

Benjamin VALÈS

Sujet de la thèse:

Développement d'un essai Arcan dynamique

Soutenue le Vendredi 15 Décembre 2017

Jury:

Stéphane PAGANO
Lucas F. M. da SILVA
Daniel COUTELLIER
Jean-Claude GRANDIDIER
Hélène WELEMANE
Romain CRÉAC'HCADEC
Jean-François FERRERO
Steven MARGUET

Professeur des Universités à UM2
Professeur associé à Universidade do Porto
Professeur des Universités à ENSIAME-UVHC
Professeur des Universités à ISAE-ENSMA
Maître de conférences à ENI de Tarbes
Maître de conférences HDR à ENSTA Bretagne
Professeur des Universités à UT3 Paul Sabatier
Maître de conférences à UT3 Paul Sabatier

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examinatrice
Examineur
Directeur
Co-directeur

École doctorale:

Mécanique, Energétique, Génie civil et Procédés (MEGEP)

Unité de recherche:

Institut Clément Ader - UMR CNRS 5312

*À ma famille,
À Cédrine & Walker.*

Remerciements

Il est souvent dit qu'une thèse peut être comparée à un sprint de la durée d'un marathon ; je souhaite remercier ici les personnes qui ont participé à cette course et qui m'ont aidé à la terminer.

Je souhaite tout d'abord remercier chaleureusement mes encadrants. Jean-François Ferrero, mon directeur de thèse, pour sa disponibilité, ses idées et conseils. Plus personnellement, je te suis reconnaissant pour l'accueil que tu m'as réservé « chez toi », les nombreux moments de partage et je n'oublierai jamais le « coup de pouce » que tu as apporté à ma carrière professionnelle. Steven Marguet, mon co-encadrant, pour son investissement dans mes travaux, sa présence spontanée à n'importe quelle heure ou jour de la semaine et son immense savoir qu'il transmet volontiers. J'ai énormément appris à tes côtés et je suis heureux d'avoir fait ta connaissance ; tu es une très belle personne. Pablo Navarro, qui fut sur le papier mon encadrant à 5% durant quelques mois, mais qui dans les faits, a toujours été présent pour donner un coup de main ou tout simplement discuter autour d'un café.

Les travaux présentés dans ce manuscrit sont le fruit d'une étroite collaboration entre l'Institut Clément Ader, l'Institut de Recherche Dupuy de Lôme et ArcelorMittal R&D Montataire. Je souhaite particulièrement remercier Denis Jacquet, Frida Gilbert et Jean Legendre, pour la confiance qu'ils m'ont accordé, leur accueil sur le site de Montataire et les discussions constructives que l'on a pu avoir lors des différentes rencontres. Je n'oublie pas Romain Créac'hcadec, mon co-encadrant Brestois, pour ses conseils, son accompagnement et son savoir faire qu'il a bien voulu partager avec moi.

Je remercie Monsieur Stéphane Pagano, professeur des universités, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Je souhaite également exprimer toute ma reconnaissance à Messieurs Lucas F. M. da Silva, professeur associé, et Daniel Coutellier, professeur des universités, qui ont accepté de rapporter ce mémoire. La présence d'Hélène Weleman, maître de conférences, dans mon jury de thèse fut pour moi l'occasion de lui exprimer toute ma gratitude à son égard : j'ai effectué mon stage de M2R sous sa direction et celle de Marie-Laetitia Pastor, je leur dois mon goût pour la recherche et ma poursuite d'étude... Merci !

Tout ce travail n'aurait pas été possible sans l'appui, très souvent volontaire, de nombreux collègues et amis. Je tiens tout d'abord à remercier la « team copeaux » : Guillaume Cohen, Patrick Gilles, Pierre Rey, Yann Landon et Laurent Crouzeix pour leur aide précieuse concernant la fabrication et l'usinage. Je pense également à la « team tout est possible » : Olivier Cherrier, Alexandre Chardonneau, Ludovic Barrière et Marc Chartrou qui, se sont toujours rendu disponible pour coller des jauges dans la bonne humeur ou encore négocier des échanges de caméra. Je n'oublie pas de remercier la « team CRITT » Xavier Sicart et Didier Falandry pour les dépannages, les coups de main et les nombreuses discussions à côté

de la machine de traction.

Ces trois années de thèse furent pour moi une formidable aventure humaine faites de nombreuses rencontres et d'échanges, avec les permanents et les doctorants, au laboratoire et en dehors. Un énorme merci à Guillaume Androuin, Nicolas Dubary, Florian Bugarin, Jean-Emmanuel Chambe, Fadhel Chatti, Abdallah Bouzid, Pierre-Louis Chiambareto, Ankit Chiplunkar, Olivier Dorival, Floran Tostain, Kamgaing Souop Landry Arnaud, Arnaud Wilhelm, Jean-Charles Passieux, Mathilde Vellas, Dorothy Hannah Loïs, Léonard Serrano, Loïc Bernard, ... Je terminerai par remercier mes collègues, amis et confidents du 2020 le meilleur des bureaux : Florian Pascal, Sylvain Arki, Ange Rogani, Bassam Mahmoud, Marcos Colungo et les stagiaires de passage avec qui j'ai eu l'occasion de refaire le monde à mainte reprise et partagé tellement de bons moments. Je vous souhaite le meilleur pour la suite et je sais pertinemment que l'on se reverra.

Ces remerciements ne peuvent s'achever sans une pensée pour mes parents qui ont été d'un soutien indéfectible, et Cédrine, pour la patience dont elle a fait preuve lors des soirées et week-ends manqués, sa joie de vivre, son aide, ...

Résumé

Afin de limiter les impacts environnementaux, les industries du transport (automobile, aéronautique, etc.) cherchent à alléger leurs produits. Cette recherche de gain de masse peut conduire à l'utilisation des adhésifs dans la réalisation des structures assemblées. Dans les situations de crash, les joints de colle introduits peuvent jouer un rôle critique sur la tenue globale de l'assemblage. Par conséquent, la maîtrise de leur comportement mécanique devient un point clef de développement. Notamment en vue du « virtual testing », il est essentiel de disposer de lois de comportement fiables dans le but de fournir des outils de calcul prédictifs à l'ingénieur. Les travaux de thèse portent sur le développement d'une démarche expérimentale permettant de caractériser le comportement mécanique d'adhésifs sous sollicitations dynamiques combinées.

Le développement d'une éprouvette Arcan et d'un dispositif de sollicitation dédiés à la caractérisation des adhésifs en dynamique constituent le cœur du travail de thèse. Après une phase de validation, le moyen d'essais développé a été utilisé afin de caractériser le comportement dynamique de trois adhésifs structuraux. Les résultats obtenus ont été comparés à des essais « structures » de type TAST.

En parallèle de ces travaux expérimentaux, une ouverture sur la modélisation numérique des adhésifs est proposée. La stratégie de modélisation se base sur l'utilisation d'éléments cohésifs et d'une loi de comportement développée suivant la méthode de l'état local. L'identification des paramètres matériaux est réalisée par méthode directe et inverse à partir des résultats issus d'essais Arcan. La stratégie de modélisation développée a été transposée à des essais TAST et simple recouvrement. Les prédictions faites par les modèles sont proches des résultats expérimentaux validant ainsi l'approche numérique mise en œuvre.

†

Mots clés

Collage structural - Caractérisation dynamique - Essai Arcan
Développement expérimental - Analyse MEF

Abstract

In order to limit environmental impacts, the transport industries (automotive, aeronautics, etc.) are seeking to reduce the weight of their products. This search for mass gain can lead to the use of adhesives in the manufacturing of assembled structures. In crash situations, introduced bonded joints can play a critical role in the overall strength of the assembly. Consequently, their mechanical behaviour becomes a key development point. Especially for virtual testing, it is essential to have reliable behaviour laws in order to provide predictive computing tools to the engineer. The thesis work focuses on the development of an experimental approach to characterize the mechanical behaviour of adhesives under combined dynamic loadings.

The development of an Arcan specimen and a test rig dedicated to the dynamic characterization of adhesives is the core of the thesis work. After a validation step, the developed test mean was used to characterize the dynamic behaviour of three structural adhesives. The results obtained were compared with "structural" TAST tests.

In parallel of this experimental work, a first study on the numerical modelling of adhesives is proposed. The modelling strategy relies on the use of cohesive elements and a behaviour law developed according to the local state method. The identification of material parameters is carried out by direct and inverse methods from the results of Arcan tests. The modelling strategy developed has been transposed to TAST and single lap joint tests. The predictions made by the models are close to the experimental results and therefore validate the implemented numerical approach.

†

Keywords

Structural adhesive bonding – Dynamic characterization - Arcan test
Experimental development – FEM analysis

Table des matières

Remerciements	v
Résumé	vii
Abstract	ix
Table des matières	x
Figures	xiii
Tableaux	xix
Introduction générale	1
1 État de l'art	5
1.1 Introduction, généralités	6
1.2 Caractérisation mécanique des assemblages collés	13
1.2.1 Les essais quasi-statiques	14
1.2.2 Les essais dynamiques	27
1.3 Conclusions	40
2 Étude prospective	43
2.1 Présentation & objectifs de l'étude	44
2.2 Étude expérimentale	44
2.2.1 Présentation du dispositif expérimental	44
2.2.2 Résultats	52
2.3 Étude éléments finis	58
2.3.1 Présentation du modèle éléments finis	58
2.3.2 Résultats	59
2.4 Conclusions	66
3 Développement d'un moyen d'essais	67
3.1 Extension de l'éprouvette Arcan TCS à la sollicitation dynamique	68
3.1.1 Éprouvette modifiée pour la dynamique	68
3.1.2 Dimensionnement	68
3.2 Développement d'un dispositif de sollicitation dynamique	71
3.2.1 Moyen d'essais développé	71
3.2.2 Dimensionnement	74
3.3 Validation expérimentale du moyen d'essais	81
3.3.1 Analyse du chargement de l'éprouvette	81

3.3.2	Comparaison des éprouvettes Arcan TCS et Arcan optimisée pour la dynamique	82
3.3.3	Influence des conditions d'essais	90
3.4	Conclusions	94
4	Caractérisation d'adhésifs structuraux	97
4.1	Caractérisation d'adhésifs structuraux	98
4.1.1	Adhésifs étudiés et essais réalisés	98
4.1.2	Résultats et analyses	99
4.1.3	Bilan	112
4.2	Comparaison avec des essais standards	114
4.2.1	Présentation des éprouvettes TAST modifiées	114
4.2.2	Essais réalisés	115
4.2.3	Résultats et analyses	116
4.2.4	Bilan	118
4.3	Conclusions	119
5	Ouverture sur la modélisation numérique des adhésifs	121
5.1	Contexte de développement du modèle et hypothèses	122
5.2	Modèle de comportement et implémentation	123
5.3	Identification du modèle de comportement sur essais Arcan	130
5.3.1	Présentation du modèle éléments finis	130
5.3.2	Identification	132
5.3.3	Validation sur l'essai de traction-cisaillement	136
5.4	Validation du modèle développé sur essais structures	137
5.4.1	Validation sur essai TAST	137
5.4.2	Validation sur essai simple recouvrement	140
5.5	Conclusions	143
	Conclusions générales & perspectives	145
	Bibliographie	149
	Annexes	159
A	Plans des éprouvettes	161
B	Éprouvette Arcan modifiée	171
C	Plans du montage dynamique	175
D	Comparaison des adhésifs caractérisés	181

Table des figures

1	Section courante d'une pale d'hélicoptère, d'après [Aubry, 2013].	1
2	Structure du mémoire.	4
1.1	Répartition des contraintes dans différents types d'assemblages. (a) Assemblage par soudage. (b) Assemblage par rivetage. (c) Assemblage par collage. Adapté de [Loctite, 1995 ; da Silva <i>et al.</i> , 2011].	7
1.2	Exemples de structures obtenues par collage. (a) Panneau sandwich en nid d'abeilles. (b) Structure collée pour voilure d'avion. Adapté de [Kinloch, 1997].	7
1.3	Structure d'un joint de colle.	8
1.4	Illustration des différents comportements mécaniques des adhésifs, à partir de [Kinloch, 1987 ; van Straalen <i>et al.</i> , 1998 ; Cognard, 2005].	9
1.5	Influence de certains paramètres sur le comportement mécanique des adhésifs. (a) Influence de la température - Essais Arcan en cisaillement, adapté de [Badulescu <i>et al.</i> , 2012]. (b) Influence du vieillissement en milieu humide - Essais Arcan en cisaillement, adapté de [Arnaud <i>et al.</i> , 2013]. (c) Influence de la pression hydrostatique - Essais TAST modifié (cisaillement), adapté de [Cognard <i>et al.</i> , 2010a]. (d) Influence de la vitesse de sollicitation - Essais Arcan en cisaillement, adapté de [Créac'hcadec, 2008].	10
1.6	Modes de rupture des assemblages collés.	12
1.7	Modes de chargement des assemblages collés, d'après [Kinloch, 1987 ; Loctite, 1995]. (a) Sollicitation normale (traction ou compression). (b) Sollicitation de cisaillement. (c) Sollicitation de clivage. (d) Sollicitation de pelage.	13
1.8	Exemples d'essais sur éprouvettes massiques. (a) Essai de traction sur éprouvette altère, d'après [ISO 527-2, 2012 ; Créac'hcadec, 2008]. (b) Essai de compression uniaxiale sur éprouvette plaque, d'après [ASTM D695, 2015 ; da Silva <i>et al.</i> , 2012b]. (c) Essai de cisaillement de type Iosipescu, d'après [ASTM D5379, 2012 ; Dean et Duncan, 1998]. (d) Essai Arcan sur éprouvette papillon, d'après [da Silva <i>et al.</i> , 2011 ; El-Hajjar et Haj-Ali, 2004].	15
1.9	Essai simple recouvrement. (a) Géométrie de l'essai, d'après [ASTM D1002, 2010]. (b) Déformée de l'éprouvette. Distribution des contraintes (c) tangentielle et (d) normale normalisées sur la moitié de la longueur de recouvrement pour un chargement de 15 kN [Harris et Adams, 1984].	17
1.10	Autres types d'essais sur substrats minces et déformées associées. (a) Éprouvette « stratifiée » d'après [ASTM D3165, 2014]. (b) & (c) Éprouvettes à double recouvrement de type A (b) et B (c), d'après [ASTM D3528, 2016]. .	19
1.11	(a) Géométrie de l'éprouvette TAST, d'après [ISO 11003-2, 2001]. (b) Essai TAST modifié, adapté de [Cognard <i>et al.</i> , 2010b ; Cognard <i>et al.</i> , 2008]. . .	20

1.12 (a) Géométrie de l'éprouvette TAST modifiée, d'après [Cognard <i>et al.</i> , 2008]. Influence de la géométrie locale de l'éprouvette sur les distributions calculées des contraintes de cisaillement (b) et normale (c) dans l'adhésif, le long de la surface de recouvrement, adapté de [da Silva <i>et al.</i> , 2012b]. Influence de la géométrie locale (d) et de l'épaisseur du joint de colle (e) sur le comportement mécanique de l'éprouvette TAST modifiée, adapté de [da Silva <i>et al.</i> , 2012b ; Cognard <i>et al.</i> , 2010b].	21
1.13 (a) Géométrie de l'éprouvette <i>napkin ring</i> , d'après [ASTM E229, 1997]. (b) Géométrie de l'éprouvette bout-à-bout solide, d'après [Adams et Coppedale, 1977].	23
1.14 Essais de type « <i>poker chip</i> » (a) Essai bout-à-bout classique, d'après [ASTM D2095, 2015]. (b) Essai bout-à-bout amélioré, adapté de [da Silva <i>et al.</i> , 2011].	23
1.15 (a) Essais de traction-torsion, d'après [Mahnken, 2005]. (b) Essai Arcan modifié par Gineste [Gineste, 1993].	24
1.16 (a) Essai Arcan modifié par J.-Y. Cognard <i>et al.</i> , d'après [Cognard <i>et al.</i> , 2005]. (b) Essai Arcan TCS, d'après [Créac'hcadec <i>et al.</i> , 2015].	25
1.17 Dispositif et éprouvette associés à l'essai de (a) Charpy et d'(b) Izod, d'après [ASTM E23, 2016 ; Sierakowski et Chaturvedi, 1997].	28
1.18 ASTM <i>Block Impact Test</i> D950, (a) Montage et géométrie de l'éprouvette, d'après [ASTM D950, 2011]. (b) Influence des conditions de chargement sur la répartition des contraintes dans le plan moyen de l'adhésif, adapté de [Adams et Harris, 1996].	29
1.19 Autres essais utilisant des pendules instrumentés. (a) Essai sur éprouvette simple recouvrement développé par Harris et Adams, adapté de [Harris et Adams, 1985]. (b) Résultats associés à l'essai (a), adapté de [Harris et Adams, 1985]. (c) Autre configuration pour tester des éprouvettes à recouvrement simple sous mouton pendule, adapté de [Satoh <i>et al.</i> , 1996].	30
1.20 Dispositif de sollicitation utilisé par Xiao, adapté de [Xiao, 2008]. (a) Photo du dispositif. (b) Principe de fonctionnement du montage de traction à vitesse stabilisée.	31
1.21 Essai Arcan modifié par Dufour <i>et al.</i> [Dufour <i>et al.</i> , 2016]. (a) Configurations de chargement. (b) Géométrie de l'éprouvette.	32
1.22 Essai <i>quick crusher</i> , adapté de [Schiel <i>et al.</i> , 2015]. (a) Principe de fonctionnement. (b) Photo du dispositif. (c) Exemple de signal extrait.	33
1.23 Barres d'Hopkinson en compression. (a) Principe et diagramme Lagrangien associé. (b) Exemples de signaux acquis par les jauges, d'après [da Silva <i>et al.</i> , 2011].	34
1.24 Barres d'Hopkinson en traction (a) directe et (b) indirecte ; principes et diagrammes Lagrangien associés.	35
1.25 Résultats en contrainte-déformation associés à la caractérisation dynamique d'un adhésif époxy sur des systèmes à collision en (a) compression et (b) traction, adapté de [Goglio <i>et al.</i> , 2008].	36
1.26 Exemple de dispositif à stockage d'énergie, adapté de [Sato et Ikegami, 1999]. (a) Principe. (b) Éprouvette en bout-à-bout utilisée. (c) Enveloppe de réponse de l'éprouvette dans le plan de Mohr.	37
1.27 Exemples de dispositifs à masse tombante. (a) Essai de flexion trois points, adapté de [Pang <i>et al.</i> , 1995]. Essais de traction, (b) adapté de [Galliot <i>et al.</i> , 2012], (c) adapté de [Beevers et Ellis, 1984].	38

2.1	(a) Éprouvette Arcan TCS. (b) Zoom sur les becs. (c) Géométrie locale permettant d'atténuer les « effets de bords »	44
2.2	(a) Schéma et (b) photo du « double cadre »	45
2.3	Dispositifs d'essais expérimentaux. (a) Machine de traction. (b) Tour de chute « basse énergie ». (c) Tour de chute « haute énergie »	46
2.4	(a) Extraction des déplacements des substrats par corrélation d'images numériques. (b) Décomposition du mouvement d'un point.	47
2.5	Influence numérique de la position de la mesure de l'effort. (a) Position des mesures. (b) Résultats obtenus pour les quatre cas de chargement.	50
2.6	(a) Éprouvettes instrumentées de jauges de déformation. (b) Comparaison des signaux des jauges et de la cellule d'effort obtenus pour les quatre cas de chargement.	51
2.7	Comparaison des courbes force-déplacement issues des essais quasi-statiques. (a) Suivant la direction normale. (b) Suivant la direction tangentielle.	52
2.8	Comparaison des courbes force-déplacement issues des essais quasi-statique et dynamique. (a) Suivant la direction normale. (b) Suivant la direction tangentielle.	53
2.9	Influence des conditions initiales d'essai sur le comportement en cisaillement. (a) Évolutions de DT en fonction du temps. (b) Comparaison des courbes FT(DT).	54
2.10	Évolutions de (a) DN(t) et (b) FN(t) pour chaque série étudiée en traction.	55
2.11	Influence des conditions initiales d'essai sur le comportement en traction-cisaillement. (a) Comparaison des courbes FN(DN). (b) Évaluation de la répétabilité sur les résultats FN(DN) issus de la série « DYNh0,85m8 ».	56
2.12	Origine des variations en « S » obtenues en traction-cisaillement sur les exemples DN(t) et $\Delta\Theta_z(t)$. (a) Résultats pour $h = 0,85$ m. (b) Résultats pour $h = 3$ m.	57
2.13	Description du modèle éléments finis. (a) Conditions aux limites. (b) Maillage. (c) Zoom sur le maillage près du bord droit de l'assemblage.	58
2.14	Distributions spatiales et temporelles des contraintes normalisées obtenues en traction.	60
2.15	Distributions spatiales et temporelles des contraintes normalisées obtenues en compression-cisaillement.	61
2.16	Influence des conditions initiales d'essai sur le comportement vibratoire de l'éprouvette Arcan TCS utilisée en traction et compression-cisaillement.	62
2.17	Distributions de la déformation plastique équivalente ε_{eq}^{pl} dans l'éprouvette Arcan TCS (obtenues pour un chargement de 30 kN).	64
2.18	Localisation des zones plastifiées.	65
3.1	Éprouvette modifiée pour la dynamique. (a) Vue générale. (b) Vue d'un substrat. (c) Zoom sur les becs.	68
3.2	Distribution de ε_{eq}^{pl} dans l'éprouvette Arcan TCS et Arcan modifiée pour la dynamique.	69
3.3	Paramétrage d'un dispositif de sollicitation par poids tombant.	71
3.4	Montage de Traction Dynamique. (a) Intégration du montage sous la tour de chute. (b) Schéma et (c) photographie du montage. (d) Schéma et (e) photographie de la chaîne d'acquisition.	72
3.5	Déroulement d'un essai sur le montage de traction dynamique.	73

3.6	Influence des différents paramètres mis en jeu sur l'amplitude et le temps de propagation de l'onde de choc dans un ressort sollicité en dynamique. (a) En effort. (b) En vitesse de sollicitation.	74
3.7	Comportement dynamique, (a) en effort et (b) en vitesse de sollicitation, d'un ressort dont une extrémité est libre. Comportement dynamique, (c) en effort et (d) en vitesse de sollicitation, d'un ressort dont une extrémité est encastree.	76
3.8	Comportement dynamique, (a) en effort et (b) en vitesse de sollicitation, de deux ressorts en série.	77
3.9	Représentation schématique du problème de dimensionnement associé au montage de sollicitation.	77
3.10	(a) Détermination de la raideur de l'éprouvette Arcan optimisée pour les quatre configurations de chargement ($F_{imposé} = 9 \text{ kN}$). (b) Comparaison des réponses mécaniques en dynamique de l'éprouvette Arcan modifiée et des ressorts équivalents associés, pour les quatre configurations de chargement ($m = 200 \text{ kg}$ et $v_0 = 2 \text{ m.s}^{-1}$).	78
3.11	Détermination de la section critique de la barre de traction pour un essai en compression-cisaillement avec $m = 100 \text{ kg}$ et $v_0 = 1,5 \text{ m.s}^{-1}$	79
3.12	Comportement dynamique, (a) en effort et (b) en vitesse de sollicitation, du montage dimensionné (essai en compression-cisaillement, $m = 100 \text{ kg}$ et $v_0 = 1,5 \text{ m.s}^{-1}$).	80
3.13	Chargements obtenus avec le dispositif développé sur la caractérisation d'un adhésif Araldite® 420 A/B avec $m = 100 \text{ kg}$ et $h = 0,5 \text{ m}$. Comparaison des signaux des jauges en (a) traction et (b) cisaillement. Évolutions dans le temps des signaux moyens des jauges et de la cellule d'effort en (c) traction et (d) cisaillement.	81
3.14	Comparaison des résultats en effort-déplacement obtenus en quasi-statique ($v = 0,5 \text{ mm.min}^{-1}$) avec les éprouvettes Arcan TCS et Arcan optimisée pour la dynamique.	84
3.15	Comparaison des résultats en effort-déplacement obtenus en dynamique ($h = 50 \text{ cm} - m = 300 \text{ kg}$) avec les éprouvettes Arcan TCS et Arcan optimisée pour la dynamique.	85
3.16	Introduction d'un élément fini Q4 (P_0, P_1, P_2, P_3) pour l'extraction des déformations dans l'adhésif.	86
3.17	Comparaison des résultats en contrainte moyenne équivalente-déformation moyenne obtenus en quasi-statique ($v = 0,5 \text{ mm.min}^{-1}$) avec les éprouvettes Arcan TCS et Arcan optimisée pour la dynamique.	88
3.18	Comparaison des résultats en contrainte moyenne équivalente-déformation moyenne obtenus en dynamique ($h = 50 \text{ cm} - m = 300 \text{ kg}$) avec les éprouvettes Arcan TCS et Arcan optimisée pour la dynamique.	89
3.19	Influence de la masse de l'impacteur sur (a & b) le chargement de l'éprouvette et (c-f) le comportement mécanique de l'adhésif étudié en traction et cisaillement pour une hauteur de chute $h = 30 \text{ cm}$	90
3.20	Influence de la hauteur de chute sur l'évolution de (a) la déformation tangentielle $\varepsilon_{xy}(t)$ et (b) la contrainte tangentielle $\sigma_{xy}(t)$. Essais de cisaillement réalisés de $h = 20 \text{ cm}$ à $h = 60 \text{ cm}$	91
3.21	Évolutions de (a) $\sigma_{xy}(\varepsilon_{xy})$ et de (b) $\sigma_{xy}(t)$ obtenues pour des essais de cisaillement réalisés avec $h = 5 \text{ cm}$ et $m = 300 \text{ kg}$	92
3.22	Cinématique d'impact de l'essai « 3 » ($h = 5 \text{ cm}$ et $m = 300 \text{ kg}$).	93

4.1	(a) Éprouvettes usinées pour les différentes campagnes d'essais. Zones utilisées pour l'extraction des déplacements en (b) quasi-statique et (c) dynamique.	98
4.2	Comportement mécanique de l'Huntsman TM Araldite [®] 420 A/B en (a) traction et (b) cisaillement.	100
4.3	Comportement mécanique de l'Huntsman TM Araldite [®] 420 A/B en traction-cisaillement.	101
4.4	Comportement mécanique de l'Huntsman TM Araldite [®] 420 A/B en compression-cisaillement.	101
4.5	Énergies de déformation calculées de l'état initial à $\sigma = \sigma_{max}$ pour l'Huntsman TM Araldite [®] 420 A/B.	102
4.6	Faciès de rupture obtenus avec l'Huntsman TM Araldite [®] 420 A/B.	103
4.7	Comportement dynamique de l'Huntsman TM Araldite [®] 420 A/B en traction identifié par Al-Zubaidy <i>et al.</i> (a) Courbes en contrainte-déformation. (b) Variation des propriétés mécanique de l'adhésif. Adapté de [Al-Zubaidy <i>et al.</i> , 2013].	104
4.8	Comportement mécanique de la Dow [®] Betamate TM 1496 V en (a) traction et (b) cisaillement.	105
4.9	Comportement mécanique de la Dow [®] Betamate TM 1496 V en traction-cisaillement.	105
4.10	Comportement mécanique de la Dow [®] Betamate TM 1496 V en compression-cisaillement.	106
4.11	Énergies de déformation calculées de l'état initial à $\sigma = \sigma_{max}$ pour la Dow [®] Betamate TM 1496 V.	106
4.12	Faciès de rupture obtenus avec la Dow [®] Betamate TM 1496 V.	107
4.13	Comportement dynamique de la Dow [®] Betamate TM 1496 V en traction identifié par May <i>et al.</i> (a) Courbes en contrainte-déformation. (b) Évolution des contraintes maximales et des déformations à rupture. Adapté de [May <i>et al.</i> , 2015].	108
4.14	Comportement mécanique de la 3M [®] AF 191 en (a) traction et (b) cisaillement.	109
4.15	Comportement mécanique de la 3M [®] AF 191 en traction-cisaillement.	109
4.16	Comportement mécanique de la 3M [®] AF 191 en compression-cisaillement.	110
4.17	Énergies de déformation calculées de l'état initial à $\sigma = \sigma_{max}$ pour la 3M [®] AF 191.	110
4.18	Faciès de rupture obtenus avec la 3M [®] AF 191.	111
4.19	(a) Éprouvettes TAST modifiées. (b) Configurations disponibles.	114
4.20	(a) Éprouvettes TAST usinées. (b) Dispositif d'essais utilisé en quasi-statique. (c) Dispositif d'essais utilisé en dynamique.	115
4.21	Comparaison des résultats quasi-statiques obtenus pour les trois géométries testées. (a) Courbes en contrainte-déformation. (b) Courbes en déformation-temps.	116
4.22	Comparaison des résultats quasi-statiques obtenus avec les géométries Arcan et TAST. (a) Courbes en contrainte-déformation. (b) Courbes en déformation-temps.	117
4.23	Comparaison des résultats dynamiques obtenus pour les trois géométries testées. (a) Courbes en contrainte-déformation. (b) Courbes en déformation-temps.	117

4.24	Comparaison des résultats dynamiques obtenus avec les géométries Arcan et TAST. (a) Courbes en contrainte-déformation. (b) Courbes en déformation-temps.	118
5.1	Utilisation d'un élément cohésif dans un maillage solide 2D.	122
5.2	Comportement mécanique de la Dow® Betamate™1496 V sous chargement quasi-statique monotone et cyclique. (a) En traction. (b) En cisaillement. . .	123
5.3	Description du modèle éléments finis associé à l'éprouvette Arcan. (a) Maillage. (b) Conditions aux limites.	130
5.4	Influence de la vitesse de sollicitation imposée sur la réponse mécanique du modèle.	131
5.5	Comparaison des réponses mécaniques expérimentales et numérique obtenues sur un essai Arcan en configuration de cisaillement.	133
5.6	Comparaison des réponses mécaniques expérimentales et numérique obtenues sur un essai Arcan en configuration de traction.	134
5.7	Comparaison des réponses mécaniques expérimentales et numérique obtenues sur un essai Arcan en configuration de compression-cisaillement.	135
5.8	Comparaison des réponses mécaniques expérimentales et numérique obtenues sur un essai Arcan en configuration de traction-cisaillement.	136
5.9	Description du modèle éléments finis associé à l'éprouvette TAST. (a) Conditions aux limites. (b) Maillage. (c-d) Zoom sur la zone de recouvrement. . .	137
5.10	(a) Distribution de la contrainte équivalente de von Mises σ_{eq}^{vM} dans l'éprouvette TAST obtenue pour un effort imposé de 8 kN. (b) Zoom sur les becs.	138
5.11	Comparaison des réponses mécaniques expérimentales et numériques obtenues sur un essai TAST.	139
5.12	Évolution de la déformation ε_{xy} en fonction du temps obtenu à partir de l'éprouvette TAST avec becs. (a) Résultats expérimentaux. (b) Résultat numérique.	139
5.13	Description du modèle éléments finis associé à l'éprouvette simple recouvrement. (a) Conditions aux limites. (b) Maillage.	140
5.14	Comportement mécanique de l'acier DX54 composant les substrats.	141
5.15	Comparaison des réponses mécaniques expérimentales et numériques obtenues sur un essai simple recouvrement.	141
5.16	Comparaison essai/calcul du déroulement d'un essai simple recouvrement. .	142

Liste des tableaux

1.1	Influence de la géométrie locale des éprouvettes à simple recouvrement sur l'effort à rupture normalisé, adapté de [Adams, 2005] sur la base des travaux de [Hildebrand, 1994].	18
1.2	Relation entre les phénomènes étudiés, les vitesses de déformation associées et les moyens expérimentaux générant ces vitesses, d'après [Hamouda et Hashmi, 1998 ; Field <i>et al.</i> , 2004 ; Sato, 2011].	27
2.1	Essais réalisés pour tester l'influence des conditions initiales d'essai.	54
4.1	Effets de l'augmentation de la vitesse de déformation sur l'enveloppe de réponse de l'Huntsman TM Araldite [®] 420 A/B.	103
4.2	Effets de l'augmentation de la vitesse de déformation sur l'enveloppe de réponse de la Dow [®] Betamate TM 1496 V.	107
4.3	Effets de l'augmentation de la vitesse de déformation sur l'enveloppe de réponse de la 3M [®] AF 191.	111
4.4	Comparaison des effets de l'augmentation de la vitesse de déformation sur la réponse mécanique des adhésifs étudiés.	112
5.1	Variables de modélisation du comportement mécanique de l'adhésif.	125
5.2	Paramètres identifiés en cisaillement.	132
5.3	Paramètres identifiés en traction.	133
5.4	Paramètre identifié en compression-cisaillement.	134
5.5	Récapitulatif des paramètres identifiés sur essais Arcan.	136

Introduction générale

Contexte et problématique

L'utilisation du collage pour la réalisation de structures assemblées est aujourd'hui très fréquente dans de nombreux secteurs de l'industrie et plus particulièrement dans celui du transport. L'intérêt pour cette technique d'assemblage provient essentiellement des objectifs de réduction de consommation de carburant et d'allègement des structures des véhicules modernes. En effet, le collage structural offre de nombreux avantages. La possibilité de réaliser des liaisons continues entre des pièces de nature différente et de forme plus ou moins complexe en fait une alternative intéressante aux méthodes « traditionnelles » d'assemblages tels que le boulonnage, le soudage, etc.

La conception d'une pale d'hélicoptère, telle que celle présentée sur la figure 1, est un bon exemple des avantages fournis par ce procédé d'assemblage. La section courante d'une pale d'hélicoptère est une structure de type caisson. Elle est généralement constituée d'un longeron et d'un arêtier en composite unidirectionnel, d'une peau et d'éventuelles nervures en composite tissé, d'une protection métallique sur le bord d'attaque et d'une mousse polyuréthane de remplissage. Chacun de ces éléments assure une fonction mécanique précise dans la structure. Seul l'assemblage par collage permet de préserver la forme aérodynamique de la pale.

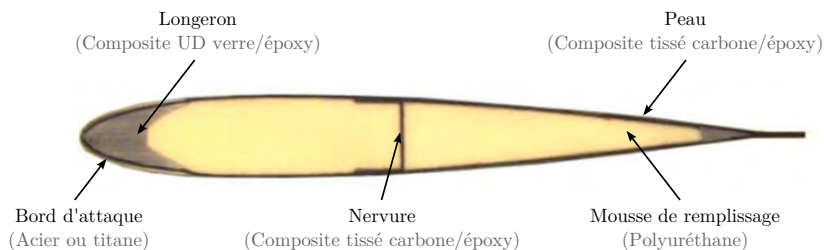


FIGURE 1 – Section courante d'une pale d'hélicoptère, d'après [Aubry, 2013].

Durant leur période d'utilisation, les structures assemblées par collage peuvent être soumises à des conditions complexes d'impact. C'est le cas, entre autres, des véhicules terrestres (*e.g.*, durant un accident) et aériens (*e.g.*, lors d'un impact d'oiseau). Les adhésifs étant des polymères, leur comportement mécanique est en général sensible à la variation de vitesse de déformation. Afin d'assurer l'intégrité de ces structures et par conséquent la sécurité des utilisateurs, il est nécessaire de prendre en considération en amont, c'est-à-dire dès de la phase de conception, le comportement au crash de ces dernières.

De nos jours, les simulations numériques basées sur la méthode des éléments finis sont préférées aux essais expérimentaux sur structures. Ils permettent en effet de réduire les coûts

ainsi que les délais de développement. Toutefois, les modèles de calculs développés nécessitent d'être alimentés par des lois de comportement associées aux matériaux sollicités. L'identification des différents paramètres matériaux d'une loi de comportement ne peut être réalisée que sur la base de données expérimentales. De fait, la caractérisation dynamique des adhésifs est un prérequis essentiel à l'analyse et au développement des structures collées sujettes à des sollicitations d'impacts.

Objectif et approche développée

Les travaux de thèse présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans ce contexte. Ils ont été réalisés au sein du groupe matériaux et structures composites de l'Institut Clément Ader (ICA), en collaboration avec l'Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRDL) et ArcelorMittal R&D Montataire - *Automotive Applications*.

L'objectif de l'étude est d'identifier le comportement mécanique d'adhésifs sous sollicitations dynamiques combinées.

À l'époque actuelle, il existe un nombre important d'essais permettant de déterminer les propriétés à l'impact de joints collés de nature et de géométries différentes. Ils se basent sur l'utilisation de dispositifs dynamiques tels que les moutons pendules, les barres d'Hopkinson, les canons, etc. [Goglio, 2011 ; da Silva *et al.*, 2012a ; Sato, 2005]. Toutefois, ils sont majoritairement orientés « structure » et induisent des chargements inhomogènes de l'adhésif. Par conséquent, ils ne sont pas adaptés à la caractérisation directe du comportement mécanique des adhésifs sous sollicitations dynamiques et combinées.

Une solution peut être apportée par l'utilisation de l'éprouvette Arcan TCS, développée par Créac'hcadec *et al.* [Créac'hcadec *et al.*, 2015] sur la base des travaux d'Arcan, de J.-Y. Cognard *et al.* [Arcan *et al.*, 1987 ; Cognard *et al.*, 2005], pour la caractérisation quasi-statique des colles dans un assemblage. Elle permet, en effet, de solliciter l'adhésif d'intérêt suivant un chargement quasi-uniforme et d'extraire son enveloppe quasi-complète de réponse, ce qui est attendu par l'industriel.

L'analyse de l'extension de cette éprouvette dans des conditions d'essais sous tour de chute a fait l'objet d'une étude préliminaire à la fois expérimentale et numérique sur un dispositif existant au laboratoire. Différentes hauteurs de chute et masses d'impacteur ont été testées afin d'analyser leurs influences sur le comportement dynamique de l'essai. Les différentes observations issues de ces campagnes ont permis d'établir des guides de conception pour le développement d'un dispositif de sollicitation et d'une éprouvette Arcan dédiés à la caractérisation dynamique des adhésifs.

De nombreux essais ont été réalisés avec le moyen développé. Dans un premier temps, ils ont permis de valider les choix de conception. Dans un second temps, ils ont été réalisés afin de caractériser trois adhésifs structuraux d'intérêts pour le secteur du transport. Le dispositif de sollicitation dynamique seul a également été employé pour des essais « structures » sur des éprouvettes TAST et simple recouvrement. Les différents travaux expérimentaux réalisés durant la thèse ont amené à réaliser un total de 1022 essais (320 quasi-statiques et 702 dynamiques).

En parallèle de ces études expérimentales, un premier travail numérique a été réalisé sur la modélisation des adhésifs. Les travaux effectués sur cette thématique devront permettre, à terme, de pouvoir simuler et prédire le comportement mécanique d'assemblages collés sollicités en dynamique à partir des données issues du moyen développé.

Structure du mémoire

Le mémoire de thèse est composé de cinq chapitres. La structure proposée est schématiquement illustrée sur la figure 2.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique. Le collage structural et ses spécificités sont introduits afin de positionner le problème de recherche. Un état de l'art des principales méthodes expérimentales de caractérisation des adhésifs sous chargements quasi-statique et dynamique est ensuite présenté. De cette étude, une éprouvette Arcan adaptée à la caractérisation quasi-statique des adhésifs sous chargements combinés et un dispositif d'essai dynamique de type tour de chute sont identifiés.

Le second chapitre porte sur l'étude de l'utilisation de l'éprouvette identifiée dans des conditions d'essai sous tour de chute. Une analyse prospective expérimentale et numérique est proposée. Les résultats obtenus sont analysés et discutés. Ils permettent notamment d'établir des guides de conception pour développer un moyen d'essais adapté.

Le troisième chapitre est dédié au développement d'un moyen d'essais. L'extension de l'éprouvette Arcan à la sollicitation dynamique est tout d'abord traitée. De cette étude est définie une géométrie d'éprouvette ainsi qu'une méthode d'extraction des données. Le développement d'un dispositif de traction dynamique est ensuite présenté. Son développement se base sur l'utilisation d'un modèle éléments finis représentant un système masse/ressorts et permet d'assurer la monotonie du chargement au cours du temps. Enfin, la validation du moyen d'essais est traitée par le biais d'essais expérimentaux. Les résultats obtenus permettent de valider les choix de conception effectués.

Le quatrième chapitre traite de la caractérisation d'adhésifs structuraux. Le comportement mécanique de trois adhésifs est d'abord étudié en quasi-statique et dynamique suivant différentes directions de chargement. Les résultats dynamiques sont obtenus par l'intermédiaire du moyen d'essais développé et montrent la pertinence de l'étude des adhésifs en dynamique. Une comparaison avec des essais standards de type TAST est ensuite réalisée. Les résultats obtenus sont analysés et discutés.

Le cinquième et dernier chapitre est une ouverture sur la modélisation numérique des adhésifs. Après une brève introduction permettant de poser le contexte de développement et les hypothèses de modélisation, le modèle de comportement et son identification sur essais Arcan sont présentés. La validation du modèle est réalisée sur des essais structures de type TAST et simple recouvrement. Les résultats numériques obtenus sont comparés avec les essais expérimentaux. La validité de ce premier modèle numérique développé est discutée à chaque étape de l'étude.

Le document se termine par une conclusion où l'ensemble du travail effectué est repris et synthétisé. L'énoncé des perspectives envisagées finalise le document.

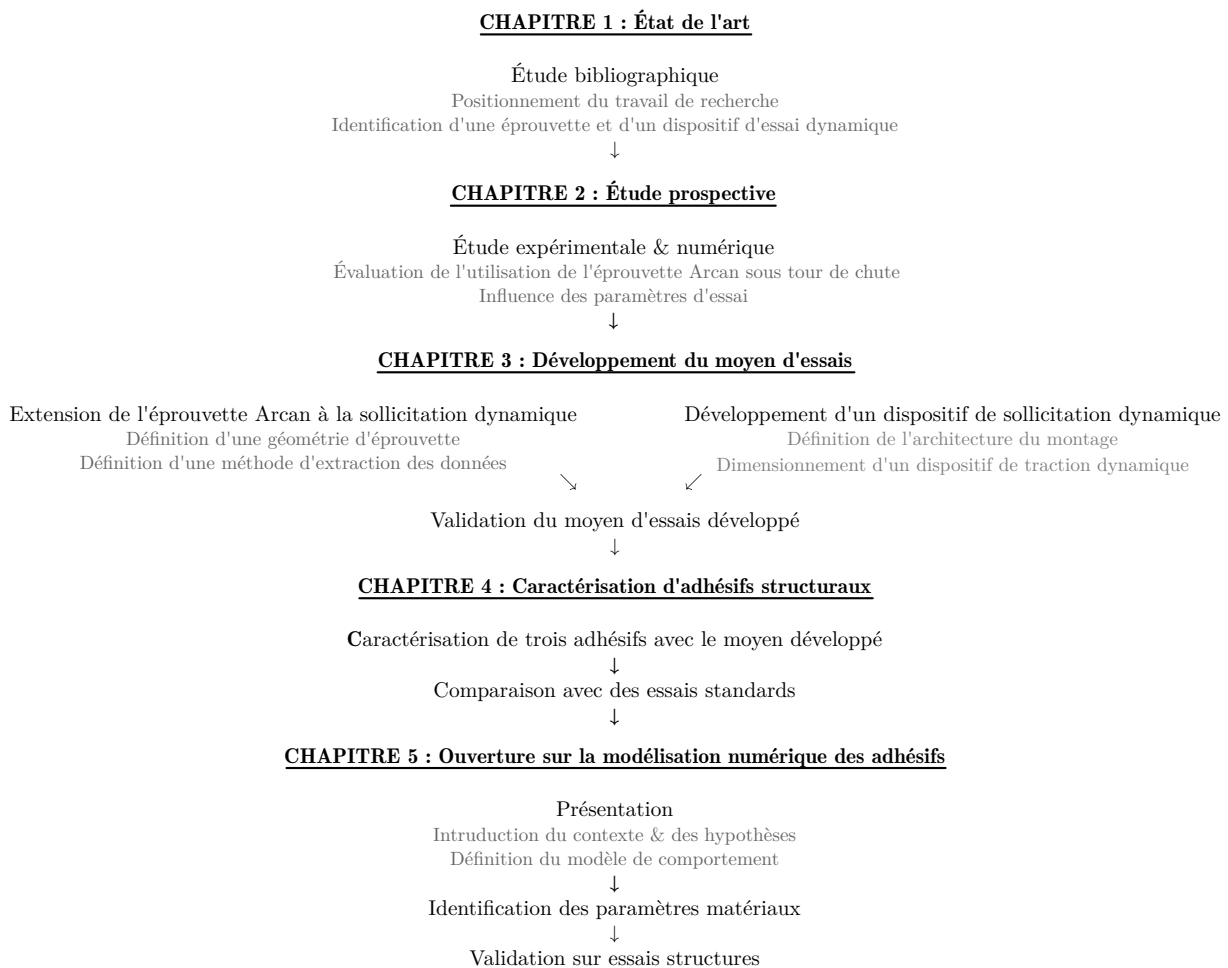


FIGURE 2 – Structure du mémoire.

CHAPITRE 1

État de l'art

Résumé

Ce premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique du collage structural et des méthodes de caractérisation des adhésifs.

La fonction principale d'un joint de colle dans un assemblage est de réaliser une liaison complète entre deux substrats avec lesquels il interagit. L'étude de ce type de liaison est complexe car elle nécessite un dialogue continu entre plusieurs domaines scientifiques.

La caractérisation mécanique d'un adhésif peut être réalisée de manière massive ou dans un assemblage. De nombreux essais existent en dynamique. Ils diffèrent principalement par les moyens expérimentaux de sollicitation mis en œuvre et les vitesses de déformation qu'ils permettent d'obtenir. Toutefois, la plupart de ces essais sont dédiés à des études comparatives. Seuls quelques-uns permettent de fournir une identification partielle des propriétés matériaux de l'adhésif étudié.

L'état de l'art réalisé permet finalement d'identifier une éprouvette Arcan ainsi qu'un dispositif d'essais pouvant être adaptés à la caractérisation dynamique des adhésifs.

Sommaire

1.1	Introduction, généralités	6
1.2	Caractérisation mécanique des assemblages collés	13
1.2.1	Les essais quasi-statiques	14
1.2.2	Les essais dynamiques	27
1.3	Conclusions	40

1.1 Introduction, généralités

Le collage est une technique d'assemblage qui consiste à rendre deux substrats solidaires l'un de l'autre par l'intermédiaire d'une substance appelée adhésif. Il est utilisé depuis des millénaires et subit un essor important depuis le milieu des années 1940 avec le développement des adhésifs à base de résines synthétiques.

L'*American Society for Testing Material* (ASTM) définit en 1982 un adhésif comme étant un agent de collage utilisé pour transférer une charge requise entre deux adhérents exposés à un environnement de service typique de la structure concernée. Selon Kinloch dans [Kinloch, 1987], un adhésif peut être défini comme un matériau qui, lorsqu'il est appliqué sur les surfaces d'autres matériaux, peut les assembler et résister à leur séparation.

Adams *et al.* introduisent la notion d'adhésif structural dans [Adams *et al.*, 1997] comme étant un adhésif qui peut résister à des charges importantes et qui est responsable de la résistance et de la rigidité de la structure. Néanmoins, il n'existe pas de définition universellement acceptée d'un adhésif structural. Par exemple, J. Cognard dans [Cognard, 2000] considère qu'un adhésif est dit de structure « s'il donne à des joints en recouvrement, formés de deux lames d'aluminium, de dimensions normalisées, une résistance à la rupture supérieure ou égale à 10 MPa ». Jeandreau dans [Jeandreau, 2006] considère quant à lui qu'un adhésif est dit de structure lorsqu'il confère à l'assemblage une résistance mécanique du même ordre de grandeur que celle des adhérents environnants, et permet de conserver l'intégrité physique de la structure liée.

Il convient d'ajouter que la notion de durabilité est généralement sous-entendue avec le qualificatif structural. Ainsi l'adhésif structural, faisant partie à part entière de la structure, doit conserver ses caractéristiques mécaniques durant toute la durée de vie de la structure [Cognard, 2000].

De nos jours, le collage structural constitue une alternative intéressante aux autres méthodes traditionnelles d'assemblage telles que le boulonnage, le soudage, le rivetage, etc. Il présente en effet de nombreux avantages :

1. Il permet d'assembler des substrats de nature différente *e.g.*, métaux, plastiques, composites, mousses, etc., afin d'obtenir des structures à la fois légères, résistantes et rigides.
2. Pour une même tenue mécanique, un assemblage collé est plus léger qu'un assemblage riveté, boulonné ou même soudé.
3. Il permet de réaliser une liaison continue entre les substrats. Contrairement aux assemblages rivetés ou boulonnés, qui nécessitent la présence de trous dans la structure (générant *in situ* des concentrations de contraintes, cf. figure 1.1), les assemblages collés permettent d'obtenir une répartition des contraintes plus homogène le long de la surface de recouvrement. Cette meilleure transmission des flux d'effort confère à l'assemblage une très bonne résistance à la fatigue dynamique.
4. Généralement appliqués à l'état liquide ou mou en fine couche, les adhésifs permettent d'amener beaucoup de flexibilité dans la conception d'une structure, voire de développer de nouvelles règles de conception.
5. Enfin, la possibilité de formuler spécifiquement des adhésifs permet de leur attribuer des fonctions secondaires telles que l'étanchéité, l'isolation thermique et acoustique, la protection à la corrosion, etc.

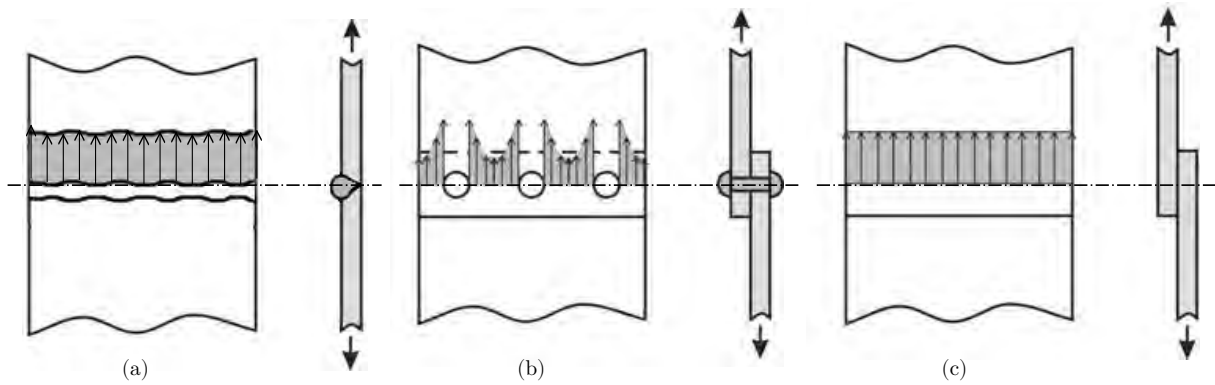


FIGURE 1.1 – Répartition des contraintes dans différents types d'assemblages. (a) Assemblage par soudage. (b) Assemblage par rivetage. (c) Assemblage par collage. Adapté de [Loctite, 1995 ; da Silva *et al.*, 2011].

Les structures sandwichs sont un bon exemple de ces avantages. Un sandwich en nid d'abeilles (cf. figure 1.2a) est composé d'une âme en nid d'abeilles sur laquelle sont collées deux peaux. L'âme en nid d'abeilles est une structure composée de fines plaques pliées appelées « gaufres » assemblées par collage pour former des alvéoles hexagonales. Les peaux peuvent être métalliques et/ou composites. Le panneau sandwich ainsi obtenu a un très bon rapport rigidité/masse et peut être assemblé par collage à des nervures pour former une structure plus complexe développée, par exemple, pour la voilure d'un avion (cf. figure 1.2b).

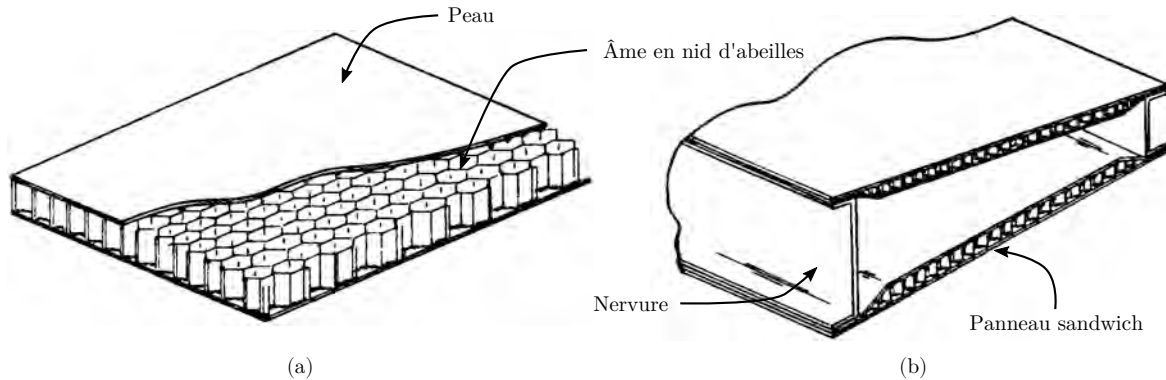


FIGURE 1.2 – Exemples de structures obtenues par collage. (a) Panneau sandwich en nid d'abeilles. (b) Structure collée pour voilure d'avion. Adapté de [Kinloch, 1997].

Le collage structural présente néanmoins plusieurs inconvénients :

1. Une parfaite maîtrise du procédé complexe de mise en œuvre est indispensable pour réaliser un collage répondant au cahier des charges. Les surfaces à encoller doivent tout d'abord subir une préparation en vue de favoriser l'adhésion de l'adhésif. Il faut ensuite garantir une épaisseur de joint généralement comprise entre 0,2 mm et 0,5 mm pour assurer une bonne tenue mécanique de l'assemblage. Sur des pièces de grandes dimensions, cette faible épaisseur complique fortement la mise en œuvre et la répétabilité. Enfin, la maîtrise du cycle de cuisson de l'adhésif est un facteur essentiel pour la fabrication d'assemblages collés performants car elle a un fort impact sur l'établissement

des propriétés mécaniques [Zablocka *et al.*, 2012].

2. La mise en œuvre des adhésifs présente des risques environnementaux et de santé. Les traitements chimiques sont généralement à base de solvants ou d'acides polluants. La composition des adhésifs présente fréquemment un caractère nocif pour les utilisateurs. Tous ces aspects conduisent à l'utilisation de moyens spécifiques pouvant être onéreux.
3. La maintenance et le recyclage des structures collées restent aujourd'hui des points délicats qui limitent l'utilisation de ce procédé d'assemblage. Par conséquent, les structures collées sont le plus souvent dimensionnées pour toute la durée de vie du produit.

Les travaux récents sur les procédés de mise œuvre des adhésifs et la maîtrise du vieillissement des structures collées (en simulation et en contrôle non destructif) permettent néanmoins de lever certains verrous et d'améliorer la confiance de l'industrie envers le collage structural.

Les avantages et inconvénients du collage structural étant présentés, il est nécessaire de définir les différents éléments composant un joint de colle. Un assemblage collé classique est schématisé sur la figure 1.3.

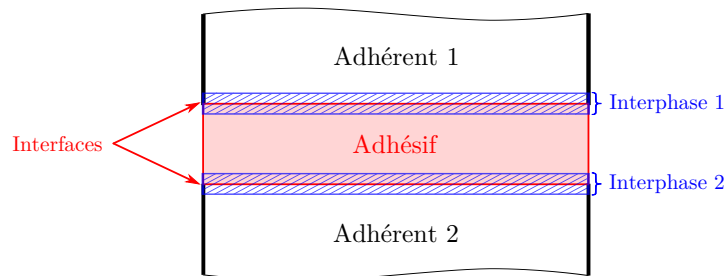


FIGURE 1.3 – Structure d'un joint de colle.

Il se compose de deux adhérents reliés par un liant polymère. Cette liaison crée deux interfaces et deux interphases. L'interface correspond à une frontière située au plan de contact entre l'adhésif et l'adhérent. L'interphase se rapporte à une zone de transition, plus ou moins épaisse, enveloppant l'interface. Elle présente une structure et des propriétés intrinsèques différentes de celles des matériaux assemblés [Bikerman, 1967]. L'ensemble des constituants contribue à la réponse mécanique de la structure collée. De ce fait, l'élaboration d'un assemblage structural collé efficace nécessite une approche interdisciplinaire. En particulier, un dialogue continu entre trois domaines scientifiques majeurs que sont la science des polymères, la physico-chimie des surfaces et interfaces, et la mécanique, s'avère essentiel.

La science des polymères

La science des polymères est un domaine qui regroupe la physique et la chimie des polymères. D'un point de vue chimique, les polymères sont des macromolécules (*i.e.*, des molécules possédant une masse moléculaire élevée) qui constituent une classe de matériaux à part entière.

Les adhésifs sont des polymères et peuvent être classés selon des catégories fondées sur [ASM International Comitee, 1990 ; Cognard, 2000 ; Cognard, 2005] :

- la nature du polymère, *i.e.*, naturel ou synthétique ;
- leur mode de durcissement, *i.e.*, leur polymérisation ;
- leur forme physique, *i.e.*, mono ou multi-composants, liquide, films, etc. ;
- leur famille chimique, *e.g.*, les cyanoacrylates et époxydes.

Dans le cadre des adhésifs structuraux, ils sont généralement différenciés par leur mode de durcissement [Darque-Ceretti et Monasse, 2008 ; Papon, 2015] :

- Les adhésifs à mise en œuvre chimique nécessitent une réaction chimique pour polymériser. Ce sont les thermodurcissables tels que les colles époxydes, les cyanoacrylates et les phénoliques. Le processus de transformation étant irréversible, il empêche le recyclage de l'assemblage collé.
- Les adhésifs à mise en œuvre physique obtiennent leur caractère adhésif par un changement d'état physique lié à l'évaporation d'un solvant ou à la solidification. Ce sont les thermoplastiques tels que les colles acryliques, certains polyuréthanes et les polyesters. Contrairement aux thermodurcissables, le processus de transformation de ces colles est réversible, les rendant potentiellement recyclables.
- Les adhésifs sensibles à la pression sont mis en œuvre par pression et ont une adhésion instantanée. Ce sont les colles polyacrylates, polydiènes, silicones, etc.

Étant donnée la nature variée des adhésifs, le comportement mécanique des assemblages collés est également très diversifié [Kinloch, 1987 ; van Straalen *et al.*, 1998 ; Cognard, 2005]. Celui-ci peut être fragile ou ductile, avec des propriétés de résistance mécanique plus ou moins élevées (cf. figure 1.4).

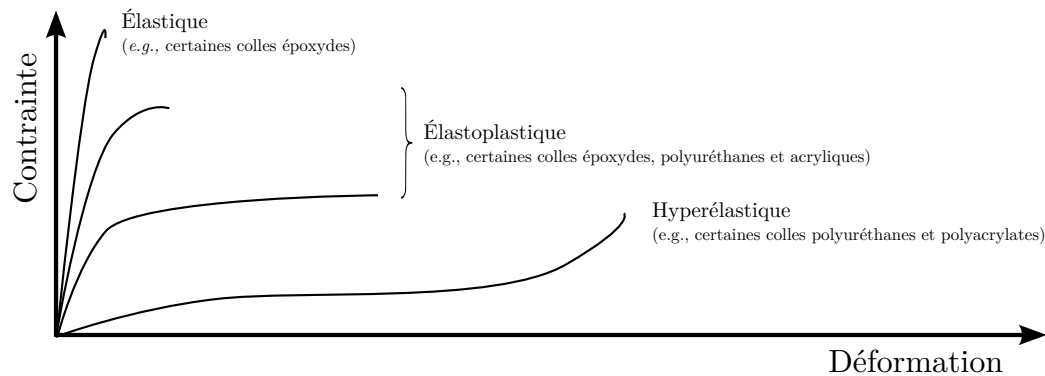


FIGURE 1.4 – Illustration des différents comportements mécaniques des adhésifs, à partir de [Kinloch, 1987 ; van Straalen *et al.*, 1998 ; Cognard, 2005].

De plus, un même adhésif peut évoluer voire changer en fonction de l'environnement dans lequel l'assemblage est sollicité et de la nature de la sollicitation. La figure 1.5 présente des résultats issus d'essais de cisaillement montrant l'influence de certains paramètres sur le comportement mécanique d'adhésifs.

L'augmentation de la température fait généralement passer l'adhésif d'un état vitreux vers un état caoutchoutique. Cela a pour conséquence un changement radical du comportement mécanique de celui-ci : de solide rigide vers fluide visqueux. En service, la structure collée ne

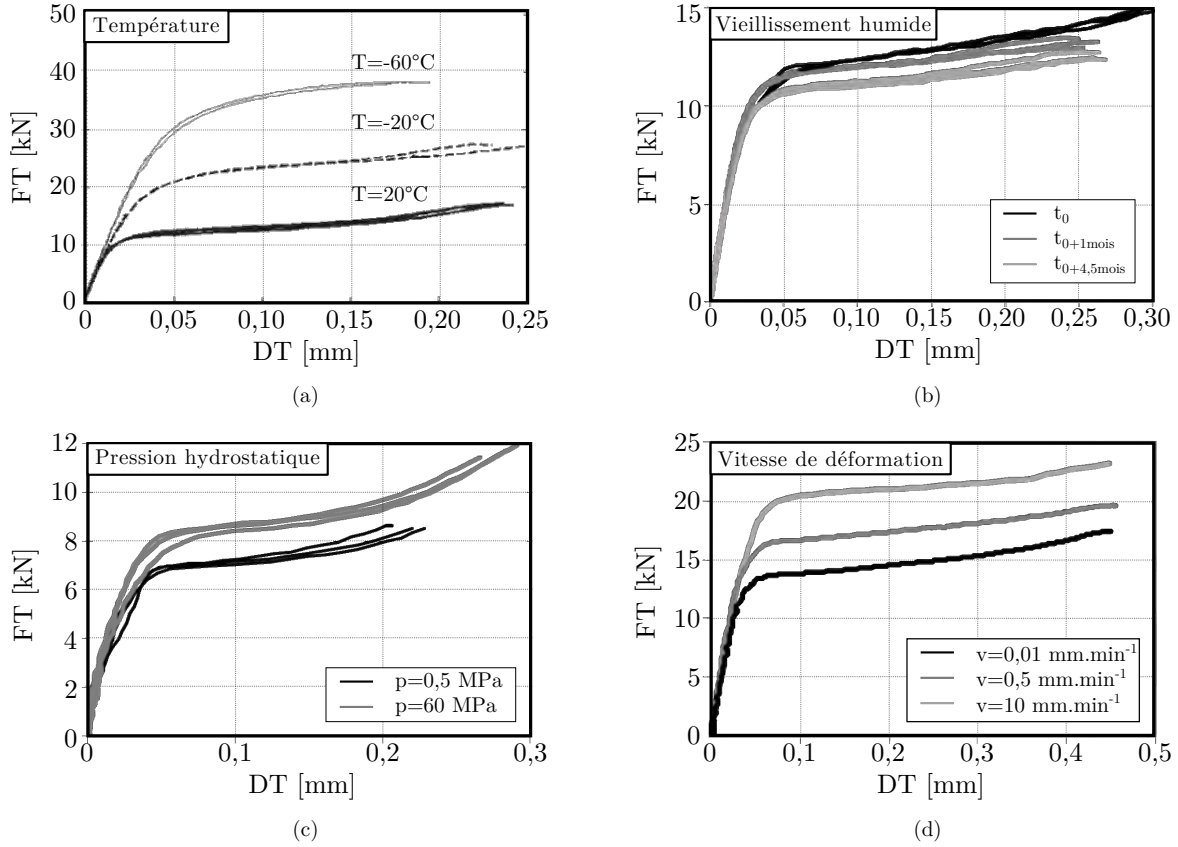


FIGURE 1.5 – Influence de certains paramètres sur le comportement mécanique des adhésifs. (a) Influence de la température - Essais Arcan en cisaillement, adapté de [Badulescu *et al.*, 2012]. (b) Influence du vieillissement en milieu humide - Essais Arcan en cisaillement, adapté de [Arnaud *et al.*, 2013]. (c) Influence de la pression hydrostatique - Essais TAST modifié (cisaillement), adapté de [Cognard *et al.*, 2010a]. (d) Influence de la vitesse de sollicitation - Essais Arcan en cisaillement, adapté de [Créac'hcadec, 2008].

doit pas dépasser la température de transition vitreuse de l'adhésif, notée T_g , sous risque de voir ses propriétés mécaniques chuter. Même à l'état vitreux, le comportement mécanique de l'adhésif est sensible à la température (cf. figure 1.5a).

Dès leur mise en œuvre, les assemblages collés peuvent être soumis aux agressions de l'environnement extérieur telles que les UV, l'humidité, etc. Ces sollicitations ont généralement tendance à dégrader leurs caractéristiques mécaniques (cf. figure 1.5b).

Dans le cas de structures immergées, l'adhésif est soumis à un chargement naturel correspondant à une pression hydrostatique. Celle-ci influe également sur les propriétés mécaniques de l'assemblage collé (cf. figure 1.5c).

Durant leur période d'utilisation, certaines structures collées peuvent être sollicitées à de hautes vitesses, *e.g.* durant le crash d'un véhicule. Les adhésifs étant des matériaux visqueux, leur comportement mécanique présente une dépendance à la vitesse de déformation [Cognard, 2005]. Les résultats tracés sur la figure 1.5d sont extraits d'une étude réalisée par Créac'hcadec dans [Créac'hcadec, 2008] *via* l'utilisation d'une machine de traction classique. Les courbes montrent distinctement la sensibilité du comportement mécanique de la colle étudiée à ce paramètre, même dans le cas de vitesses de sollicitation faibles (de $10^{-2}\text{ mm.min}^{-1}$ à 10 mm.min^{-1}).

La physico-chimie des surfaces et interfaces

L'étude des assemblages collés ne peut se limiter à la science des polymères car ces structures sont composées à la fois d'un polymère mais également de substrats. Ces éléments interagissent par l'intermédiaire de liaisons physiques ou chimiques afin de former les interfaces. De fait, l'adhésif n'est pas seulement un polymère mais constitue également un matériau avec une capacité d'adhésion [Kinloch, 1987]. D'une manière générale, le terme adhésion est consacré aux mécanismes de formation de l'interface, alors que celui de l'adhérence caractérise plus spécifiquement, la résistance et la rupture d'un assemblage collé [Good, 1976].

Il existe de nombreuses théories relevant de plusieurs disciplines et à plusieurs échelles d'analyse qui traitent des interactions entre le substrat et l'adhésif. Néanmoins, elles ne peuvent expliquer à elles seules le phénomène d'adhésion totale qui résulte plutôt de la superposition de nombreux mécanismes associés à une adhésion mécanique, physique et chimique [Kinloch, 1987 ; Bruneaux, 2004 ; Packham, 2005] :

- L'adhésion mécanique ou « mise en contact » intègre les théories de l'ancrage mécanique [Mac Bain et Hopkins, 1925], de la diffusion/interdiffusion [Voyutskii, 1963] et de la thermodynamique aussi appelée théorie du mouillage [Sharpe et Schonhorn, 1964].
- L'adhésion physique s'intéresse à des interactions qui ont lieu à l'interface. Celles-ci correspondent à des forces d'adsorption [Leadley et Watts, 1997], de Van de Waals, électrostatiques [Deryagin, 1934] et/ou de faible cohésion [Bikerman, 1961].
- L'adhésion chimique se base, quant à elle, sur la formation de liaisons covalentes ou ioniques lors de réactions chimiques [Buchan et Rae, 1946].

Lors de la mise en œuvre des adhésifs, les surfaces à encoller sont rarement utilisées telles quelles et subissent une préparation. Les différents types de préparation de surface sont principalement obtenus *via* l'utilisation de traitements chimiques (dégraissage solvants, etc.), mécaniques (sablage, ponçage, etc.), énergétiques (plasma, laser, etc.) et/ou *via* l'utilisation de primaires et promoteur d'adhérence [Chaignaud, 2015]. Ils ont pour objectifs, d'augmenter la rugosité des substrats pour favoriser l'ancrage de l'adhésif, d'éliminer les couches de faible cohésion, etc. afin d'augmenter le niveau d'adhérence de l'adhésif sur les surfaces préparées. Dans le processus de mise en œuvre des adhésifs, la préparation des surfaces ne doit pas être négligée. En effet, elle peut avoir une forte incidence sur le comportement mécanique global de la structure collée et notamment sur sa durabilité.

Trois modes de rupture des structures collées, illustrés sur la figure 1.6, peuvent être rencontrés :

- La rupture est dite cohésive quand elle apparaît dans le corps même de l'adhésif ou des substrats. Une rupture cohésive dans l'adhésif se caractérise par un chemin de fissure qui ne traverse pas l'interface. Ainsi, il reste de la colle sur les substrats après rupture.
- La rupture est dite adhésive, interfaciale ou d'adhérence quand elle apparaît à l'interface entre le substrat et l'adhésif. Ce type de rupture se caractérise par la présence de zones du substrat, initialement encollées, dépourvues de colle après rupture.
- Le terme de « rupture mixte » peut être employé dans le cas où les deux types de rupture sont rencontrés sur une même éprouvette.

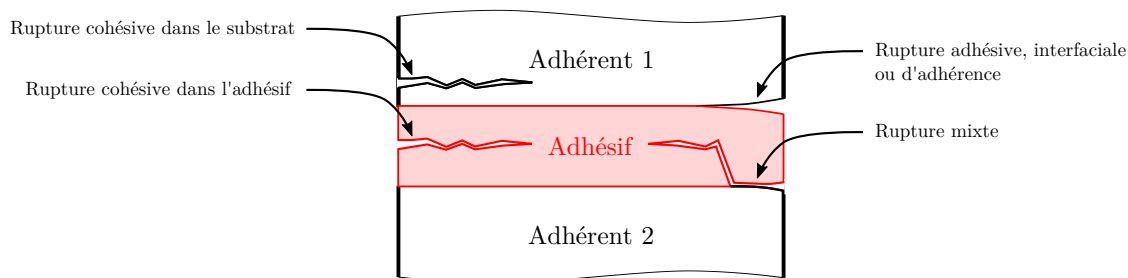


FIGURE 1.6 – Modes de rupture des assemblages collés.

Dans le cadre du développement d'un essai de caractérisation mécanique des adhésifs, la rupture cohésive est recherchée afin de s'affranchir des problèmes liés à l'adhésion.

La mécanique

Dans l'industrie, le dimensionnement d'une structure collée se fait en fonction d'un cahier des charges. Celui-ci précise la nature de l'environnement (milieu humide, froid, etc.) et des sollicitations (impact, fatigue, etc.) à laquelle la structure sera ou pourra être sujette durant sa durée de vie cible. Afin de répondre à ce cahier des charges, la science des polymères ainsi que la physico-chimie des surfaces et interfaces peuvent amener des solutions. Cependant, le choix d'une solution technologique ne peut être évalué ou validé que par un essai mécanique.

Deux approches complémentaires peuvent être utilisées afin de caractériser le comportement mécanique des assemblages collés : l'approche en contraintes et la mécanique de la rupture.

La première approche consiste à étudier l'évolution de variables d'états définissant l'état de sollicitation de la structure collée. Ces informations permettent, par exemple, d'identifier l'influence des différents paramètres liés aux propriétés de l'adhésif et des substrats, de la géométrie et des conditions d'essais, sur le comportement mécanique global de la structure. Les travaux présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans cette approche.

La seconde approche porte sur l'étude de la propagation d'une fissure déjà existante avant sollicitation. Celle-ci est complémentaire à l'approche en contrainte dans le sens où elle permet d'étudier la tolérance aux dommages et défauts d'une structure collée et ainsi d'estimer sa durée de vie en service.

1.2 Caractérisation mécanique des assemblages collés

Les assemblages collés peuvent être sollicités mécaniquement de plusieurs façons. Kinloch identifie dans [Kinloch, 1987] quatre modes de chargement principaux présentés sur la figure 1.7. Une sollicitation normale de l'assemblage est obtenue lorsque la direction de chargement est normale à la surface de recouvrement (cf. figure 1.7a). Une sollicitation de cisaillement de l'assemblage est obtenue lorsque la direction de chargement est tangentielle à la surface de recouvrement (cf. figure 1.7b). Une sollicitation de clivage se produit lorsque la direction de chargement est excentrée de la zone collée ou lorsque les substrats fléchissent sous l'action d'un moment (cf. figure 1.7c). La sollicitation de pelage est relativement similaire au clivage et apparaît lorsque l'un ou les deux substrats sont de faible épaisseur *i.e.*, plus souples.

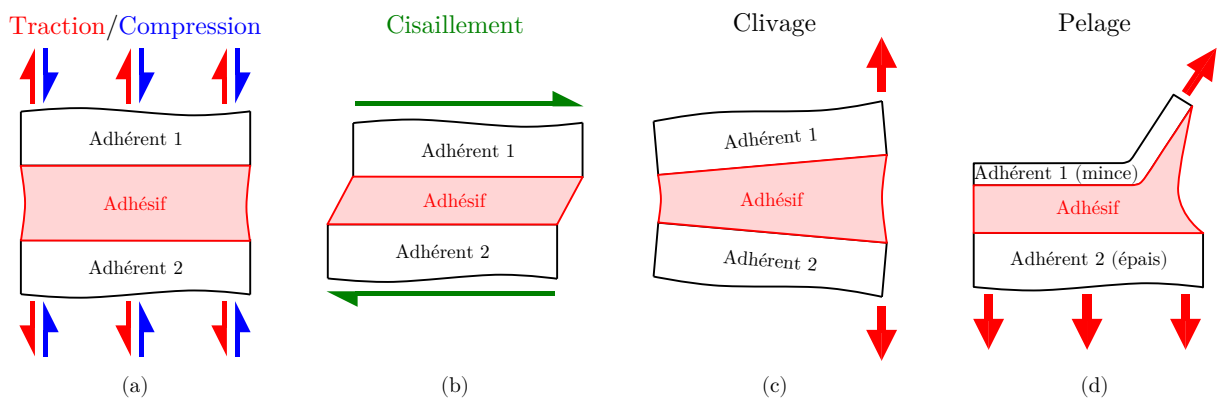


FIGURE 1.7 – Modes de chargement des assemblages collés, d’après [Kinloch, 1987 ; Loctite, 1995]. (a) Sollicitation normale (traction ou compression). (b) Sollicitation de cisaillement. (c) Sollicitation de clivage. (d) Sollicitation de pelage.

Les règles de dimensionnement préconisent de concevoir des structures collées qui favorisent les sollicitations de cisaillement pur du joint de colle [da Silva *et al.*, 2011]. Dans les faits, il existe de nombreuses applications où cela n’est pas possible. Par conséquent, l’étude du comportement mécanique des adhésifs ne doit pas se limiter à une courbe de réponse mécanique issue d’un cas de sollicitation mais plutôt porter sur l’enveloppe complète de réponse.

Les principaux essais mécaniques permettant de caractériser le comportement des adhésifs sont étudiés dans cette partie du manuscrit. Celle-ci est scindée en deux sous-parties : la première permet d’avoir une vue d’ensemble des approches et éprouvettes développées pour la caractérisation quasi-statique des adhésifs ; la deuxième est dédiée à l’étude des essais et moyens d’essais développés pour la caractérisation des assemblages collés en dynamique. Les essais caractérisant l’initiation et la propagation de fissures liés à des approches de la mécanique de la rupture ne sont pas exposés. La liste présentée est non exhaustive mais constitue un échantillon représentatif des méthodes utilisées dans l’industrie.

1.2.1 Les essais quasi-statiques

De nombreux essais sont disponibles afin de caractériser le comportement mécanique d'un adhésif sous sollicitations quasi-statiques. Ils sont généralement classés en trois catégories :

- Les essais massiques consistent à solliciter l'adhésif seul sous sa forme massique *i.e.*, en dehors d'un assemblage.
- Les essais sur assemblages collés ou *in situ* permettent de caractériser l'adhésif dans sa configuration d'utilisation.
- Les essais liés à des approches de la mécanique de la rupture permettent de caractériser l'endommagement ainsi que la rupture du joint.

Les essais massiques

L'une des méthodes les plus courantes et les plus « simples » permettant de caractériser le comportement mécanique d'un adhésif consiste à solliciter ce dernier sous sa forme massique. Pour chaque mode de chargement, il existe au moins un essai massique comme le montre la figure 1.8.

En traction, la géométrie de l'éprouvette utilisée est de type « altère » telle qu'elle est définie dans la norme ISO 527-2 [ISO 527-2, 2012] et représentée sur la figure 1.8a. Le choix des dimensions dérive du moyen d'essais et de l'instrumentation (essentiellement de la méthode du suivi des déplacements) utilisés. Ainsi, des éprouvettes longues sont généralement employées pour des adhésifs rigides (*e.g.* colles époxydes) et des courtes pour des adhésifs souples (*e.g.* colles polyuréthanes) [da Silva *et al.*, 2012b]. Ce type d'essai est réalisé avec une machine de traction. Il permet d'extraire des courbes en contrainte-déformation et ainsi de déterminer différents paramètres matériaux tels que le module d'Young, la limite élastique, etc.

En compression, deux catégories d'essais peuvent être distinguées : les essais de compression uniaxiale et les essais de compression hydrostatique.

Les éprouvettes utilisées pour la compression uniaxiale sont de forme cylindrique pour les adhésifs souples telles que décrites dans les normes ISO 7743 [ISO 7743, 2011] et ASTM D575 [ASTM D575, 2012] et de forme cylindrique ou prismatique pour les adhésifs rigides telles que définies dans les normes ISO 604 [ISO 604, 2004] et ASTM D695 [ASTM D695, 2015] (cf. figure 1.8b). Les essais de compression uniaxiale sont réalisés avec une machine de traction ou une presse asservie. Comme le montre la figure 1.8b, un dispositif de maintien peut être installé sous la traverse afin d'éviter le flambement de l'éprouvette lorsqu'elle est fine. Ces essais permettent d'extraire des courbes en contrainte-déformation.

Les essais de compression hydrostatique sont réalisés sur des éprouvettes de forme cylindrique ou cubique. L'essai nécessite l'utilisation d'une chambre de compression et permet d'extraire le module d'élasticité isostatique de l'adhésif étudié.

En cisaillement, les propriétés de l'adhésif peuvent être obtenues *via* l'utilisation d'éprouvettes massiques cylindriques pleines ou creuses sollicitées en torsion. Ce type d'essai n'est pas normalisé. Par conséquent, la géométrie des éprouvettes varie d'une étude à une autre [Gali *et al.*, 1981 ; Chen *et al.*, 2011]. Ces essais permettent d'extraire des courbes en contrainte-déformation.

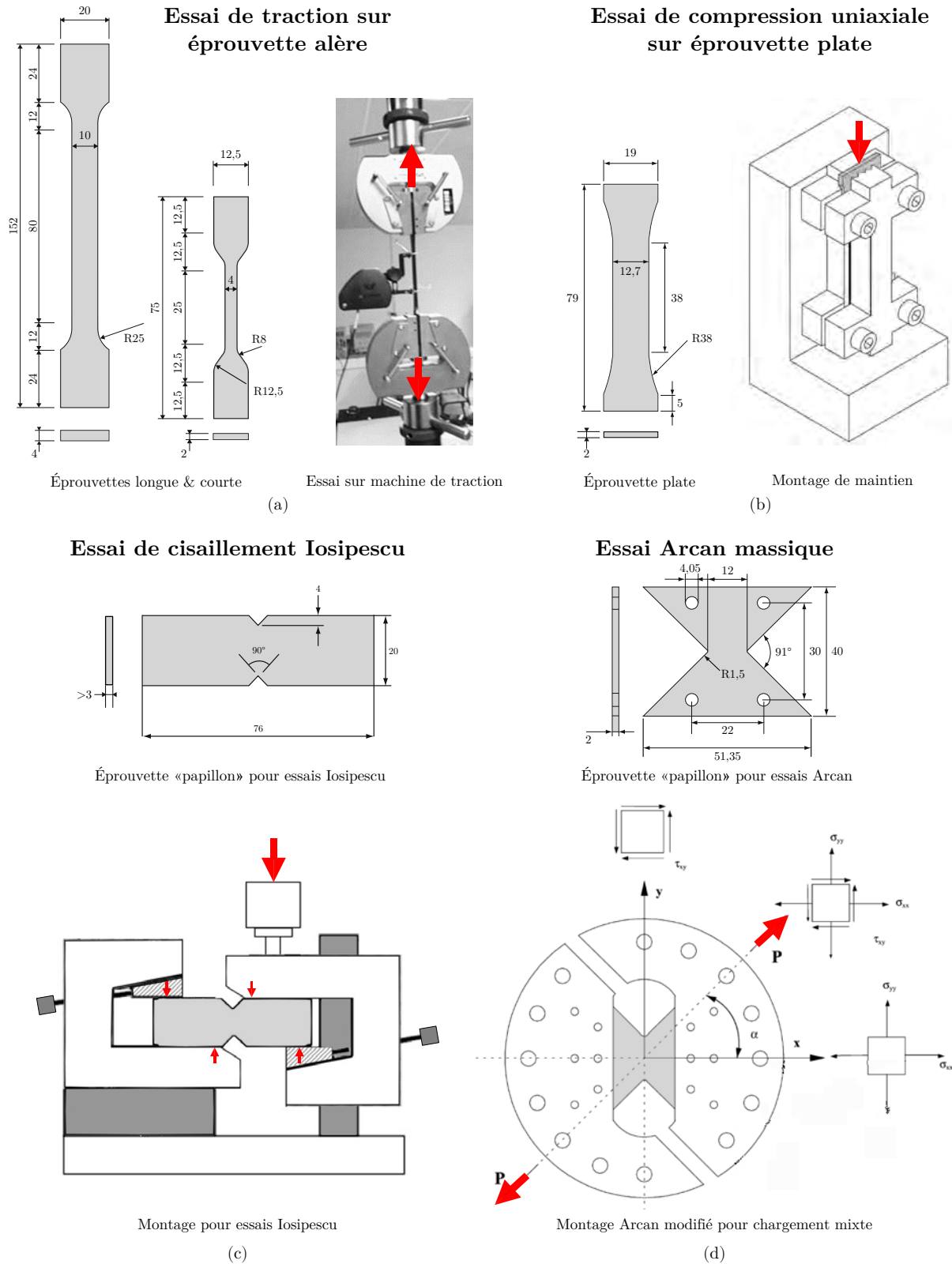


FIGURE 1.8 – Exemples d’essais sur éprouvettes massiques. (a) Essai de traction sur éprouvette altère, d’après [ISO 527-2, 2012 ; Créac’hcadec, 2008]. (b) Essai de compression uniaxiale sur éprouvette plaque, d’après [ASTM D695, 2015 ; da Silva *et al.*, 2012b]. (c) Essai de cisaillement de type Iosipescu, d’après [ASTM D5379, 2012 ; Dean et Duncan, 1998]. (d) Essai Arcan sur éprouvette papillon, d’après [da Silva *et al.*, 2011 ; El-Hajjar et Haj-Ali, 2004].

Les essais de type Iosipescu et Arcan sur éprouvettes massiques constituent deux approches originales permettant de solliciter l'échantillon de colle en cisaillement ou suivant des directions de chargement combinées.

L'essai Iosipescu, présenté sur la figure 1.8c, a été initialement développé par Iosipescu [Iosipescu, 1967] afin de tester la résistance des métaux et des soudures dans des conditions de cisaillement pur. Néanmoins, son utilisation s'est étendue afin de tester les composites [ASTM D5379, 2012] et colles [Grabovac et Morris, 1991]. L'éprouvette a une géométrie de type papillon. Durant l'essai, celle-ci est chargée sur sa tranche de manière asymétrique en quatre points (cf. figure 1.8c). Cette méthode de chargement permet d'annuler les moments de flexion au centre de l'éprouvette et de générer ainsi, un champ de contraintes uniforme dans la zone analysée. Néanmoins, l'utilisation d'échantillons de 3 à 4 mm d'épaisseur est nécessaire afin d'éviter l'apparition de flexion hors-plan.

Les essais Arcan sur éprouvettes massiques permettent de caractériser le comportement d'un adhésif suivant plusieurs directions de sollicitation et ainsi d'extraire l'enveloppe de réponse mécanique complète de l'adhésif. De même que pour les essais Iosipescu, les éprouvettes utilisées ont une géométrie de type papillon mais peuvent être plus fines (inférieures à 3 mm d'épaisseur). Le chargement combiné est rendu possible par le biais de la géométrie du montage de fixation de l'éprouvette. Une version du montage développé initialement par Arcan *et al.* [Arcan *et al.*, 1978 ; Banks-Sills et Arcan, 1983] est présentée sur la figure 1.8d.

Un des intérêts principaux des essais sur éprouvettes massiques est qu'ils permettent, dans la plupart des cas, de générer une répartition des contraintes uniforme dans l'adhésif. De ce fait, il est relativement simple de remonter aux propriétés mécaniques de l'adhésif étudié à partir des résultats extraits. Néanmoins, les essais massiques présentent deux inconvénients majeurs.

Le premier concerne la fabrication des éprouvettes massiques. Elles sont généralement réalisées en versant ou en injectant la colle dans un moule ou par pression entre deux plaques. Quelle que soit la technique utilisée, le procédé de mise en œuvre génère, de manière plus ou moins importante, des bulles d'air dans les échantillons [da Silva *et al.*, 2012b]. D'un point de vue mécanique, ces défauts ont peu d'influence sur les propriétés moyennées tel que le module d'Young. En revanche, l'amorçage de la rupture se faisant sur une bulle, ils amènent de la dispersion sur les limites à rupture.

Le deuxième inconvénient est lié à l'approche : celle-ci est purement matériau et les propriétés mécaniques qui en résultent sont intrinsèques à l'adhésif. Or, le comportement d'un adhésif massif est différent de celui d'un adhésif dans sa condition d'utilisation *i.e.*, dans un assemblage.

Les essais sur assemblages collés ou *in situ*

Les structures collées sont généralement conçues afin de favoriser les sollicitations de cisaillement pur du joint de colle. Cette configuration permet d'obtenir une meilleure tenue mécanique de l'assemblage. De ce fait, la majorité des essais sur assemblages collés a été développée pour caractériser l'adhésif en cisaillement.

Les essais de type simple recouvrement sur substrats minces ont été parmi les premiers développés. Ils sont encore aujourd'hui très utilisés, notamment dans l'industrie du transport. Les raisons principales sont liées à la simplicité de mise en œuvre, la similarité, en terme de géométrie, avec les structures rencontrées dans l'industrie et les faibles coûts de production.

La géométrie de l'éprouvette est décrite dans les normes ASTM D1002 [ASTM D1002, 2010] et ISO 4587 [ISO 4587, 2003]. Comme le montre la figure 1.9a, l'éprouvette est composée de deux tôles fines de 1,6 mm d'épaisseur entre lesquelles est disposé l'adhésif d'intérêt. Les dimensions affichées sont celles recommandées par la norme. L'épaisseur de l'adhésif et des substrats ainsi que la longueur de recouvrement peuvent varier. Pour une étude comparative, il est nécessaire de garder ces paramètres constants car ils influent fortement sur la résistance en cisaillement de l'éprouvette. La direction de chargement est longitudinale aux substrats ce qui permet de solliciter l'adhésif en « cisaillement ».

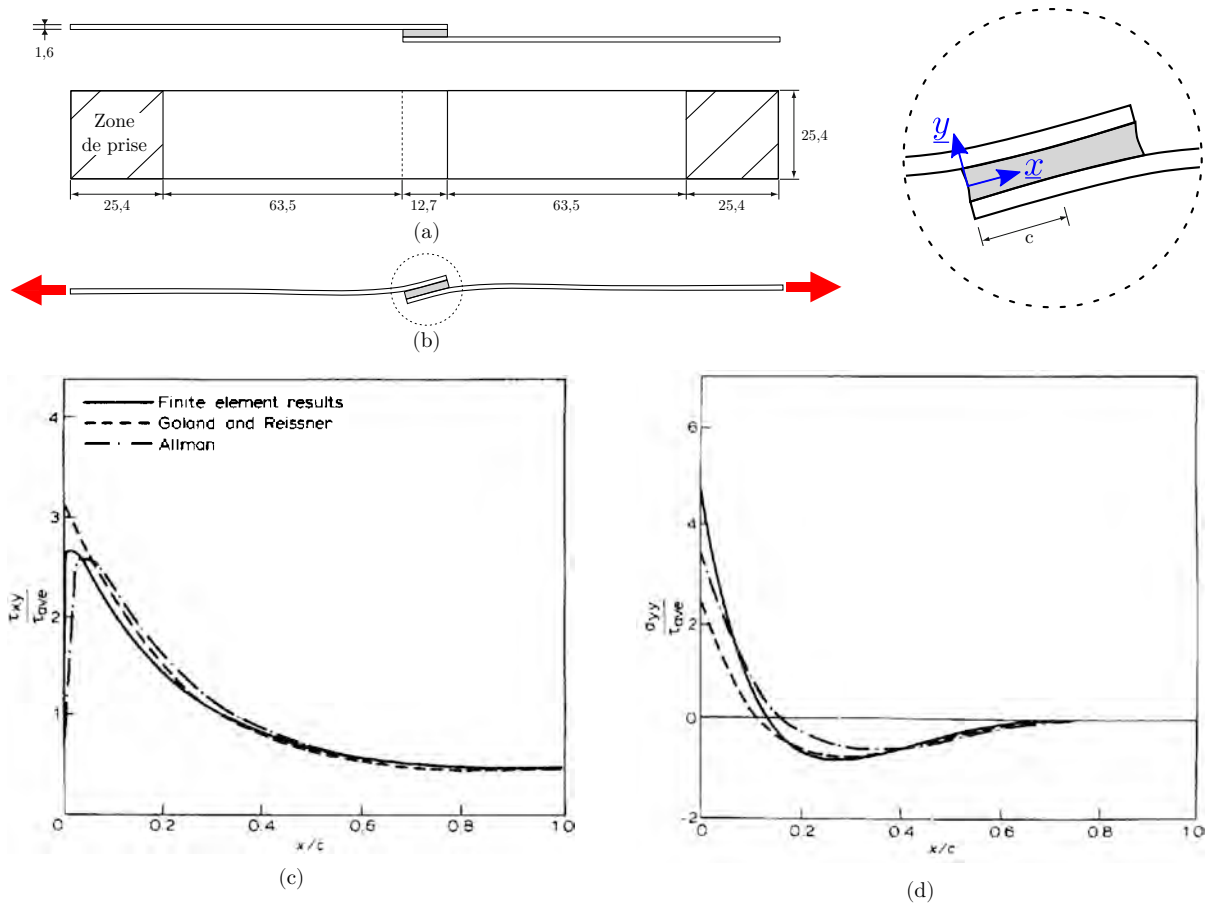


FIGURE 1.9 – Essai simple recouvrement. (a) Géométrie de l'essai, d'après [ASTM D1002, 2010]. (b) Déformée de l'éprouvette. Distribution des contraintes (c) tangentielle et (d) normale normalisées sur la moitié de la longueur de recouvrement pour un chargement de 15 kN [Harris et Adams, 1984].

L'utilisation de ce type d'éprouvette pour l'identification des matériaux ou des études comparatives reste cependant discutable. En effet, l'état de contrainte généré dans l'adhésif durant l'essai, *i.e.* sa distribution spatiale et son évolution au cours du temps, est complexe [Cooper et Sawyer, 1979]. Premièrement, les substrats fins ont tendance à fléchir avec l'augmentation de la charge appliquée. Ce phénomène se produit afin d'annuler le moment généré par leur désaxage initial. La géométrie globale de l'éprouvette prend alors une forme de « S », comme illustré sur la figure 1.9b, générant un mélange de contraintes normale et tangentielle dans l'adhésif. De plus, même si les substrats sont généralement plus raides que l'adhésif, ils se déforment longitudinalement (suivant x sur la figure 1.9b) au cours de

l'essai. Cela génère une distribution non-uniforme des contraintes le long de la surface de recouvrement, liée à ce que Volkersen appelle les « déformations différentielles » [Volkersen, 1938]. Les résultats présentés sur les figures 1.9c & d sont issus d'une simulation numérique réalisée par Harris & Adams [Harris et Adams, 1984] et des modèles théoriques de Goland & Reissner [Goland et Reissner, 1944] et Allman [Allman, 1977]. Ils représentent la distribution des contraintes tangentielle (figure 1.9c) et normale (figure 1.9d) normalisées sur la demi-longueur c de recouvrement pour un chargement de 15 kN. Ces deux figures mettent en évidence des distributions non homogènes des contraintes dans l'adhésif. Elles montrent notamment la présence de concentrations de contraintes aux extrémités de la zone de recouvrement. Ces singularités, également appelées « effets de bords », sont liées au fort gradient de rigidité existant entre l'adhésif et les adhérents. Elles peuvent initier une fissure et générer la rupture prématurée de l'éprouvette.

Plusieurs études ont montré qu'il est possible de limiter ces effets en travaillant sur la géométrie locale des substrats au niveau des bords libres et/ou des bourrelets de colle [Lang et Mallick, 1998 ; Penado, 2000 ; Belingardi *et al.*, 2002]. Le tableau 1.1 est issu d'un comparatif réalisé par Hentinen dans [Adams, 2005] sur la base des travaux de Hildebrand [Hildebrand, 1994]. Il répertorie les charges à rupture normalisées obtenues pour plusieurs géométries locales testées sur le même type d'éprouvette à simple recouvrement. Les résultats montrent une influence non négligeable de ce paramètre sur le comportement global de l'éprouvette. Par exemple, entre la géométrie A correspondant à un bord droit et la géométrie I correspondant à un bord biseauté, un effort cinq fois supérieur est nécessaire pour générer la rupture finale de l'éprouvette.

Géométrie locale	Effort à rupture [Normalisé]	Géométrie locale	Effort à rupture [Normalisé]
A 	1,00	I 	5,43
C 	2,64	K 	5,43
F 	3,65	L 	5,43
G 	4,68	M 	5,43

TABLEAU 1.1 – Influence de la géométrie locale des éprouvettes à simple recouvrement sur l'effort à rupture normalisé, adapté de [Adams, 2005] sur la base des travaux de [Hildebrand, 1994].

Afin de limiter la flexion des substrats, d'autres géométries d'éprouvette utilisant des tôles ont été développées.

L'essai normalisé ASTM D3165 [ASTM D3165, 2014] sur éprouvette « stratifiée » utilise des substrats plus épais et donc plus raides pour limiter cette flexion (cf. figure 1.10a). L'augmentation de l'épaisseur totale des adhérents est réalisée par le collage d'une deuxième tôle. Cette solution ne permet cependant pas d'enlever les déformations différentielles et d'avoir un chargement uniforme de l'adhésif.

Les essais sur éprouvettes à double recouvrement définis par la norme ASTM D3528 [ASTM D3528, 2016] sont présentés sur la figure 1.10b & c. Ils permettent d'annuler le moment résultant au centre de l'échantillon en la symétrisant. En revanche, la géométrie d'éprouvette

de type A ou B génèrent des moments internes dans chacune des zones collées liés à leur excentration. Également, les essais à double recouvrement ne permettent pas d'enlever les déformations différentielles et donc d'assurer l'uniformité du champ de contrainte.

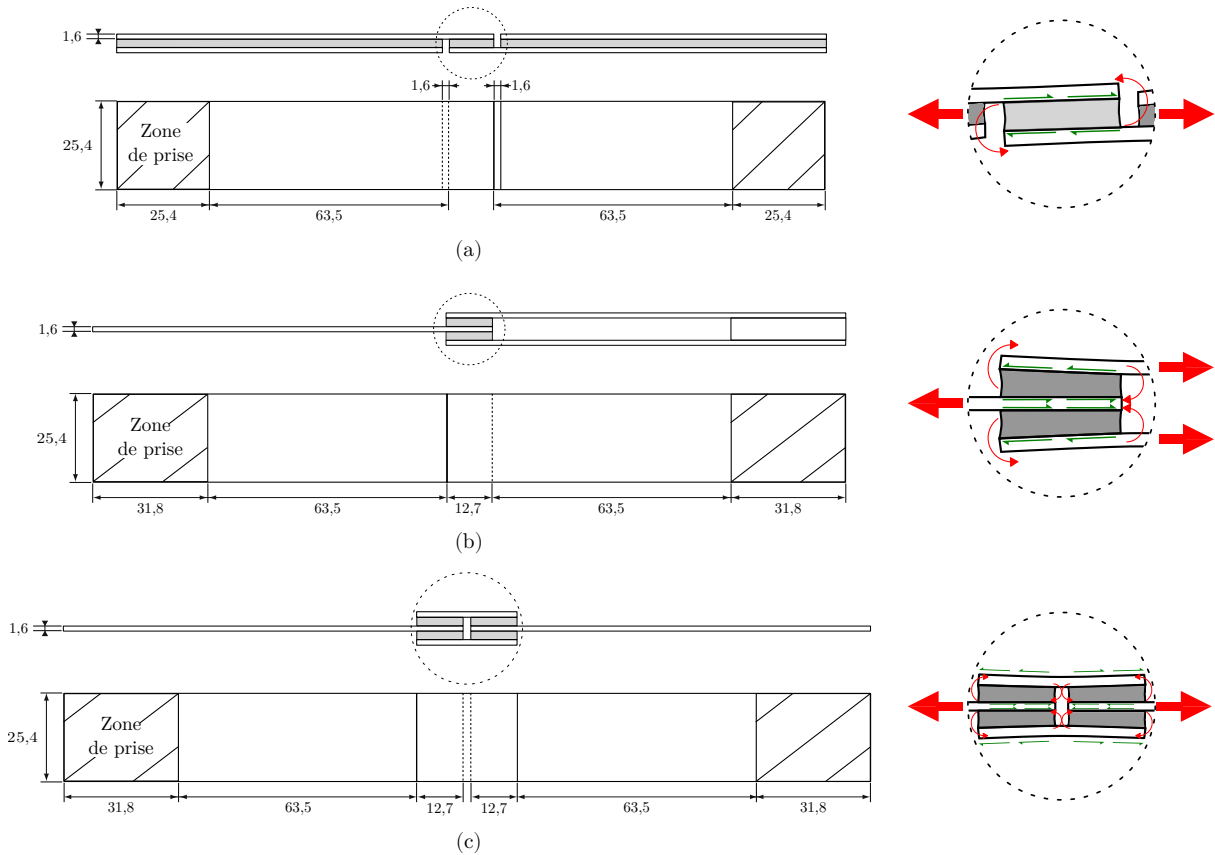


FIGURE 1.10 – Autres types d'essais sur substrats minces et déformées associées. (a) Éprouvette « stratifiée » d'après [ASTM D3165, 2014]. (b) & (c) Éprouvettes à double recouvrement de type A (b) et B (c), d'après [ASTM D3528, 2016].

Les essais de type simple recouvrement sur substrats épais, communément appelés TAST pour *Thick Adherend Shear Test*, permettent de tester qualitativement des adhésifs en cisaillement. Il existe différentes normes définissant ce type d'essais [ASTM D3983, 2011 ; ASTM D5656, 2010 ; ISO 11003-2, 2001]. Elles ont en commun l'utilisation de géométries d'éprouvettes dont l'épaisseur des substrats est supérieure à 9 mm et des longueurs de recouvrement inférieures à 10 mm. Ces deux paramètres géométriques permettent de fortement diminuer la flexion des substrats ainsi que les déformations différentielles. Par conséquent, la répartition des contraintes est quasi-uniforme sur la majeure partie de la surface de recouvrement. La géométrie TAST définie par Althof et Neumann [Althof et Neumann, 1974 ; ISO 11003-2, 2001], présentée sur la figure 1.11a, est aujourd'hui la plus utilisée dans l'industrie. Telle que définie dans la norme, elle peut être obtenue en usinant deux plaques préalablement collées ou en collant deux substrats préalablement usinés.

J.-Y. Cognard *et al.* proposent dans [Cognard *et al.*, 2008 ; Cognard *et al.*, 2010b] une version modifiée de l'essai TAST présentée sur la figure 1.11b. Le développement de ce test est basé sur deux principes. Le premier concerne l'utilisation d'éprouvettes plus petites dont la géométrie globale correspond à la partie utile de l'éprouvette TAST classique. Elle est

notée « E » sur la figure 1.11b et est définie sur la figure 1.12a. L'éprouvette est de forme parallélépipédique, mesure approximativement 20 mm de hauteur et comporte une zone de recouvrement de 9,53 mm par 25,4 mm. L'intérêt majeur de cette géométrie d'éprouvette reste sa simplicité de fabrication. Le deuxième principe concerne l'utilisation de deux supports rigides, notés « S1 » et « S2 » sur la figure 1.11b. Ils viennent remplacer les longs substrats de l'éprouvette TAST classique et intègrent un système de positionnement. Cet élément permet d'éviter les défauts d'alignement généralement rencontrés lors du montage d'éprouvettes TAST normalisées dans les mors de la machine de traction.

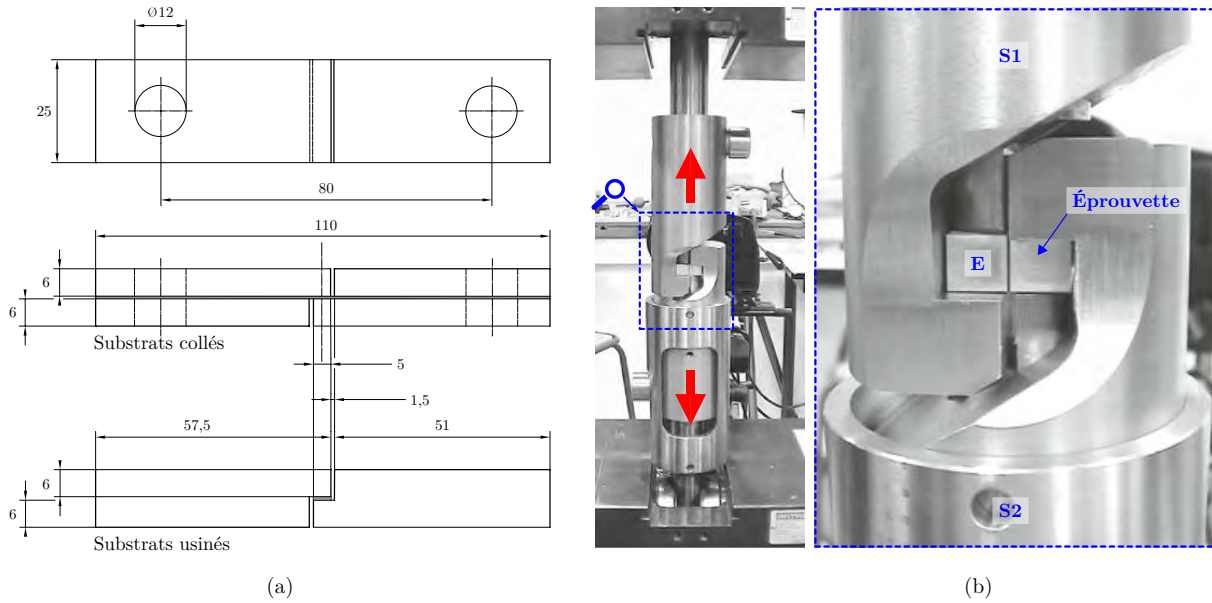


FIGURE 1.11 – (a) Géométrie de l'éprouvette TAST, d'après [ISO 11003-2, 2001]. (b) Essai TAST modifié, adapté de [Cognard *et al.*, 2010b ; Cognard *et al.*, 2008].

La figure 1.12 présente des résultats issus de plusieurs études numériques et expérimentales réalisées sur l'essai TAST modifié par J.-Y. Cognard *et al.* [Cognard *et al.*, 2008 ; Cognard *et al.*, 2010b ; da Silva *et al.*, 2012b]. Les courbes tracées sur les figures 1.12b & c présentent les distributions de la contrainte tangentielle τ_{xy} et normale σ_{yy} le long de la surface de recouvrement ($x = 0$ correspond à la position au centre de l'éprouvette, cf. figure 1.12a), suivant trois positions dans l'épaisseur de l'adhésif (notées y sur la figure 1.12a) et pour deux géométries locales (substrats et joint de colle droits & substrats avec becs et joint de colle essuyé). Ces résultats sont extraits d'une étude éléments finis 2D, avec une hypothèse de contraintes planes, pour une contrainte moyenne de cisaillement obtenue de 1 MPa.

Quelles que soient la géométrie locale et la position d'observation dans l'épaisseur de l'adhésif, la distribution de la contrainte de cisaillement le long de la surface de recouvrement est quasi-uniforme. En revanche, des concentrations de contraintes sont observées sur les deux extrémités de la zone de recouvrement lorsque les bords sont droits. Elles sont principalement associées à la composante normale σ_{yy} et sont plus importantes lorsque les données sont extraites à proximité de l'interface substrat/adhésif. En modifiant la géométrie locale des substrats par l'utilisation de becs et en essuyant les bourrelets de colle, les résultats montrent qu'il est possible d'atténuer ces effets de bords.

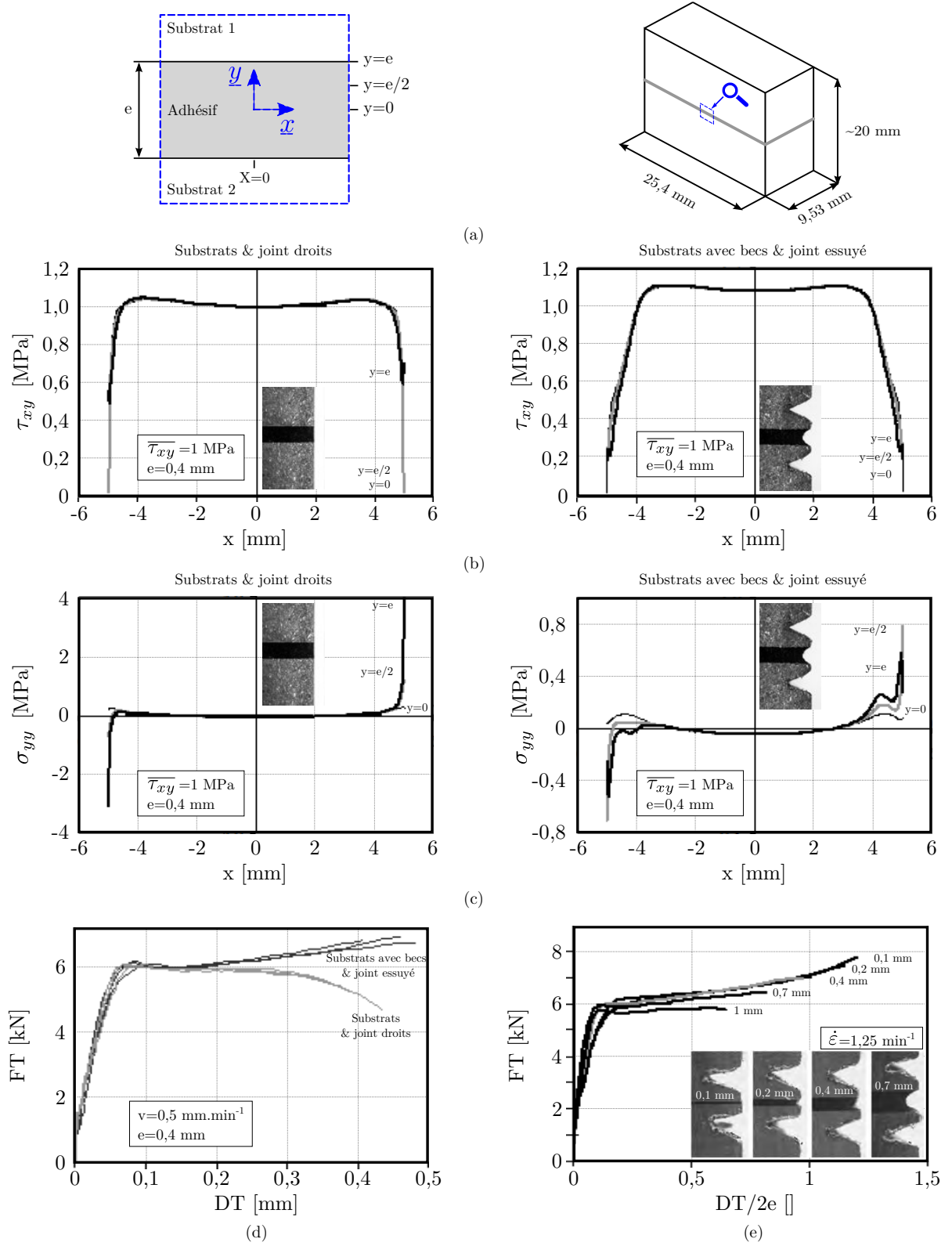


FIGURE 1.12 – (a) Géométrie de l'éprouvette TAST modifiée, d'après [Cognard *et al.*, 2008]. Influence de la géométrie locale de l'éprouvette sur les distributions calculées des contraintes de cisaillement (b) et normale (c) dans l'adhésif, le long de la surface de recouvrement, adapté de [da Silva *et al.*, 2012b]. Influence de la géométrie locale (d) et de l'épaisseur du joint de colle (e) sur le comportement mécanique de l'éprouvette TAST modifiée, adapté de [da Silva *et al.*, 2012b ; Cognard *et al.*, 2010b].

La figure 1.12d présente des résultats en effort tangentiel FT-allongement tangentiel DT extraits d'essais expérimentaux réalisés sur les deux types d'éprouvette étudiés numériquement. Ils sont obtenus pour une vitesse de sollicitation de $0,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. La géométrie locale n'a pas d'influence sur le comportement mécanique de l'assemblage pour un déplacement tangentiel inférieur à $0,15 \text{ mm}$. Au dessus de cette valeur, deux groupes de comportement peuvent être distingués : les résultats obtenus avec des substrats droits montrent une décroissance de FT jusqu'à rupture alors que ce paramètre continue de croître pour des éprouvettes avec becs.

Par ces deux études, J.-Y. Cognard *et al.* montrent la nécessité de prendre en considération les « effets de bords » dans le développement d'un essai qualitatif de caractérisation des adhésifs.

Outre l'aspect « géométrie locale », d'autres essais sur montage TAST modifié ont montré qu'il existe une influence de l'épaisseur du joint de colle sur le comportement mécanique de l'assemblage [Cognard *et al.*, 2010b]. Cinq épaisseurs d'adhésif ont été testées à iso-vitesse de déformation $\dot{\epsilon} = 1,25 \text{ min}^{-1}$ afin d'éviter les effets liés au caractère visqueux des adhésifs. Quelques résultats issus de cette étude sont présentés sur la figure 1.12e. Ils montrent une baisse des niveaux des déformations à rupture pour des épaisseurs de colle supérieures à $0,4 \text{ mm}$.

Une alternative aux essais de recouvrement pour caractériser les adhésifs en cisaillement sont les essais de torsion sur des éprouvettes collées bout-à-bout. Deux types de géométrie cylindrique, présentés sur la figure 1.13 sont généralement utilisés.

Les essais *napkin ring*, décrits dans les normes ISO 11003-1 et ASTM E 229 [ISO 11003-2, 2001 ; ASTM E229, 1997], sont réalisés sur des éprouvettes tubulaires telles que présentées sur la figure 1.13a. Dans le cas où les rayons intérieurs et extérieurs ont des valeurs proches $r_{int} \simeq r_{ext}$, la répartition de la contrainte de cisaillement est relativement constante dans l'adhésif. Althof et Neumann ont par ailleurs montré dans [Althof et Neumann, 1974] une similarité entre les résultats obtenus sur la caractérisation d'un même adhésif par des essais *napkin ring* et TAST. Le principal défaut de cet essai réside dans sa mise en œuvre. En effet, la mise et le maintien en position des différents éléments durant le collage doit être maîtrisé afin d'éviter un défaut d'alignement des deux substrats. De même, il est nécessaire de nettoyer les bourrelets car ils peuvent avoir une incidence non négligeable sur le comportement mécanique de l'assemblage [Adams, 1991].

Afin de remédier à ce problème, Adams et Coppendale recommandent dans [Adams et Coppendale, 1977] de remplacer les éprouvettes tubulaires par des éprouvettes pleines (cf. figure 1.13b). Ils proposent également de considérer la non-uniformité des contraintes dans l'adhésif et de réaliser une correction afin de traduire les résultats initialement exprimés en couple-angle de torsion en contrainte-déformation.

La géométrie des éprouvettes collées bout-à-bout utilisées en torsion peut également être adaptée pour caractériser les adhésifs en traction. Ces essais sont généralement appelés « *poker chip* ». Il existe plusieurs normes les définissant [ISO 6922, 1987 ; ASTM D2095, 2015 ; ASTM D897, 2016] ainsi que des variantes comme le montre la figure 1.14. Ces versions améliorées ont été développées en raison des fortes dispersions observées sur les résultats (de l'ordre de 36 % d'après J. Cognard [Cognard, 2000]) liées à des conditions de traction asymétriques (variation d'épaisseur, présence de bourrelets, etc.). Outre l'aspect mise en œuvre, il a été montré, notamment par Adams *et al.* dans [Adams *et al.*, 1978], que cet essai ne permet pas d'avoir une distribution uniforme des contraintes dans l'adhésif. De plus, il introduit des

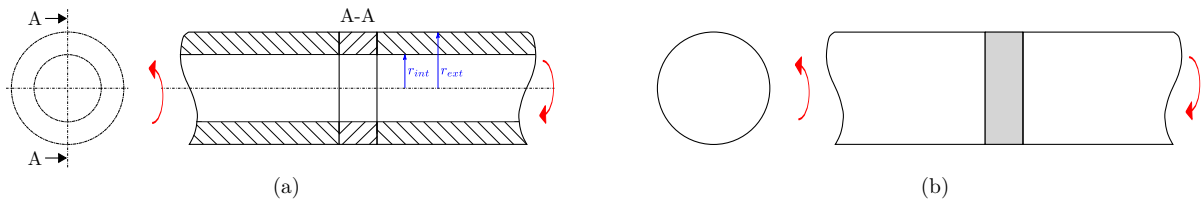


FIGURE 1.13 – (a) Géométrie de l'éprouvette *napkin ring*, d'après [ASTM E229, 1997]. (b) Géométrie de l'éprouvette bout-à-bout solide, d'après [Adams et Coppedale, 1977].

contraintes radiales et circonférentielles supplémentaires sur les bords de l'adhésif liées à la contraction latérale de l'adhésif.

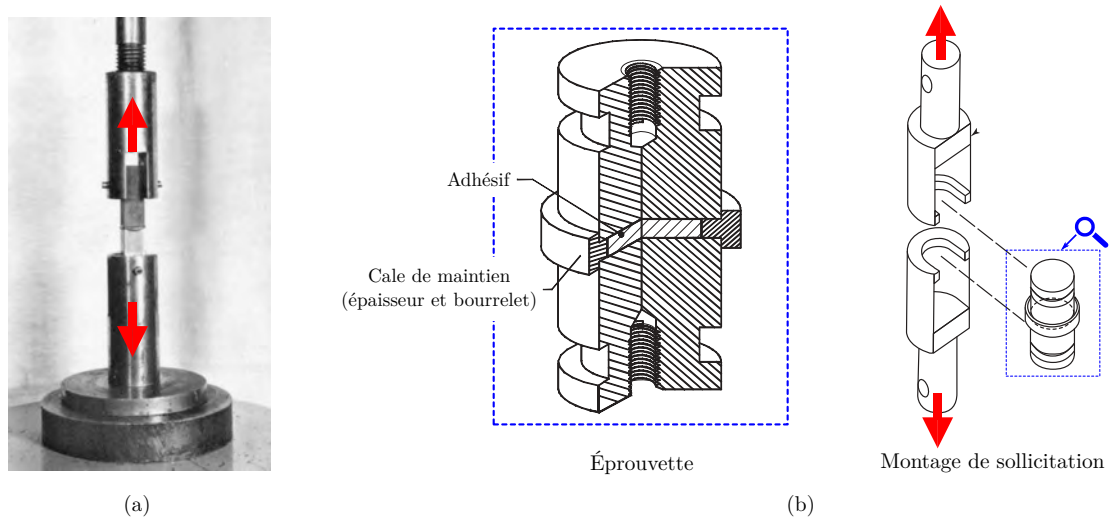


FIGURE 1.14 – Essais de type « *poker chip* » (a) Essai bout-à-bout classique, d'après [ASTM D2095, 2015]. (b) Essai bout-à-bout amélioré, adapté de [da Silva *et al.*, 2011].

Il existe des variantes des essais présentés afin de caractériser le comportement des adhésifs suivant des sollicitations combinées, généralement de traction-cisaillement. L'essai de traction-cisaillement sur éprouvettes biseautés [He *et al.*, 2010 ; Afendi *et al.*, 2011] en est un exemple.

Les essais présentés jusqu'à présent permettent de caractériser le comportement des adhésifs uniquement suivant des sollicitations unidirectionnelles. Or, les structures collées sont généralement soumises à des cas de chargement complexes qui peuvent évoluer au cours du temps. Afin de dimensionner ces structures, il est donc nécessaire de connaître l'enveloppe complète de réponse des adhésifs.

L'essai de traction-torsion non proportionnel sur des cylindres creux collés bout-à-bout utilisé par Schlimmer *et al.* dans [Schlimmer *et al.*, 2002], Mahnken dans [Mahnken, 2005] et plus récemment Arnaud *et al.* dans [Arnaud *et al.*, 2014] permet de caractériser le comportement d'adhésifs suivant des sollicitations mixtes. Cet essai, présenté sur la figure 1.15a, est qualifié de « non proportionnel ». Cette appellation vient du fait que le chargement tangentiel peut être dissocié du chargement normal. Il permet par conséquent d'extraire l'enveloppe de

réponse des adhésifs étudiés. Étant donné que la géométrie d'éprouvette utilisée est de type en bout-à-bout tubulaire, les mêmes difficultés que sur les essais de type *napkin ring* sont rencontrées. De même, ces essais nécessitent l'utilisation d'une machine de traction-torsion ainsi que d'une instrumentation relativement complexe.

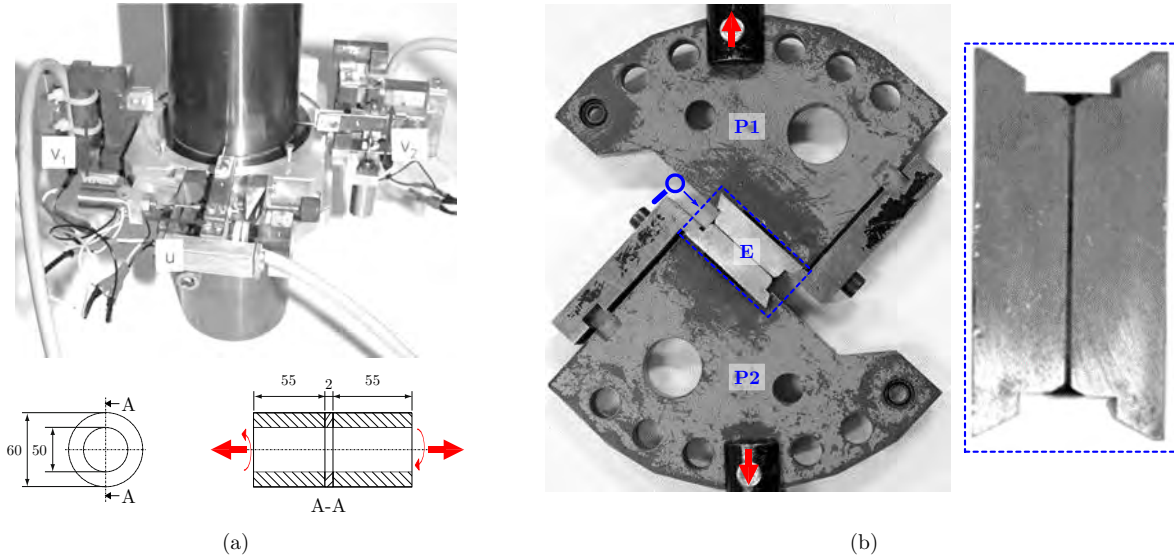
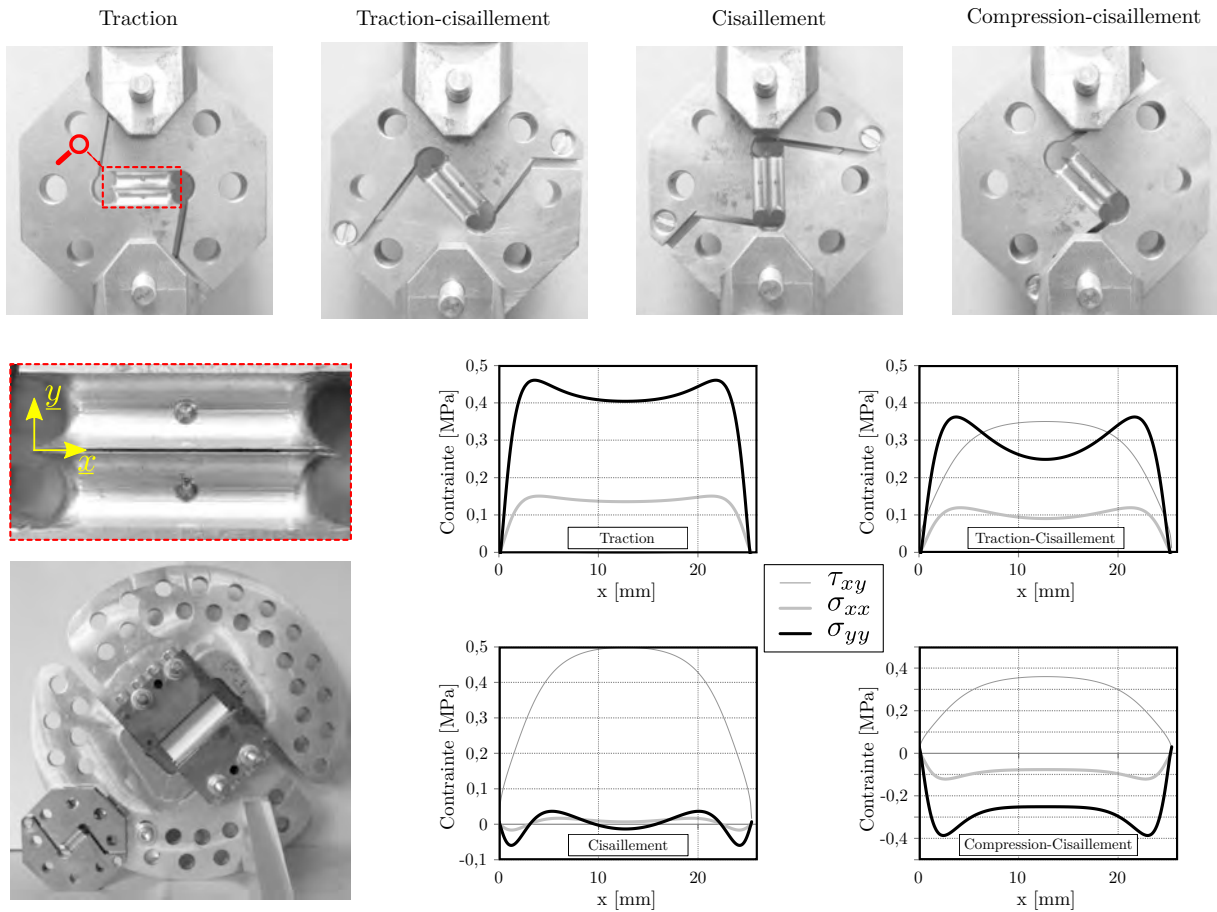
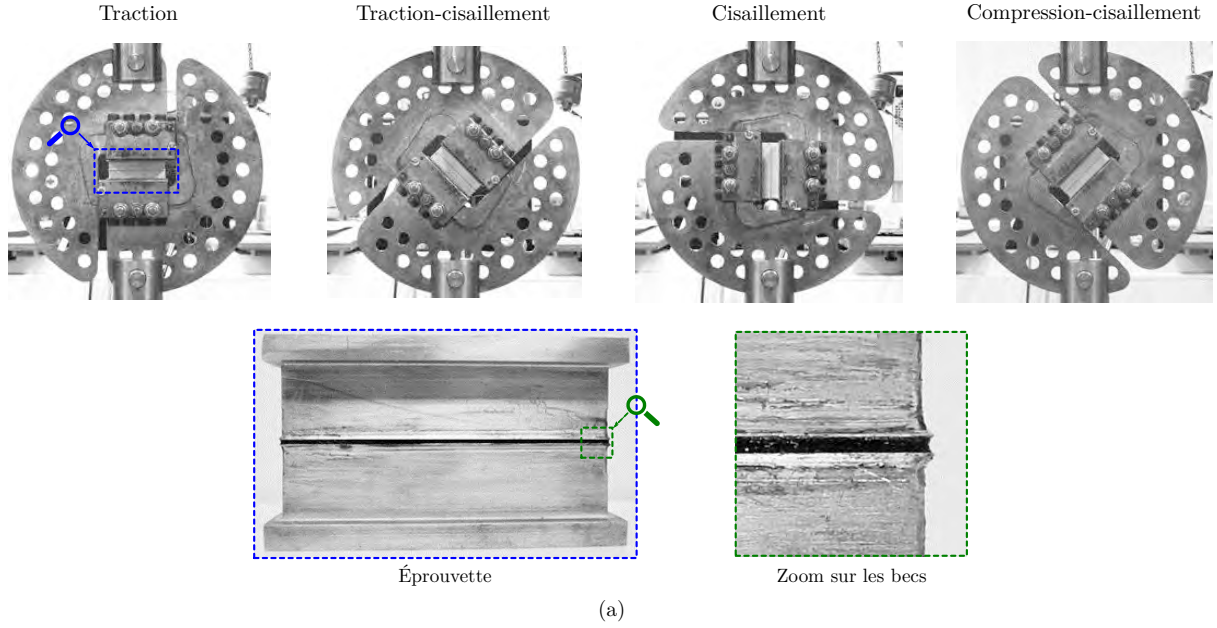


FIGURE 1.15 – (a) Essais de traction-torsion, d'après [Mahnken, 2005]. (b) Essai Arcan modifié par Gineste [Gineste, 1993].

L'essai Arcan modifié développé par Gineste [Gineste, 1993] sur la base des travaux d'Arcan [Arcan *et al.*, 1987] permet de caractériser le comportement d'adhésifs sous des sollicitations proportionnelles de traction-cisaillement. Le montage utilisé pour cet essai, présenté sur la figure 1.15b est composé de trois parties. L'éprouvette de géométrie papillon (notée « E » sur la figure 1.15b) est positionnée entre deux plaques à trous (notées « P1 » et « P2 »). En fonction de l'orientation dans la machine de traction, le montage permet de réaliser au choix un essai de traction, de cisaillement ou une combinaison de cinq sollicitations mixtes intermédiaires.

J.-Y. Cognard *et al.* ont développé une version modifiée de celui de Gineste [Cognard *et al.*, 2005 ; Cognard *et al.*, 2006 ; Cognard *et al.*, 2008] présentée sur la figure 1.16a. Le développement de ce montage a porté sur trois aspects. Le premier concerne le « prolongement » des deux plaques à trous afin de pouvoir tester les assemblages collés sous des sollicitations de compression-cisaillement. Le deuxième correspond à la modification du système de fixation ainsi que de la forme de l'éprouvette afin de prévenir l'apparition de pré-contraintes dans l'adhésif. Le dernier porte sur la distribution des contraintes dans l'adhésif. L'utilisation de substrats rigides ainsi que de becs usinés dans les substrats au niveau du joint de colle (voir 1.16a) permet d'assurer la quasi-uniformité du champ de contraintes dans l'adhésif et d'atténuer les effets de bords.

Davies *et al.* dans [Davies *et al.*, 2009] ont étudié expérimentalement et numériquement des joints époxy d'épaisseurs différentes (de 0,4 mm à 1,15 mm) avec ce montage. Les résultats expérimentaux en contrainte-déformation moyennes montrent peu d'influence de l'épaisseur sur la réponse élastique de l'adhésif. En revanche, une baisse plus ou moins significative des niveaux à rupture est observée avec l'augmentation de l'épaisseur s'expliquant



Distribution des contraintes dans le plan moyen de l'adhésif pour une sollicitation de 157N

(b)

FIGURE 1.16 – (a) Essai Arcan modifié par J.-Y. Cognard *et al.*, d'après [Cognard *et al.*, 2005]. (b) Essai Arcan TCS, d'après [Créac'hacdec *et al.*, 2015].

par l'apparition de nouvelles concentrations de contrainte. Afin de caractériser qualitativement des adhésifs avec ce dispositif, les auteurs recommandent de limiter l'épaisseur du joint à 0,6 mm et 0,8 mm pour respectivement des essais en traction pure et en traction-cisaillement/cisaillement pur.

L'Arcan modifié comporte également plusieurs inconvénients. La fabrication et la mise en œuvre des éprouvettes est relativement chronophage et onéreuse. En effet, il est nécessaire d'usiner les substrats, puis de les positionner dans un montage spécifique afin d'assurer leur positionnement relatif pendant le collage. De plus les éprouvettes doivent être montées, ajustées et démontées à chaque essai. Même si un dispositif de réglage est prévu à cet effet, cet essai est connu pour être sensible aux défauts d'alignement entre l'axe de sollicitation et l'éprouvette. Enfin, le montage complet pèse plusieurs kilogrammes ce qui rend sa manipulation compliquée.

Créac'hcadec *et al.* proposent dans [Créac'hcadec *et al.*, 2015 ; Créac'hcadec, 2014] une version miniaturisée et monobloc de l'éprouvette Arcan modifié par J.-Y. Cognard *et al.*. Celle-ci, présentée sur la figure 1.16b, est appelée Arcan TCS pour *Tensile/Compression-Shear test* ou μ Arcan. L'éprouvette est composée de deux substrats qui regroupent à la fois les fonctionnalités du montage Arcan et celles du montage dédié pour la réalisation du collage. En effet, quatre alésages ont été usinés sur chaque substrat afin de tester l'adhésif en traction, traction-cisaillement, cisaillement et compression-cisaillement. Un dispositif de mise en position, usiné dans les substrats et utilisant deux vis pour le maintien, permet de contrôler l'épaisseur de l'adhésif ainsi que l'orientation relative des deux substrats durant le collage. Il assure également une fonction secondaire qui est de protéger l'adhésif de chargements involontaires avant l'essai. De manière similaire aux éprouvettes de J.-Y. Cognard *et al.*, l'éprouvette μ Arcan intègre des becs rayonnés afin d'atténuer les concentrations de contraintes dans l'adhésif aux extrémités de la zone de recouvrement. Créac'hcadec *et al.* ont également montré dans [Créac'hcadec *et al.*, 2015] que l'utilisation d'un ratio $\beta = E_s/E_a$ inférieur à 50, correspondant au rapport du module d'Young des substrats sur celui de l'adhésif, permet de diminuer les effets de bords. Enfin, le montage peut-être réutilisé dans la mesure où les substrats ne se déforment pas de manière irréversible. Cependant, l'éprouvette étant monobloc, les dimensions de la zone de recouvrement ainsi que l'épaisseur de l'adhésif deviennent intrinsèques aux dimensions des substrats. Enfin, une étude éléments finis simplifiée (matériaux élastiques et hypothèse de contraintes planes) considérant des substrats en acier [Créac'hcadec *et al.*, 2015] a mis en évidence une distribution non uniforme du champ des contraintes dans le plan moyen de l'adhésif (cf. figure 1.16b). Les auteurs montrent dans cette même étude qu'il est possible de retrouver une distribution quasi-uniforme en diminuant la rigidité des substrats.

1.2.2 Les essais dynamiques

Avec l'augmentation de la vitesse de déformation, la réponse mécanique des adhésifs évolue généralement de ductile à fragile. Ce changement entraîne communément une augmentation des niveaux de charge à rupture mais également une diminution des énergies absorbées [Goglio, 2011]. C'est la raison pour laquelle les premiers essais dynamiques réalisés sur les adhésifs visent essentiellement à mesurer l'énergie nécessaire pour rompre une éprouvette massique ou collée.

Ces résultats n'étant pas suffisants pour caractériser le comportement mécanique, de nombreux autres essais ont été développés depuis. Ceux-ci utilisent généralement les mêmes éprouvettes que pour des sollicitations quasi-statiques mais diffèrent principalement sur le moyen expérimental de sollicitation utilisé : servo-vérins hydrauliques, machines pendulaires, tours de chute, machines hybrides spécifiques, etc. À chaque dispositif correspond une plage d'utilisation en terme de vitesse de sollicitation.

Vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ [s ⁻¹]	10⁻⁴ 10⁰ 10¹ 10² 10³ 10⁴						
Régime associé	Fluage	Quasi-statique	Dynamique				Impact
Phénomène étudié			Chutes d'appareils mobiles (téléphone, <i>etc.</i>) Crashes automobiles Impacts sur avion Applications militaire et spatiale				
Moyen expérimental	Machines d'essai conventionnelles Servo-vérins hydrauliques Machines pendulaires Tours de chute Barres d'Hopkinson Canons à gaz ou poudre Expanding ring, Flyer plate, <i>etc.</i>						
			Domaine étudié				

TABLEAU 1.2 – Relation entre les phénomènes étudiés, les vitesses de déformation associées et les moyens expérimentaux générant ces vitesses, d'après [Hamouda et Hashmi, 1998 ; Field *et al.*, 2004 ; Sato, 2011].

Les moyens expérimentaux en dynamique rapide sont communément comparés sur les vitesses de déformation qu'ils permettent de générer. Le tableau 1.2 dresse un comparatif des principaux dispositifs de sollicitation existants en dynamique. Ils sont classés en fonction des phénomènes étudiés et des vitesses de déformation qui leur sont associées. Ce tableau a été établi sur la base d'articles bibliographiques portant sur le sujet [Hamouda et Hashmi, 1998 ; Field *et al.*, 2004 ; Sato, 2011] et montre qu'aucun moyen d'essais ne permet de couvrir toute la gamme de vitesses.

Dans la suite du document, seuls les dispositifs de sollicitation permettant d'obtenir des vitesses de déformation comprises entre $10^1 s^{-1}$ et $10^3 s^{-1}$, associés aux phénomènes observés dans le domaine du transport, sont présentés. Il s'agit en particulier des machines pendulaires, des servo-vérins hydrauliques, des dispositifs à barres d'Hopkinson et des tours de chute.

Les machines pendulaires

Les machines pendulaires, ou mouton pendules, sont utilisées depuis de nombreuses années afin de caractériser la résistance à la rupture des matériaux dans des conditions de choc. Elles sont composées, au minimum, d'un pendule oscillant en liaison pivot avec un bâti fixe. Le pendule se termine généralement par un marteau qui sert d'impacteur. En fonction de la taille du dispositif et de la masse du marteau, il est possible d'obtenir des vitesses de sollicitation allant de 1 m.s^{-1} à 5 m.s^{-1} et des énergies d'impact comprises entre 0,5 J et 2000 J.

Les essais de flexion normalisés Charpy et Izod sont présentés sur la figure 1.17. Ils permettent de déterminer les capacités d'absorption d'énergie des métaux [ASTM E23, 2016] et plastiques [ASTM D256, 2010].

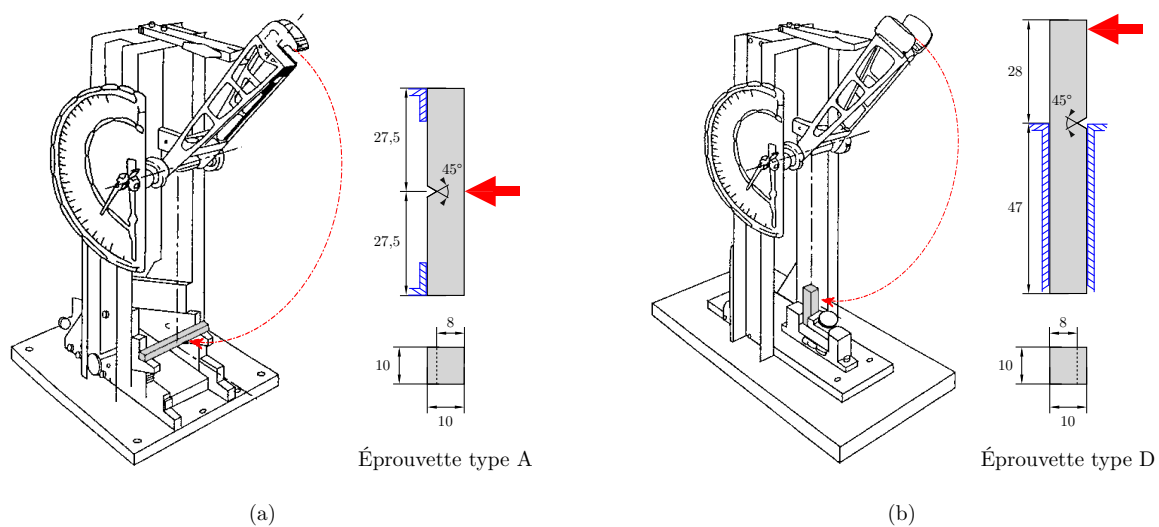


FIGURE 1.17 – Dispositif et éprouvette associés à l'essai de (a) Charpy et d'(b) Izod, d'après [ASTM E23, 2016 ; Sierakowski et Chaturvedi, 1997].

L'essai Charpy est un essai de flexion trois points alors que l'Izod est de type flexion encastrée. Dans les deux cas, les éprouvettes sont de section rectangulaire et comportent une entaille afin de créer une zone d'initiation à la rupture. L'énergie dissipée durant l'essai est calculée à partir de la masse du marteau et de la différence de hauteur mesurée entre la position du lâcher et la hauteur maximale atteinte par le marteau après la rupture de l'échantillon. Les principales difficultés liées à ces essais pour tester des éprouvettes massives résident dans l'interprétation des résultats [Adams et Harris, 1996]. Ils ne sont, de fait, pas recommandés.

L'ASTM *Block Impact Test* D950 [ASTM D950, 2011 ; ISO 6953, 1998] fait partie des premiers essais développés afin de caractériser le comportement mécanique dynamique d'assemblages collés en cisaillement simple. Il est toujours employé de nos jours et nécessite l'utilisation d'une machine pendulaire. La géométrie de l'éprouvette ainsi que le montage de maintien sont normalisés et illustrés sur la figure 1.18a. L'assemblage collé testé a une forme en « L ». Le montage de maintien permet d'encastrer le substrat inférieur. Le supérieur est libre et impacté sur l'une de ses extrémités par le marteau du mouton pendule.

Adams et Harris ont présenté une expertise numérique et expérimentale de cet essai dans

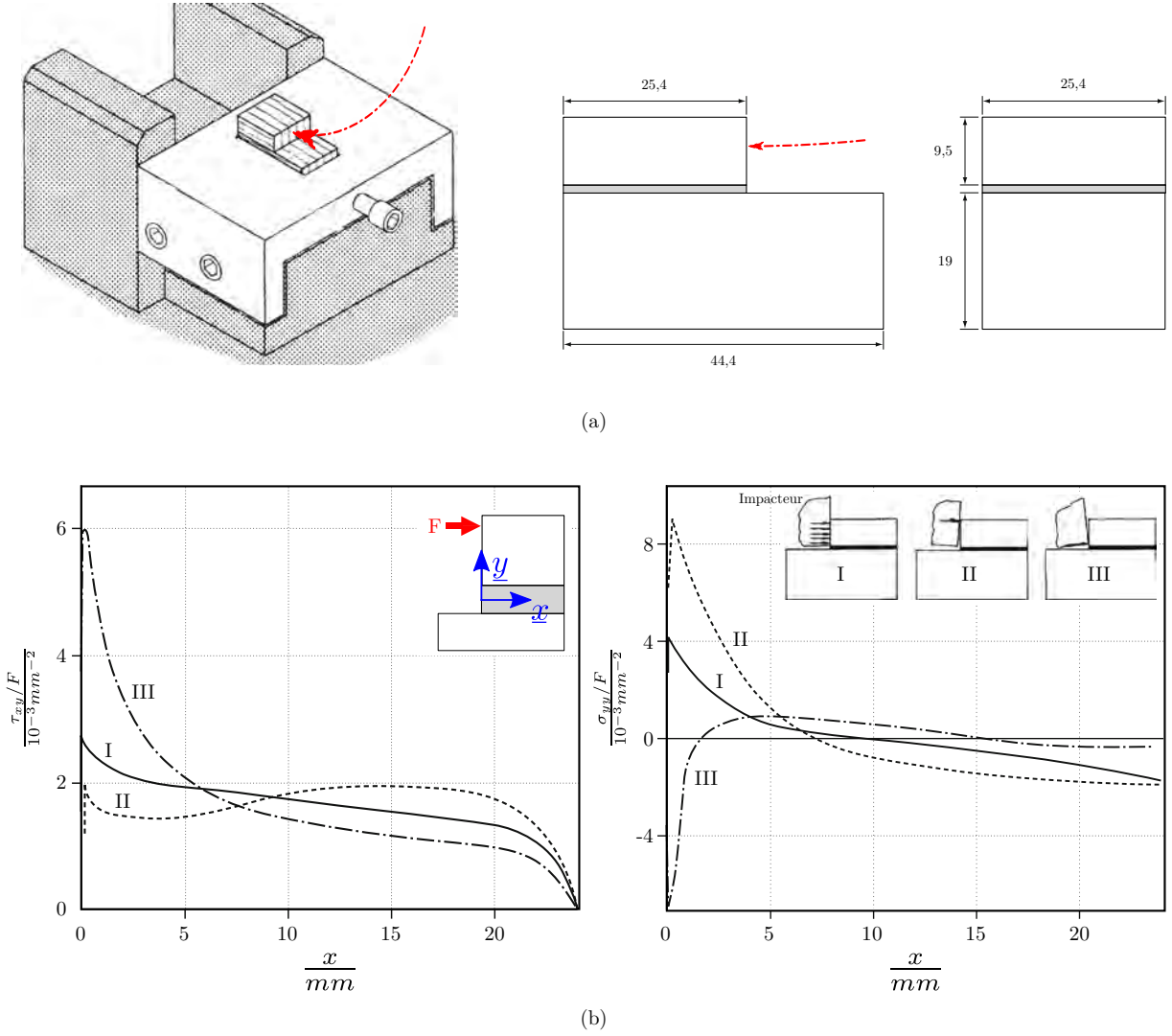


FIGURE 1.18 – ASTM *Block Impact Test* D950, (a) Montage et géométrie de l'éprouvette, d'après [ASTM D950, 2011]. (b) Influence des conditions de chargement sur la répartition des contraintes dans le plan moyen de l'adhésif, adapté de [Adams et Harris, 1996].

[Adams et Harris, 1996]. En particulier, ils ont analysé, *via* un modèle éléments finis, l'influence d'un défaut de parallélisme entre le bord du marteau et l'extrémité impactée de l'éprouvette sur la répartition des contraintes dans le plan moyen de l'adhésif. Les résultats sont présentés sur la figure 1.18b pour trois conditions de chargement, notées « I », « II » et « III ». Elles correspondent à une sollicitation sans défaut et aux deux conditions extrêmes de chargement pouvant être rencontrées. De cette étude, deux conclusions majeures ressortent :

1. La répartition des contraintes dans l'adhésif reste indéterminée. Elle est, en effet, fortement dépendante des conditions de chargement et des défauts associés (cf. figure 1.18b) ;
2. Les mesures d'effort à rupture ainsi que d'énergie absorbée ne peuvent être qualitativement exploitées. Elles montrent une dépendance vis-à-vis de la rigidité du montage de maintien.

Étant données les conclusions, Adams et Harris [Adams et Harris, 1996] ne recommandent

pas d'utiliser le *Block Impact Test* pour de la caractérisation.

Les mêmes auteurs proposent dans [Harris et Adams, 1985] un montage instrumenté permettant de tester des éprouvettes de type simple recouvrement ou massique sous un mouton pendule comportant un marteau en « U ». Ce montage est présenté sur la figure 1.19a.

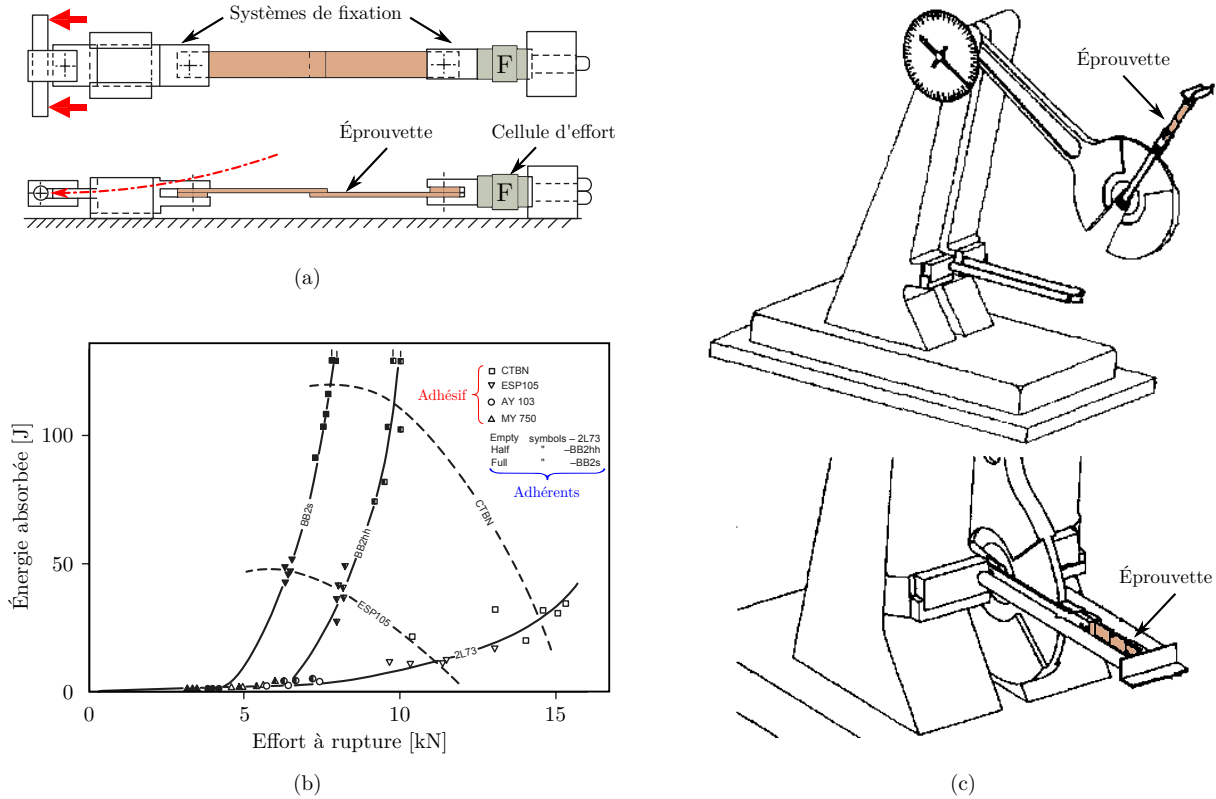


FIGURE 1.19 – Autres essais utilisant des pendules instrumentés. (a) Essai sur éprouvette simple recouvrement développé par Harris et Adams, adapté de [Harris et Adams, 1985]. (b) Résultats associés à l'essai (a), adapté de [Harris et Adams, 1985]. (c) Autre configuration pour tester des éprouvettes à recouvrement simple sous mouton pendule, adapté de [Sato et al., 1996].

Il est composé de 3 parties : une éprouvette maintenue par deux systèmes de fixation. Sur l'un des systèmes est connectée une cellule d'effort, elle-même reliée au bâti du pendule. Une tige servant d'enclume est fixée à l'extrémité du système opposé, libre de mouvement, afin de solliciter l'éprouvette. Durant l'essai, trois grandeurs physiques sont mesurées : l'énergie absorbée par l'éprouvette, l'effort par l'intermédiaire d'un capteur piézoélectrique et le déplacement de la tige de chargement *via* l'utilisation d'un accéléromètre ou d'un laser.

Des résultats obtenus par Harris et Adams [Harris et Adams, 1985] sur le dispositif avec des éprouvettes de type simple recouvrement sont présentés sur la figure 1.19b. Quatre adhésifs époxy (MY750, AY103, ESP105 et CTBN) ainsi que trois nuances d'aluminium (2L73, BB2hh et BB2s), ont été utilisés dans la fabrication des éprouvettes testées. Ces éléments ont des caractéristiques mécaniques différentes. Les résultats issus de cette étude montrent, qu'un même adhésif (*e.g.*, le CTBN qui est peu ductile) peut donner une résistance élevée en cisaillement et une énergie absorbée faible lorsqu'il est associé à un substrat rigide (*e.g.*, 2L73). Au contraire, il peut donner une résistance faible et une énergie absorbée élevée lors-

qu'il est associé à un substrat souple (*e.g.*, BB2s). Ces résultats s'expliquent par l'aspect « structure » de l'essai. En effet, la part de l'énergie absorbée par l'adhésif est faible en comparaison avec celle consommée par les substrats (en particulier, par la déformation plastique de ces derniers). L'essai est, de fait, intéressant pour une analyse « structure » mais ne permet en aucun cas de caractériser le comportement mécanique de l'adhésif.

De nombreuses variantes de cet essai ont été développées depuis. Par exemple, Satoh *et al.* dans [Satoh *et al.*, 1996] et Goglio et Rossetto dans [Goglio et Rossetto, 2008] utilisent un essai pendulaire où l'éprouvette est solidaire du marteau comme le montre la figure 1.19c.

Les servo-vérins hydrauliques

Un servo-vérin hydraulique est un système complet asservi. Il est composé d'un vérin double effet associé à une servovalve ainsi que de capteurs. L'utilisation de ce type de dispositif dans une machine de traction est intéressant pour des essais dynamiques. En effet, il permet de solliciter des éprouvettes avec un effort pouvant être supérieur à 50 kN et à des vitesses supérieures à 10 m.s⁻¹ [Deletombe *et al.*, 2015].

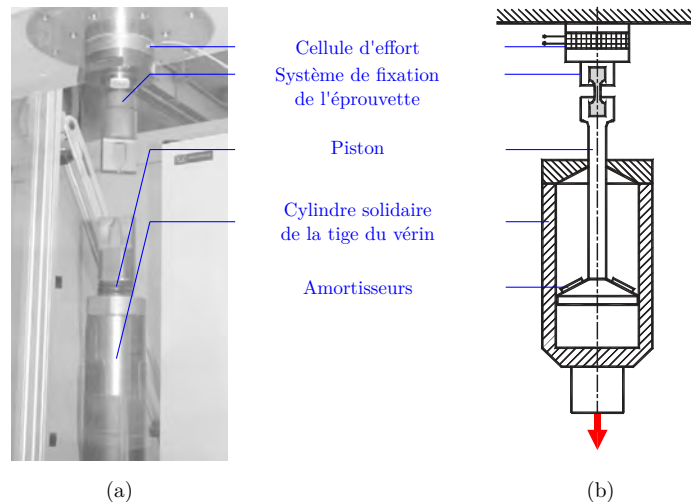


FIGURE 1.20 – Dispositif de sollicitation utilisé par Xiao, adapté de [Xiao, 2008]. (a) Photo du dispositif. (b) Principe de fonctionnement du montage de traction à vitesse stabilisée.

Néanmoins, l'utilisation de ce type de dispositif nécessite de prendre des précautions en ce qui concerne les aspects inertiels et vibratoires [Borsutzki *et al.*, 2003 ; Hill, 2004 ; Xiao, 2008]. En effet, les masses embarquées sur la tige du vérin diminuent sa « réactivité » et génèrent des efforts non négligeables lors des phases d'accélération. Dans l'état, ces effets inertiels ne permettent pas de charger l'éprouvette à des vitesses constantes et perturbent la mesure de l'effort. La réduction des masses embarquées passe essentiellement par le remplacement des mors classiques à mâchoires par des assemblages par obstacle de type chape ou autre. Il est également courant d'utiliser un dispositif spécifique tel que celui présenté sur la figure 1.20 afin de réaliser des essais à vitesse stabilisée. Ce montage est composé d'un piston solidaire du mors mobile de l'éprouvette. Il peut coulisser dans un cylindre solidaire de la tige du servo-vérin. Le chargement de l'éprouvette commence lorsque le piston est en fin de course *i.e.*, lorsque la phase d'accélération de la tige est terminée. Il a été montré, notamment par Béguelin [Béguelin, 1996], que l'utilisation d'un matériau amortissant entre

le piston et le fond du cylindre permet d'éviter l'apparition de phénomènes vibratoires.

Les servo-vérins hydrauliques servent généralement à tester des éprouvettes massives de type altère en traction telles que définies dans la norme ASTM D638 [ASTM D638, 2014 ; Al-Zubaidy *et al.*, 2013]. Néanmoins, leur utilisation peut être étendue aux essais sur assemblages collés.

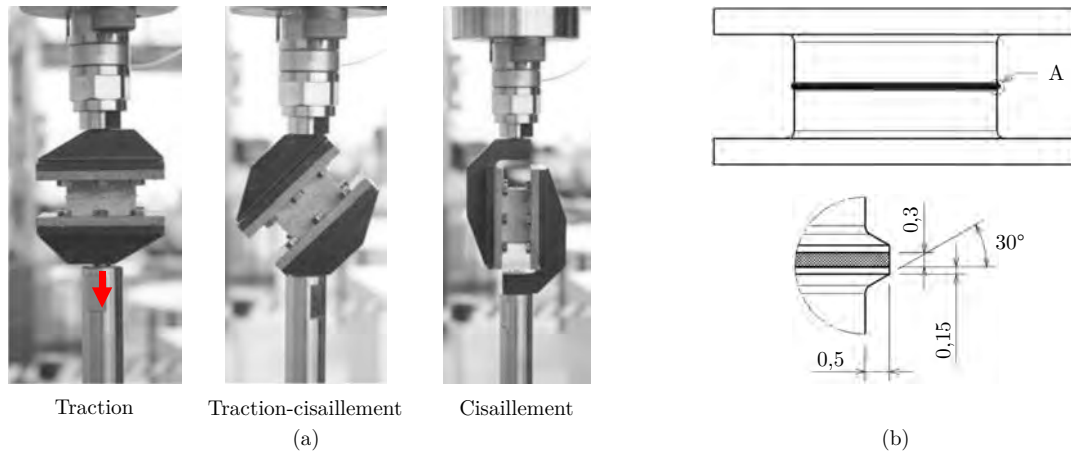


FIGURE 1.21 – Essai Arcan modifié par Dufour *et al.* [Dufour *et al.*, 2016]. (a) Configurations de chargement. (b) Géométrie de l'éprouvette.

Très récemment, Dufour *et al.* proposent dans [Dufour *et al.*, 2015b ; Dufour *et al.*, 2015a ; Dufour *et al.*, 2016] une version modifiée pour la dynamique de l'Arcan développée par J.-Y. Cognard *et al.* [Cognard *et al.*, 2005]. Comme le montre la figure 1.21a, ce montage est composé d'une éprouvette ainsi que de deux supports. Il permet de caractériser le comportement mécanique de l'adhésif suivant plusieurs directions de sollicitation. L'éprouvette utilisée dans cet essai est présentée sur la figure 1.21b. Des bords sont usinés dans les substrats au niveau des bords libres de la zone de recouvrement afin de limiter les effets de bords dans l'adhésif. La réalisation du collage nécessite l'utilisation d'un montage spécifique afin de contrôler l'épaisseur de l'adhésif et l'orientation relative des substrats. L'éprouvette est assemblée par boulonnage à des supports de formes variées qui sont eux mêmes fixés aux traverses de la machine de traction dynamique.

Ces travaux sont intéressants mais les publications actuelles associées à ce montage portent essentiellement sur le développement d'un modèle éléments finis. De fait, peu d'informations concernant par exemple, l'extraction des vitesses de déformation, la propagation des ondes dans le montage, l'influence des conditions de fixation sur la répartition des contraintes dans l'adhésif, etc. sont connues.

L'utilisation d'un *quick crusher* dans une machine servo-hydraulique constitue une autre méthode permettant de réaliser des essais dynamiques à des vitesses de sollicitation stabilisées. Les éprouvettes testées sont généralement de type en bout-à-bout ou de simple recouvrement [Schiel *et al.*, 2015]. Le principe de fonctionnement du montage est présenté sur la figure 1.22a. Le substrat supérieur est maintenu alors que le substrat inférieur est libre et positionné entre des mâchoires de serrage présentes sur la traverse mobile. Durant la phase d'accélération, les mâchoires de serrage sont maintenues écartées par le biais de deux cales en coin. Lorsque la vitesse de consigne est atteinte, les cales sont expulsées au contact

d'une butée ce qui provoque la « fermeture » des mâchoires sur le substrat inférieur. Afin d'éviter le glissement de l'éprouvette dans les mors de serrage, une attention particulière doit être portée au positionnement vertical des cales ainsi qu'au couple de serrage appliqué aux boulons précontraints. Le principal défaut de cet essai est lié aux phénomènes vibratoires qu'il génère. Plus particulièrement à leurs répercussions sur les signaux enregistrés au cours du temps. La figure 1.22c présente un exemple de courbe effort-temps bruitée obtenue avec ce dispositif [Schiel *et al.*, 2015]. Fréquemment, les données brutes sont filtrées numériquement, ce qui est peu conseillé car le comportement réel de l'essai est masqué.

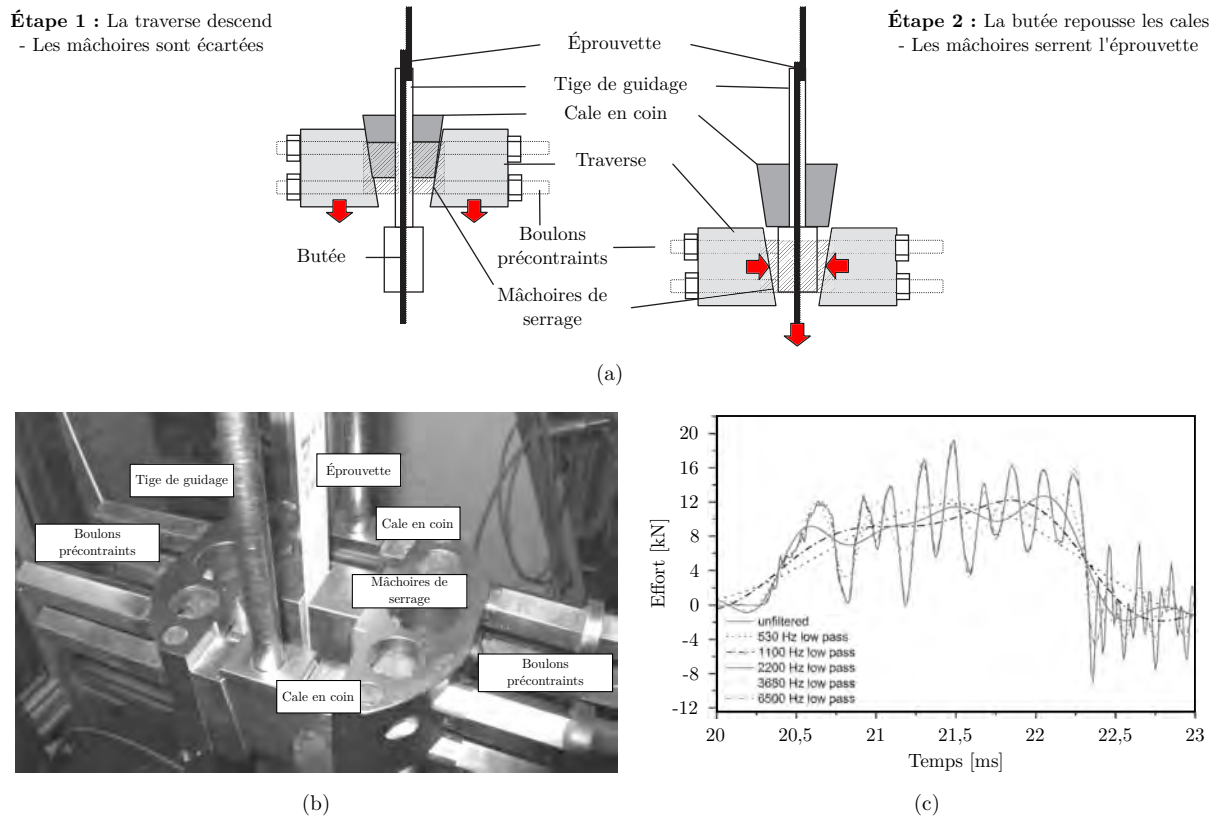


FIGURE 1.22 – Essai *quick crusher*, adapté de [Schiel *et al.*, 2015]. (a) Principe de fonctionnement. (b) Photo du dispositif. (c) Exemple de signal extrait.

Les dispositifs à barres d'Hopkinson

Les dispositifs à barres d'Hopkinson sont aujourd'hui les plus utilisés pour étudier le comportement dynamique des matériaux à moyenne et haute vitesse de déformation (entre 10^2 s^{-1} et 10^3 s^{-1}) [Adams, 2005]. Ces techniques utilisent le principe de base développé par Hopkinson [Hopkinson, 1914] pour l'étude d'explosion et d'impact de balles ; repris plus tard par Kolsky [Kolsky, 1949] afin de mesurer la réponse mécanique dynamique de matériaux en compression. De nos jours, plusieurs variantes de ces dispositifs existent. Elles permettent de caractériser le comportement d'éprouvettes massives ou *in situ* suivant des chargements purs ou combinés de traction, compression et cisaillement [Adams, 2005 ; Sato, 2008 ; da Silva *et al.*, 2011 ; da Silva *et al.*, 2012b]. Ces systèmes à barres peuvent être séparés en deux groupes : les systèmes à collision et les systèmes à stockage d'énergie.

Les systèmes à collision permettent uniquement de solliciter l'éprouvette en traction ou compression pure. Ils nécessitent l'utilisation d'un système de propulsion, généralement à air comprimé, d'un impacteur ou projectile et de deux longues barres de section identique. Ces éléments sont alignés sur un socle.

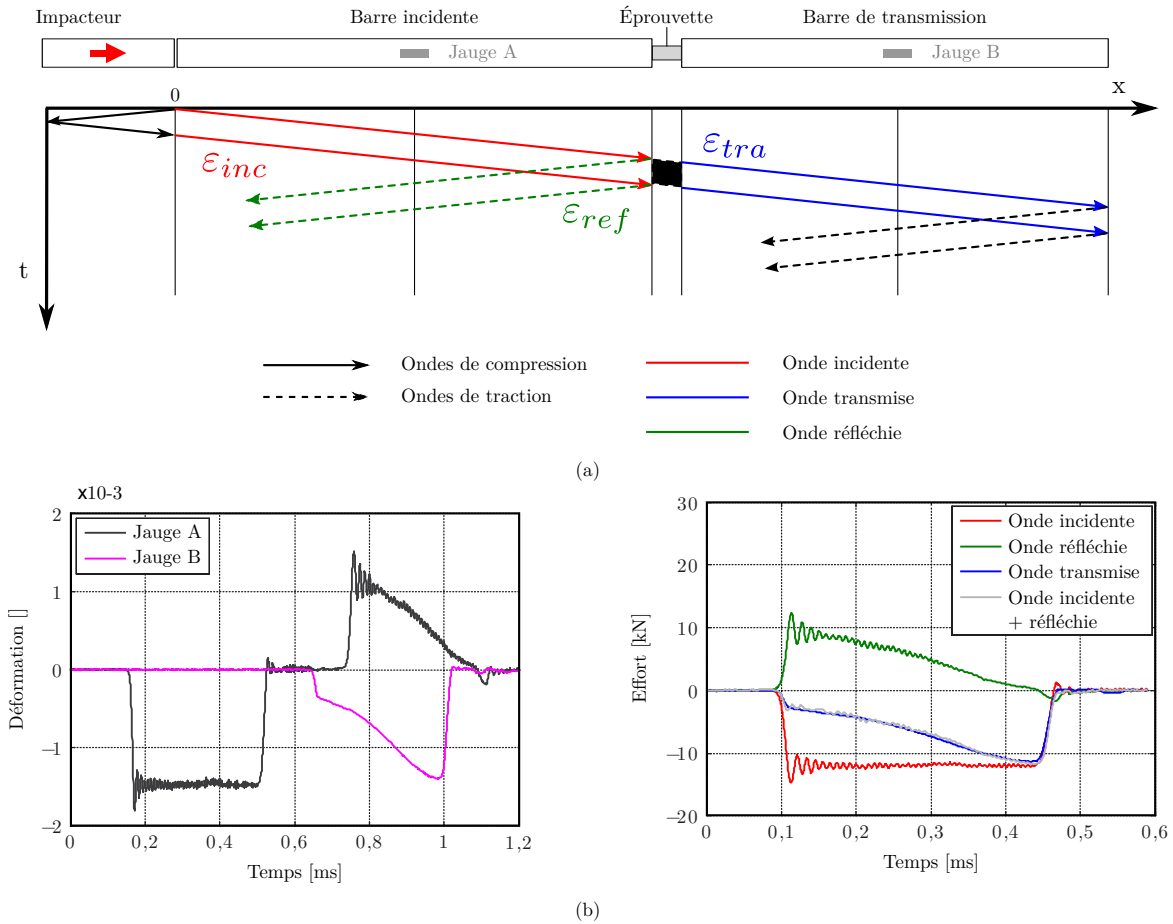


FIGURE 1.23 – Barres d'Hopkinson en compression. (a) Principe et diagramme Lagrangien associé. (b) Exemples de signaux acquis par les jauges, d'après [da Silva *et al.*, 2011].

Pour des essais de compression sur barres d'Hopkinson, la configuration indirecte, présentée sur la figure 1.23a, est généralement utilisée. Durant l'essai, un projectile expulsé d'un canon

vient impacter une première barre appelée « incidente ». Le choc crée alors une onde de compression. Elle se propage le long de la barre jusqu'à atteindre l'éprouvette. À l'interface barre/éprouvette, une partie de l'onde est transmise à l'éprouvette ainsi qu'à la deuxième barre appelée « de transmission ». L'autre est réfléchiée dans la barre incidente sous forme d'une onde de traction. L'ensemble de ces événements peut être représenté sous la forme d'un diagramme Lagrangien qui permet de voir la propagation des ondes dans les barres suivant une représentation position-temps (cf. figure 1.23a). Les barres incidente et de transmission sont généralement instrumentées de jauges de déformation orientées suivant la direction longitudinale. Elles permettent de mesurer les déformations liées aux ondes incidente ε_{inc} , transmise ε_{tra} et réfléchiée ε_{ref} . Un enregistrement classique associé à cette configuration est présenté sur la figure 1.23b. Ces données permettent de déterminer la courbe de comportement en contrainte-déformation dynamique de l'échantillon massique ou de géométrie simple [Kolsky, 1949].

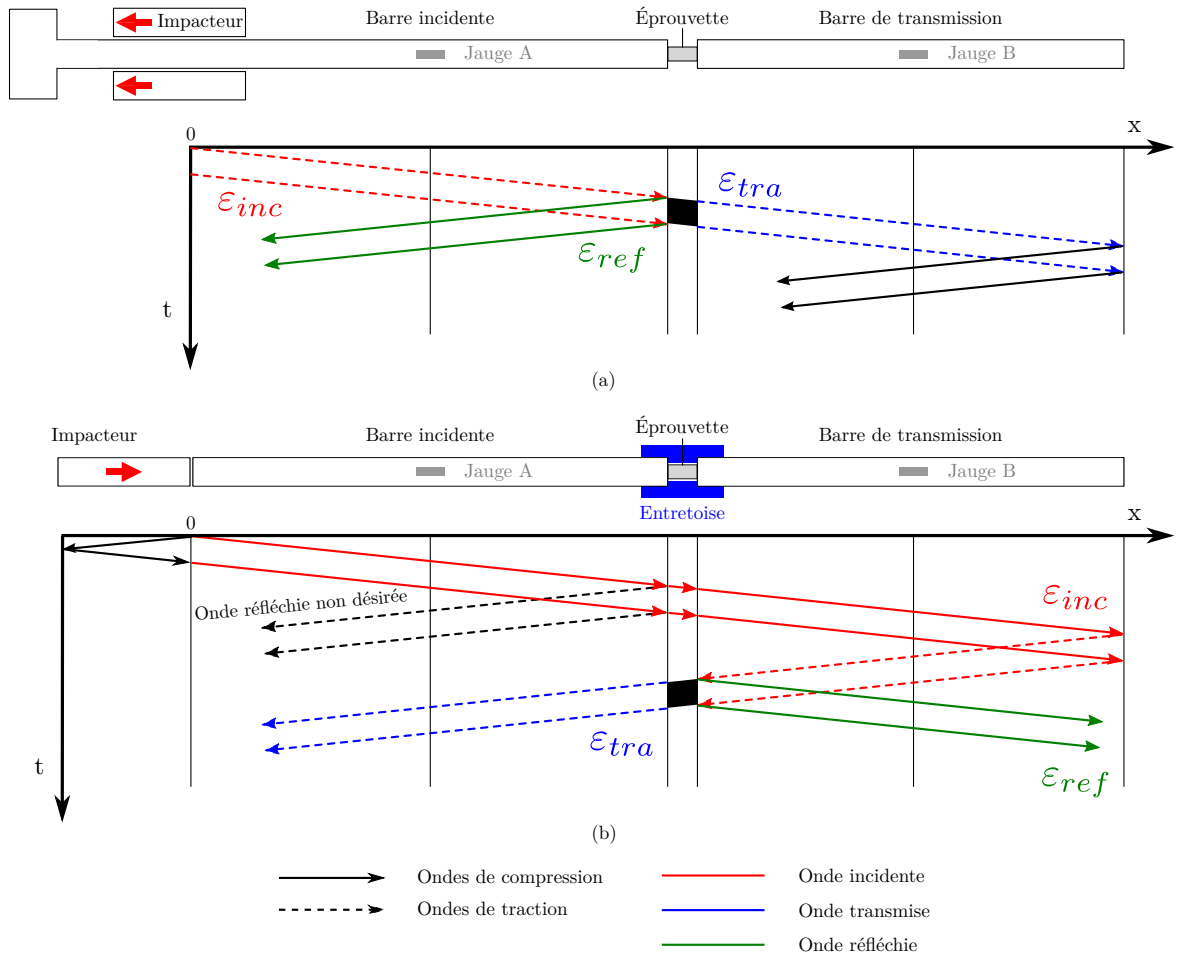


FIGURE 1.24 – Barres d'Hopkinson en traction (a) directe et (b) indirecte; principes et diagrammes Lagrangien associés.

Pour réaliser des essais de traction, un montage en compression modifié associé à une éprouvette en bout-à-bout spécifique peut être utilisé. Ce type de configuration a notamment été exploité par Yokoyama et Nakai dans [Yokoyama et Nakai, 2015]. Plus généralement, les dispositifs « classiques » à barres d'Hopkinson subissent des modifications afin de solliciter l'éprouvette avec des ondes de traction. Deux méthodes peuvent être employées : la traction

directe et indirecte. Dans le cas de la traction directe, le dispositif est modifié afin de générer une onde de traction dans la barre incidente (cf. figure 1.24a) [Gómez-del Río *et al.*, 2005a]. Le diagramme Lagrangien est alors identique à celui présenté sur la figure 1.23a mais les ondes de compression sont remplacées par des ondes de traction. Dans le cas de la traction indirecte, la réflexion de l'onde de compression en onde de traction est utilisée pour solliciter l'éprouvette [Goglio *et al.*, 2008]. La configuration présentée sur la figure 1.23a pour la compression peut alors être utilisée. Néanmoins, une entretoise fabriquée dans le même matériau que les barres doit être intercalée entre ces dernières *i.e.*, autour de l'éprouvette (figure 1.24b). Lors de l'essai, l'entretoise transmet l'onde de compression provenant de la barre incidente à la barre de transmission. Lorsque l'onde arrive à l'extrémité libre de la barre de transmission, elle est réfléchiée en une onde de traction. La barre de transmission devient alors incidente et la barre incidente devient de transmission. L'entretoise étant juste en contact avec les barres, l'éprouvette est alors sollicitée en traction. Ces essais étant appliqués aux colles, les éprouvettes caractérisées peuvent être massiques (généralement en forme de sablier) [Goglio *et al.*, 2008], en bout-à-bout [Yokoyama et Nakai, 2015] ou à simple recouvrement [Adamvalli et Parameswaran, 2008]. De même, la sollicitation étant liée à l'éloignement des barres, il est nécessaire d'utiliser un système de fixation d'éprouvette pour assurer la transmission de l'effort.

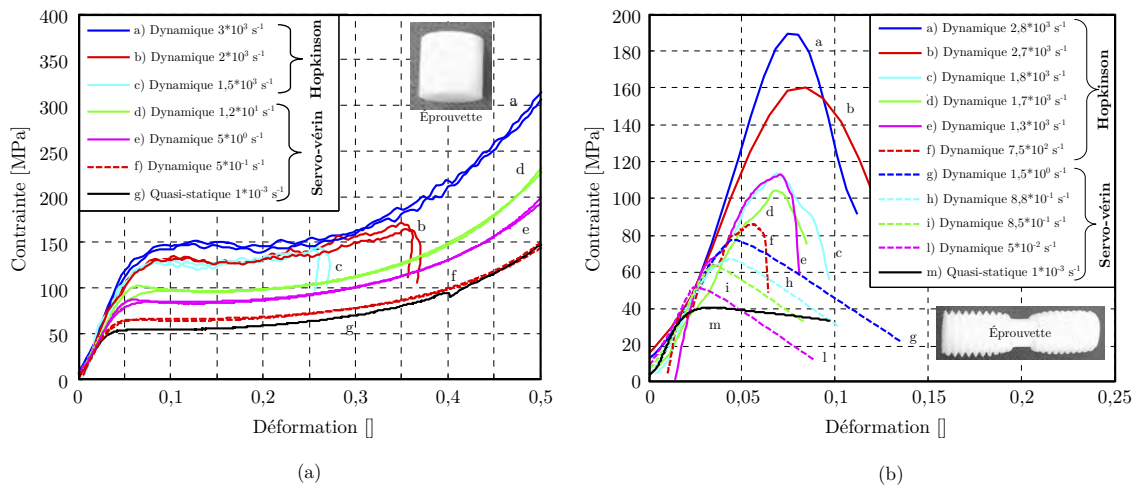


FIGURE 1.25 – Résultats en contrainte-déformation associés à la caractérisation dynamique d'un adhésif époxy sur des systèmes à collision en (a) compression et (b) traction, adapté de [Goglio *et al.*, 2008].

La figure 1.25 présente des courbes en contrainte-déformation issues de la caractérisation d'éprouvettes massiques fabriquées en adhésif époxy. Les résultats sont extraits en compression (figure 1.25a) et traction (figure 1.25a) indirectes. Dans ce cas précis, les vitesses de déformation atteintes dans l'adhésif vont de 750 s^{-1} à 2800 s^{-1} en traction et de 1500 s^{-1} à 3000 s^{-1} en cisaillement. Les résultats montrent une forte influence de la vitesse de déformation sur le comportement mécanique de la colle étudiée.

Les systèmes à stockage d'énergie permettent de solliciter l'éprouvette en traction, compression et torsion, ou une combinaison de ces cas de chargement simples. Contrairement aux systèmes à collision, ils ne disposent ni d'impacteur ni de système de propulsion. Ces derniers sont en effet remplacés par un ou plusieurs actionneurs hydrauliques ainsi que par

un système de serrage composé de mors. Lors de l'essai, une partie de la barre incidente est isolée par l'intermédiaire du dispositif de serrage en position fermé. Cette portion est ensuite préchargée par le biais d'un actionneur hydraulique. Elle devient alors un dispositif de stockage d'énergie élastique. L'écartement soudain des mors du dispositif de serrage permet de transférer cette énergie à l'éprouvette *via* une onde de sollicitation. L'ouverture du dispositif de serrage est généralement obtenue *via* la rupture d'un fusible mécanique. Cette solution permet d'éviter une mauvaise transformation de l'énergie de déformation en onde de sollicitation [da Silva *et al.*, 2012a]. Même s'il est possible de générer une onde de compression avec ce type de dispositif, l'utilisation d'un système à collision est préférable. En effet, il est difficile de précharger la portion de stockage en compression sans la faire flamber. La figure 1.26a présente un dispositif à stockage d'énergie utilisé par Sato et Ikegami [Sato et Ikegami, 1999] afin de caractériser des éprouvettes collées en bout-à-bout (cf. figure 1.26b). Le montage est positionné verticalement. Il utilise deux actionneurs hydrauliques asservis indépendamment afin de générer des ondes de traction et torsion. La figure 1.26c présente un exemple d'enveloppe de réponse mécanique d'un adhésif époxy extraite par l'intermédiaire de ce dispositif expérimental. Il convient de noter que ce montage comporte un inconvénient majeur sur les sollicitations mixtes de traction-cisaillement. En effet, la différence de vitesse de propagation d'une onde de traction/compression et de torsion ne permet pas de charger l'adhésif de manière proportionnelle [Sato et Ikegami, 1999].

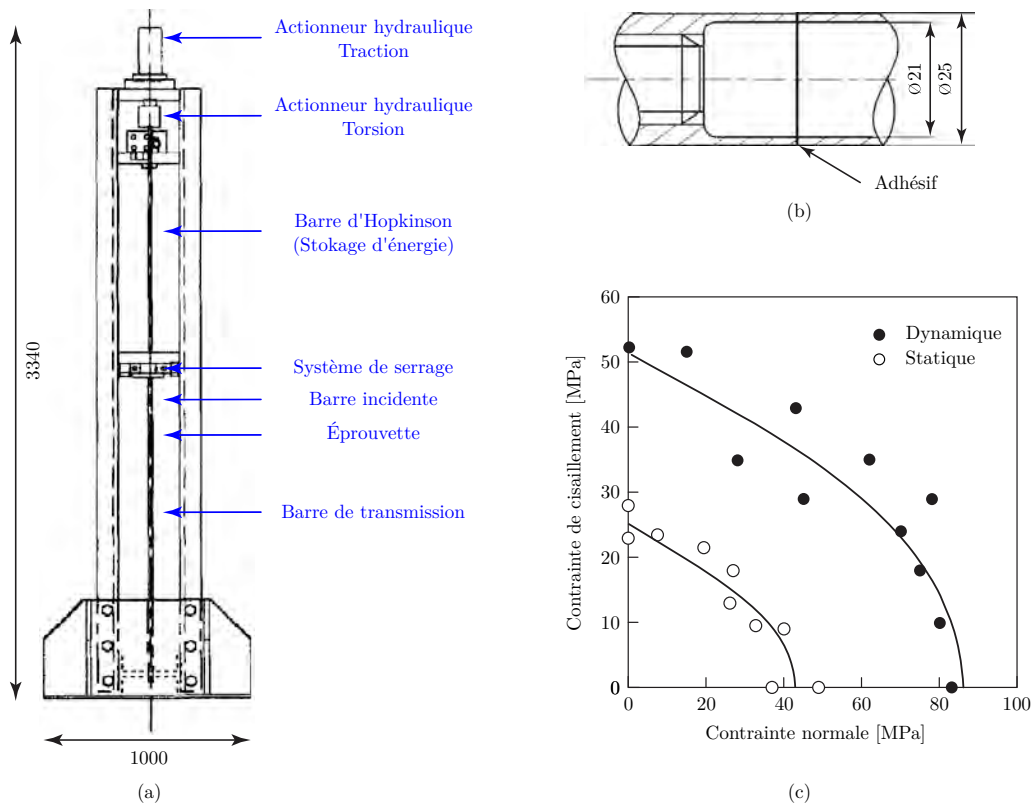


FIGURE 1.26 – Exemple de dispositif à stockage d'énergie, adapté de [Sato et Ikegami, 1999]. (a) Principe. (b) Éprouvette en bout-à-bout utilisée. (c) Enveloppe de réponse de l'éprouvette dans le plan de Mohr.

Les dispositifs à masse tombante

Les dispositifs à masse tombante sont des moyens simples et peu onéreux permettant de solliciter des éprouvettes en dynamique. Ils sont généralement composés d'un bâti en forme de tour, d'un dispositif de fixation de l'éprouvette et d'un système permettant de guider la masse lors de sa chute. La masse tombante comporte sur sa partie inférieure un impacteur pouvant avoir une forme particulière (hémisphérique, plate, etc.).

Durant l'essai, la masse est levée jusqu'à une certaine hauteur pour emmagasiner de l'énergie potentielle de pesanteur. Elle est ensuite lâchée, ce qui provoque sa chute puis l'impact lors du contact avec l'éprouvette. Du fait de la conservation de l'énergie, la vitesse maximale atteinte par la masse avant l'impact est essentiellement dépendante de la hauteur de chute (très souvent, l'impacteur frotte avec des éléments de guidage). Celle-ci est de l'ordre de 5 m.s^{-1} à 7 m.s^{-1} pour des hauteurs de chute de 1,2 m et 2,5 m avec des dispositifs classiques. Elle peut atteindre des vitesses supérieures à 20 m.s^{-1} pour des dispositifs accélérés, l'apport étant obtenu par l'intermédiaire de systèmes additionnels de stockage d'énergie tels que des ressorts [Galliot, 2007 ; Gómez-del Río *et al.*, 2005b]. L'énergie cinétique amenée par l'impacteur à l'éprouvette est dépendante de la masse du poids tombant ainsi que de sa vitesse. Le pilotage en masse/hauteur de l'essai permet donc d'adapter la vitesse et l'énergie de sollicitation.

Dans le cadre du collage, ces dispositifs sont communément utilisés pour tester des éprouvettes *in situ*. Généralement, ces dernières sont à simple recouvrement et sollicitées en flexion trois points ou en traction.

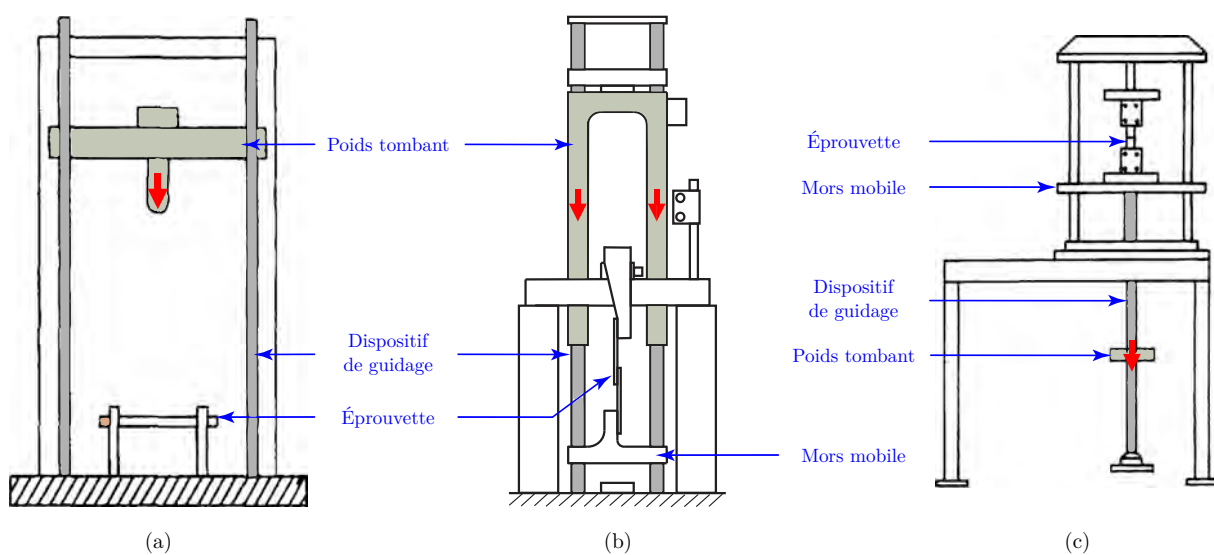


FIGURE 1.27 – Exemples de dispositifs à masse tombante. (a) Essai de flexion trois points, adapté de [Pang *et al.*, 1995]. Essais de traction, (b) adapté de [Galliot *et al.*, 2012], (c) adapté de [Beevers et Ellis, 1984].

Les essais de flexion trois points dynamiques servent généralement à valider des modèles analytiques [Pang *et al.*, 1995] ou numériques [Vaidya *et al.*, 2006]. Le principe de cet essai appliqué à des éprouvettes à simple recouvrement est présenté sur la figure 1.27a. L'échantillon est positionné sur deux appuis linéaires rectilignes qui forment les deux premiers points de contact. L'impacteur de forme hémisphérique est le troisième point. Il percute l'éprou-

vette en son centre générant sa flexion.

Les tours de chute sont également utilisées pour solliciter des éprouvettes en traction dynamique. Des modifications concernant la forme de l'impacteur ou la conception d'une machine spécifique sont cependant nécessaires afin de transformer la chute de la masse en une sollicitation de traction.

Par exemple, Galliot *et al.* dans [Galliot, 2007 ; Galliot *et al.*, 2012] ont utilisé un impacteur en forme de « U » inversé afin de solliciter des éprouvettes à simple recouvrement. Ce dispositif d'essai est présenté sur la figure 1.27b. La partie supérieure de l'éprouvette est maintenue par un mors fixe alors que la partie inférieure l'est par un mors mobile en liaison glissière avec le bâti. La forme spécifique du poids tombant permet de contourner l'éprouvette ainsi que son système de fixation et d'impacter le mors mobile.

Beevers et Ellis dans [Beevers et Ellis, 1984] ont utilisé un dispositif spécifique, présenté sur la figure 1.27c, afin de solliciter le même type d'éprouvette. Un système similaire a également été développé par Sawa *et al.* [Sawa *et al.*, 2003] afin de tester des éprouvettes cylindriques collées en bout-à-bout. Contrairement aux montages de traction « classiques » le système de fixation de l'éprouvette est au-dessus de l'impacteur. La masse tombante est percée en son centre et en liaison pivot glissant avec une longue barre. Celle-ci est fixée au mors mobile en son extrémité supérieure et se termine par une butée. Durant l'essai, la masse chute le long de la barre puis impacte la butée. Le choc génère une onde de traction qui remonte jusqu'à l'éprouvette provoquant la rupture de l'échantillon.

L'utilisation d'une masse en chute libre pour solliciter une éprouvette présente toutefois un inconvénient : le poids tombant a tendance à rebondir sur la partie impactée générant ainsi un train d'ondes parasite. Afin de pallier cela, certains dispositifs possèdent un système anti-rebond [Gómez-del Río *et al.*, 2005b].

1.3 Conclusions

Dans ce premier chapitre, le collage structural et ses spécificités ont été introduits. Cette démarche bibliographique a permis de positionner le problème de recherche et de définir ses limites.

Un état de l'art des principales méthodes expérimentales existantes permettant de caractériser le comportement mécanique des adhésifs sous chargements quasi-statique et dynamique, a ensuite été présenté. Cette étude a permis d'identifier une éprouvette ainsi qu'un dispositif d'essai dynamique pouvant être adapté pour la caractérisation dynamique d'adhésifs.

Quel que soit le régime de sollicitation, l'adhésif peut être caractérisé de deux manières différentes : soit de manière massique, soit dans un assemblage. Dans le premier cas, les essais associés permettent uniquement d'extraire les propriétés mécaniques intrinsèques du matériau. Or, dans sa condition d'utilisation, l'adhésif est dans un assemblage, c'est-à-dire entre plusieurs substrats auquel il adhère et se comporte différemment d'un adhésif seul. Par conséquent, la caractérisation d'un adhésif doit être *in situ*.

Afin d'extraire des propriétés mécaniques exploitables de l'adhésif, le dispositif d'essai comprenant l'éprouvette doit générer un champ de contraintes le plus uniforme possible dans le joint de colle. L'utilisation de substrats minces, même si elle permet de reproduire géométriquement la plupart des assemblages rencontrés dans l'industrie, génère des distributions des contraintes non uniformes. Des substrats rigides, *i.e.* qui se déforment peu par rapport à l'adhésif, permettent de pallier ce problème. En revanche, ils génèrent des concentrations de contraintes au niveau des bords libres de l'adhésif appelées « effets de bords ». Ces singularités sont liées à un fort gradient de rigidité existant entre l'adhésif et les substrats et peuvent générer la rupture prématurée de l'assemblage. Il a été montré que l'utilisation de substrats rigides en association avec des bords usinés au niveau des interfaces adhérents/adhésif permet de diminuer ces effets indésirables.

Durant leur période d'utilisation, les assemblages collés peuvent être sollicités mécaniquement de manière complexe, par exemple durant un accident. Par conséquent, la caractérisation mécanique des adhésifs dans un assemblage doit porter sur l'enveloppe complète de réponse.

D'un point de vue dynamique, l'éprouvette utilisée pour la caractérisation doit être légère et de préférence monobloc. L'objectif est de diminuer les effets inertiels et de limiter les réflexions d'ondes liées aux interfaces.

À ce stade, seule l'éprouvette Arcan TCS développée par Créac'hcadec *et al.* [Créac'hcadec *et al.*, 2015] regroupe l'ensemble de ces points.

Le choix du moyen d'essais en dynamique porte essentiellement sur la plage de vitesses de déformation visée. Dans le cadre de la thèse, le dispositif développé doit caractériser des colles pour des applications liées au secteur du transport. Les vitesses de déformation souhaitées sont donc comprises entre 10^1 s^{-1} et 10^3 s^{-1} . Parmi les moyens classiques existant, les dispositifs à barres d'Hopkinson peuvent être écartés. En effet, ils permettent seulement de travailler à des vitesses de déformation supérieures à 500 s^{-1} . Les dispositifs qui semblent les plus adaptés sont donc les machines pendulaires, les servo-vérins hydrauliques et les dispositifs à masse tombante. En comparaison avec le reste, les machines pendulaires ont une

plage d'utilisation plus limitée. De plus, la trajectoire du pendule ne permet pas d'obtenir une sollicitation de traction pure de l'éprouvette.

Dans les moyens restants, les dispositifs à masse tombante sont intéressants. Ils sont simples à mettre en œuvre, peu onéreux et amènent beaucoup de flexibilité dans le choix des conditions initiales d'essais, *i.e.* des conditions de chute et du dispositif de maintien de l'éprouvette.

Afin d'évaluer la possibilité d'étendre l'utilisation de l'éprouvette Arcan TCS à la sollicitation dynamique, il apparaît nécessaire de réaliser une étude prospective sous tour de chute.

CHAPITRE 2

Étude prospective

Résumé

Ce chapitre est dédié à l'étude, à la fois expérimentale et numérique, de l'utilisation de l'éprouvette Arcan TCS sous une tour de chute.

Un dispositif de sollicitation de type « double cadre » existant au laboratoire est utilisé pour la réalisation des essais expérimentaux. L'influence de la hauteur de chute et de la masse de l'impacteur sur le comportement dynamique de l'essai est étudiée.

Les résultats issus de cette analyse préliminaire montrent que la géométrie Arcan peut être adaptée à la caractérisation dynamique des adhésifs. L'utilisation d'un impacteur de masse importante est néanmoins essentielle pour produire un chargement stable et uniforme de l'adhésif au cours de l'essai.

Finalement, l'éprouvette originale doit être étendue à la sollicitation dynamique et un dispositif spécifique de traction doit être développé.

Sommaire

2.1	Présentation & objectifs de l'étude	44
2.2	Étude expérimentale	44
2.2.1	Présentation du dispositif expérimental	44
2.2.2	Résultats	52
2.3	Étude éléments finis	58
2.3.1	Présentation du modèle éléments finis	58
2.3.2	Résultats	59
2.4	Conclusions	66

2.1 Présentation & objectifs de l'étude

Les travaux présentés dans ce second chapitre portent sur l'extension de l'utilisation de l'éprouvette Arcan TCS sous une tour de chute. Une étude prospective à la fois expérimentale et numérique a été réalisée. Elle a pour objectif de déterminer si la combinaison éprouvette Arcan TCS/dispositif à masse tombante permet d'identifier le comportement mécanique d'un adhésif sous sollicitations dynamiques combinées et de définir l'influence des conditions initiales sur le comportement dynamique de l'essai. L'analyse des résultats permettra d'établir des guides de conception pour le développement d'un moyen d'essais dédié à la caractérisation dynamique des adhésifs.

2.2 Étude expérimentale

2.2.1 Présentation du dispositif expérimental

Éprouvette & mise en œuvre

L'éprouvette Arcan TCS utilisée pour l'étude expérimentale est présentée sur la figure 2.1a. Le plan de définition associé est disponible en annexe A.

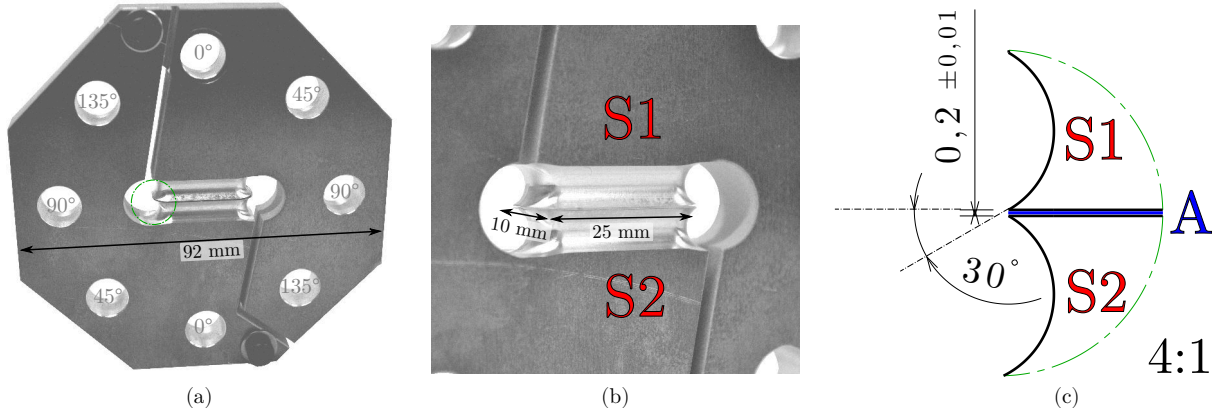


FIGURE 2.1 – (a) Éprouvette Arcan TCS. (b) Zoom sur les becs. (c) Géométrie locale permettant d'atténuer les « effets de bords »

Elle est de forme octogonale, de largeur égale à 92 mm et comporte une zone de recouvrement de 25 mm de long par 10 mm de large et 0,2 mm d'épaisseur. Les substrats, notés « S1 » et « S2 » sur les figures 2.1b & c, sont fabriqués en alliage d'aluminium EN 2017A-T451. Le module d'Young et le coefficient de Poisson mesurés de ce matériau sont $E_s = 73$ GPa et $\nu_s = 0,37$. Un adhésif époxyde bicomposant Huntsman™ Araldite® 420 A/B (noté « A » sur la figure 2.1c), étudiée par Créac'hcadec *et al.* dans [Créac'hcadec *et al.*, 2015], va servir de support à cette pré-étude. Le module d'Young et le coefficient de Poisson donnés par le fabricant sont $E_a = 1,495$ GPa et $\nu_a = 0,34$ [Huntsman, 2000 ; Huntsman, 2009]. Le choix du matériau composant les substrats dérive du choix de l'adhésif. Il permet en effet d'obtenir un ratio $\beta = E_s/E_a$ inférieur à 50. Des becs rayonnés formant un angle de 30° avec la zone de recouvrement ont été usinés avec précision dans les substrats (cf. figure 2.1). Au final, l'éprouvette collée pèse environ 170 g.

Avant d'assembler les deux adhérents, les surfaces à encoller ont été poncées avec du papier abrasif de grain 120, dégraissées à l'acétone puis nettoyées à l'air sec. Une fois la colle étalée, les substrats ont été fixés *via* deux vis rectifiées. Cette opération permet de maîtriser leur orientation relative ainsi que l'épaisseur du joint de colle. Enfin, des cotons tiges ont été utilisés afin de nettoyer les bords libres et les becs.

Le cycle de cuisson employé pour la polymérisation de l'adhésif est le suivant : $T = 40^\circ\text{C}$ pendant $t = 16\text{ h}$.

Les deux vis de positionnement assurent également la protection de l'adhésif. Elles sont retirées juste avant l'essai.

Les conditions aux limites sont appliquées dans deux alésages diamétralement opposés par rapport au centre de l'adhésif. Chaque substrat est composé de quatre alésages définis par leur orientation par rapport à la direction de chargement noté γ . $\gamma = 0^\circ$ correspond à un chargement de traction pure (cf. figure 2.1a) ; $\gamma = 45^\circ$ à de la traction-cisaillement, $\gamma = 90^\circ$ à du cisaillement pur et $\gamma = 135^\circ$ à de la compression-cisaillement.

Moyens d'essais

La campagne expérimentale a été réalisée en utilisant plusieurs moyens d'essais quasi-statique et dynamiques. Quel que soit le dispositif de sollicitation, l'éprouvette a été montée dans un « double cadre » développé par Aubry *et al.* [Aubry, 2013]. Le montage est présenté sur la figure 2.2. Il est composé de deux cadres en liaison glissière. Le premier est fixe et relié au bâti du dispositif d'essais tandis que le second est mobile. L'éprouvette est positionnée et maintenue entre les deux cadres par deux liaisons linéaires annulaires. Elles sont réalisées par deux assemblages à chapes et goupilles. Il convient de noter que ces conditions aux limites sont essentielles car elles permettent d'éviter de surcontraindre le joint de colle. Finalement, l'éloignement les deux axes des pivots est obtenu par le rapprochement des cadres.

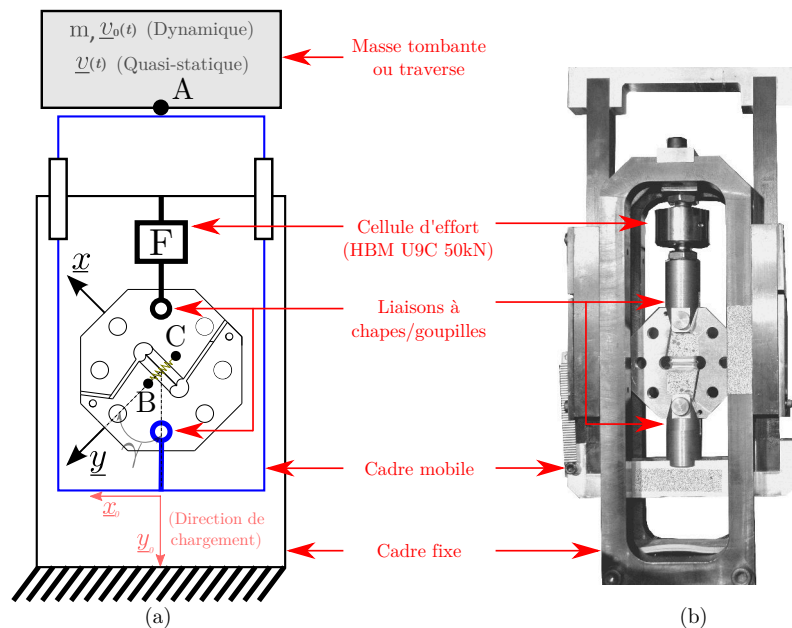


FIGURE 2.2 – (a) Schéma et (b) photo du « double cadre ».

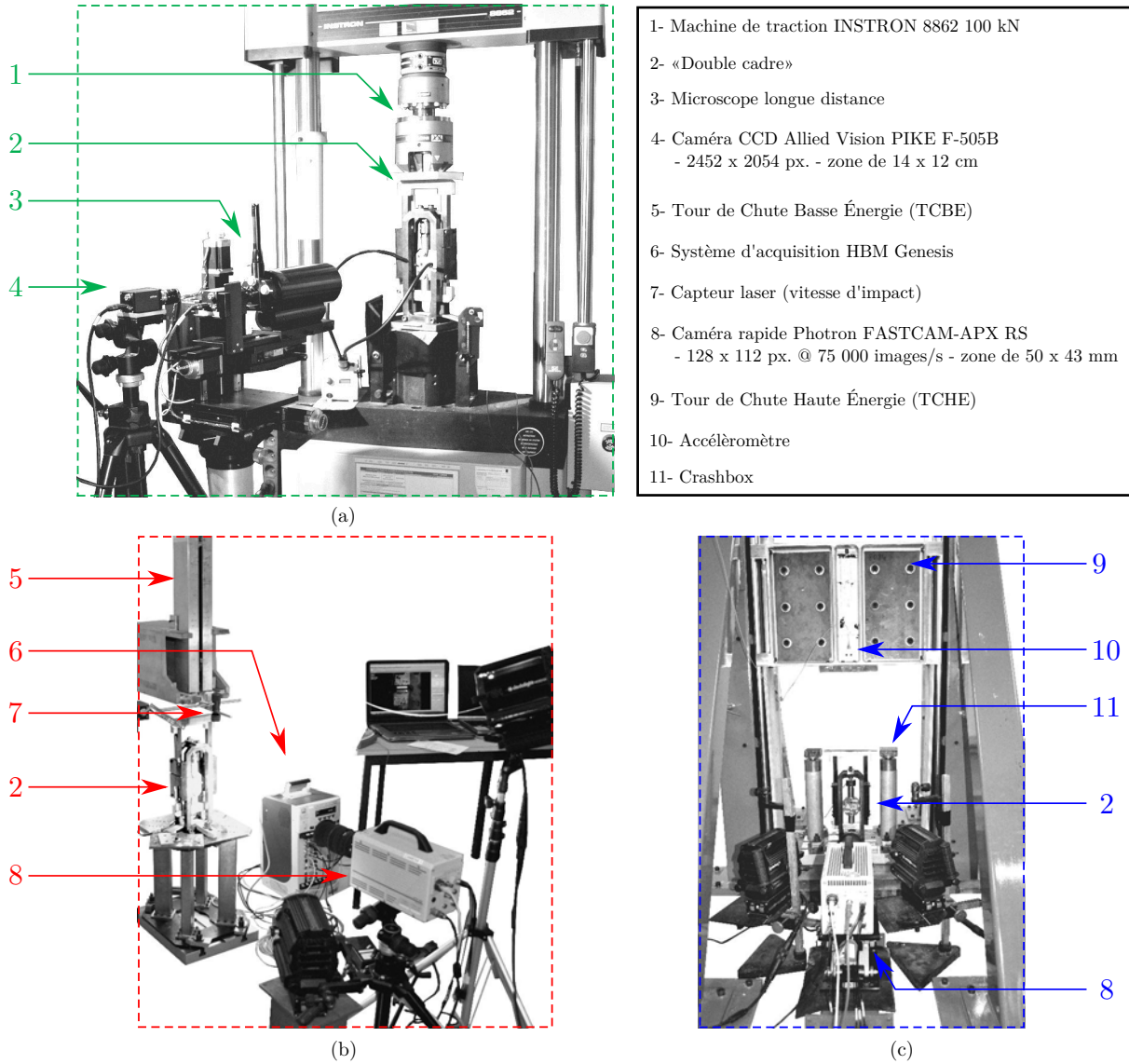


FIGURE 2.3 – Dispositifs d'essais expérimentaux. (a) Machine de traction. (b) Tour de chute « basse énergie ». (c) Tour de chute « haute énergie ».

Pour les essais quasi-statiques, le double cadre est positionné sous la traverse d'une machine de traction Instron® de 100 kN (cf. figure 2.3a). Le pilotage est réalisé par la vitesse de déplacement de la traverse v .

Pour les essais dynamiques, le double cadre est positionné sous une tour de chute. Le pilotage est réalisé par le couple vitesse initiale v_0 /énergie cinétique E_c . La vitesse de chute v de la masse dérive de la hauteur de lâché h : $v = \sqrt{2gh}$, où g est l'accélération de la pesanteur. L'énergie cinétique de l'impacteur dépend de la vitesse de chute de l'impacteur et de sa masse : $E_c = \frac{1}{2}mv^2$. Deux tours de chute ont été utilisées afin d'analyser l'influence des conditions initiales d'essai sur le comportement mécanique de l'éprouvette. Une tour de chute « basse énergie » permet de lâcher un impacteur de masse inférieure à 8 kg jusqu'à 6 m de hauteur (cf. figure 2.3b). Une tour de chute « haute énergie » permet de lâcher un impacteur de masse inférieure à 230 kg jusqu'à 6 m de hauteur (cf. figure 2.3c).

Trois quantités physiques sont mesurées durant les essais :

1. La vitesse de chargement v , *i.e.* la vitesse d'impact v_0 pour les essais dynamiques.
2. Les champs de déplacement de chaque substrat.
3. L'effort résultant F .

Elles permettent d'extraire en particulier :

1. Les déplacements relatifs des substrats.
2. Les vitesses de déformation moyennes de l'adhésif.
3. Les efforts moyens normal et tangentiel à l'adhésif.

Mesure de la vitesse de chargement

La vitesse de chargement est mesurée au point de contact entre la traverse (ou l'impacteur) et le cadre mobile. Elle est calculée à partir du déplacement de la traverse en quasi-statique et mesurée par l'intermédiaire d'un capteur laser ou *via* un accéléromètre en dynamique (cf. figures 2.3b & c).

Extraction des déplacements dans l'éprouvette Arcan TCS

Les champs de déplacement sont extraits par corrélation d'images numériques autour des points notés « Sup » et « Inf » sur la figure 2.4a.

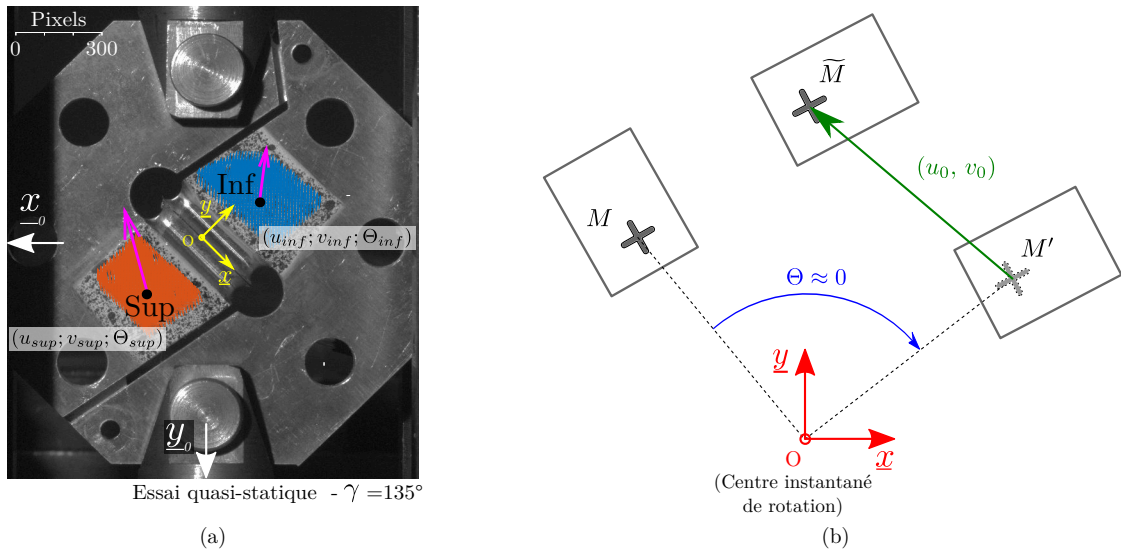


FIGURE 2.4 – (a) Extraction des déplacements des substrats par corrélation d'images numériques. (b) Décomposition du mouvement d'un point.

Pour les essais quasi-statiques, une caméra CCD Allied Vision[®] PIKE F-505B filmant une zone de 14 cm par 12 cm avec une résolution de 2452 pixels par 2054 pixels à 10 Hz est utilisée (cf. figures 2.3a). Pour les essais dynamiques, une caméra rapide Photron[®] FASTCAM-APX RS filmant une zone de 50 mm par 43 mm avec une résolution de 128 pixels par 112 pixels à 75 kHz est utilisée (cf. figures 2.3b & c). La taille du mouchetis dépend des conditions

de mesure. Deux mouchetis de tailles différentes ont été utilisés : le premier pour les essais quasi-statiques et le second pour les essais dynamiques.

Un algorithme de minimisation au sens des moindres carrés permet d'extraire les mouvements de corps rigides de chacun des substrats. Il a été mis en place par J.-Y. Cognard *et al.* dans [Cognard *et al.*, 2006] et repose sur deux hypothèses :

1. Les substrats sont considérés comme des solides rigides indéformables.
2. Les rotations de corps rigides restent faibles.

Pour le besoin des analyses, deux repères orthonormés sont employés (cf. figure 2.4) :

1. $(O, \underline{x}_0, \underline{y}_0)$ est associé au double cadre. Le chargement vertical résultant de la chute de l'impacteur est orienté suivant la direction $\underline{y}_0$ associée à la force gravitationnelle.
2. $(O, \underline{x}, \underline{y})$ est associée à l'éprouvette et aligné avec l'adhésif. $\underline{y}$ est orienté suivant l'épaisseur alors que $\underline{x}$ se rapporte à la direction de recouvrement.

L'angle entre les deux repères est $\gamma = (\underline{y}_0, \underline{y}) = (\underline{x}_0, \underline{x})$.

La méthode d'extraction des déplacements de corps rigides se base sur la décomposition du mouvement (cf. figure 2.4b). Soit M un point de coordonnées (x_M, y_M) , exprimé dans $\mathcal{B}(O, \underline{x}, \underline{y})$, appartenant à un des substrats à l'instant t_0 . Durant l'essai, ce point va se déplacer en M' suivant une composante liée à la rotation Θ du substrat puis en $\widetilde{M}$ suivant une composante liée aux translations de corps rigides $(u_0, v_0)_{\mathcal{B}}$. De fait, le déplacement $\underline{MM} = (u_R, v_R)_{\mathcal{B}}$ vaut :

$$\begin{aligned} \underline{MM} &= \underline{MM'} + \underline{M'\widetilde{M}} = \underline{OM'} - \underline{OM} + \underline{M'\widetilde{M}} \\ \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta \\ \sin \Theta & \cos \Theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \end{bmatrix}_{\mathcal{B}} - \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \end{bmatrix}_{\mathcal{B}} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix}_{\mathcal{B}} &\simeq \begin{bmatrix} u_0 - \Theta y_M \\ v_0 - \Theta x_M \end{bmatrix}_{\mathcal{B}} \quad \text{si } \Theta \approx 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

Dans l'état, il n'est pas possible d'extraire $\{u_0, v_0, \Theta\}$ de l'équation (2.1).

Si durant l'essai, les déplacements $(u_{Mi}, v_{Mi})_{\mathcal{B}}$ de chaque point $M_i(x_{Mi}, y_{Mi})_{\mathcal{B}}$ sont extraits pour N pixels de la zone d'analyse, il est alors possible d'approximer la solution par la minimisation des différences entre les valeurs modélisées des déplacements (u_{Ri}, v_{Ri}) et les valeurs mesurées (u_{Mi}, v_{Mi}) :

$$\text{Minimisation de : } \sum_{i=1}^N \left\{ (u_{Ri} - u_{Mi})^2 + (v_{Ri} - v_{Mi})^2 \right\}_{\mathcal{B}} \quad (2.2)$$

Ce qui revient à résoudre le système linéaire suivant à chaque instant t :

$$\begin{bmatrix} N & 0 & -\sum(y_i) \\ 0 & N & \sum(x_i) \\ -\sum(y_i) & \sum(x_i) & \sum(x_i)^2 + \sum(y_i)^2 \end{bmatrix}_{\mathcal{B}} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ \Theta \end{bmatrix}_{\mathcal{B}} = \begin{bmatrix} \sum(u_i) \\ \sum(v_i) \\ \sum(x_i v_i) - \sum(y_i u_i) \end{bmatrix}_{\mathcal{B}} \quad (2.3)$$

Les solutions de ce problème sont une translation dans le plan $(\underline{x}; \underline{y})$ et une rotation de corps rigide autour de $\underline{z}$, par substrat. Elles sont notées $\{u_{inf}, v_{inf}, \Theta_{inf}\}$ et $\{u_{sup}, v_{sup}, \Theta_{sup}\}$ sur la figure 2.4a. Le terme $\Delta\Theta_z = \Theta_{inf} - \Theta_{sup}$ correspond à la rotation relative des deux substrats.

Les déplacements de corps rigides sont ensuite utilisés afin de calculer une estimation des déplacements $(u_j, v_j)_{\mathcal{B}}$, $j = \{0, 1, 2, 3\}$ des quatre extrémités de l'adhésif notées $P_0(x_0, y_0)_{\mathcal{B}}$ et $P_1(x_1, y_1)_{\mathcal{B}}$ pour le substrat inférieur et $P_2(x_2, y_2)_{\mathcal{B}}$ et $P_3(x_3, y_3)_{\mathcal{B}}$ pour le substrat supérieur. Pour cela, l'hypothèse des substrats rigides indéformables et le transport des petits déplacements sont exploités :

$$\begin{bmatrix} u_j \\ v_j \end{bmatrix}_{\mathcal{B}} = \begin{bmatrix} u_{inf} - y_j \Theta_{inf} \\ v_{inf} + x_j \Theta_{inf} \end{bmatrix}_{\mathcal{B}}, j = \{0, 1\} \quad (2.4)$$

et :

$$\begin{bmatrix} u_j \\ v_j \end{bmatrix}_{\mathcal{B}} = \begin{bmatrix} u_{sup} - y_j \Theta_{sup} \\ v_{sup} + x_j \Theta_{sup} \end{bmatrix}_{\mathcal{B}}, j = \{2, 3\} \quad (2.5)$$

Les déplacements relatifs moyens normal DN et tangentiel DT sont calculés à partir l'équation (2.6) suivante :

$$\begin{bmatrix} DN \\ DT \end{bmatrix}_{\mathcal{B}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (u_0 + u_1) - (u_2 + u_3) \\ (v_0 + v_1) - (v_2 + v_3) \end{bmatrix}_{\mathcal{B}} \quad (2.6)$$

Ils correspondent à la différence des moyennes des déplacements des extrémités inférieures et supérieures de l'adhésif.

Extraction des vitesses de déformation

Les vitesses de déformation $\dot{\epsilon}$ calculées et utilisées dans cette section correspondent à des valeurs moyennes temporelles telles que : $\dot{\epsilon} = \langle \dot{DN} \rangle_t / e$ en traction et $\dot{\epsilon} = \langle \dot{DT} \rangle_t / 2e$ en cisaillement. $e = 0,2 \text{ mm}$ est l'épaisseur de l'adhésif. $\langle \dot{DN} \rangle_t / e$ et $\langle \dot{DT} \rangle_t / 2e$ correspondent aux valeurs moyennes des vitesses de déformation normale et tangentielle obtenues par régressions linéaires de $DN(t)/e$ et $DT(t)/2e$ sur la partie quasi-linéaire des courbes (associée à la partie élastique du comportement de l'adhésif étudié).

Extraction des efforts

La mesure de l'effort résultant est réalisée au plus près du joint de colle *via* une cellule d'effort HBM[®] U9C de 50 kN fixée entre le cadre fixe et le substrat supérieur. Afin de vérifier la pertinence de cette mesure, deux études ont été menées.

Un modèle éléments finis a été développé pour comparer la somme des efforts extraits des nœuds situés dans le plan moyen de l'adhésif $\sum F_{adh}$ à l'effort résultant mesuré par la cellule F_{cell} durant l'essai projetés suivant la direction de chargement $\underline{y}_0$ (cf. figure 2.5a). L'étude a été réalisée par l'intermédiaire du logiciel Abaqus[®], en posant des hypothèses de contraintes planes et de loi de comportement purement élastique. Des éléments solides 2D triangulaires et quadrilatéraux à intégration réduite (CPS3R et CPS4R [Abaqus, 2012]) ont été utilisés pour mailler l'éprouvette. Les conditions aux limites ont été appliquées dans les deux alésages définis par leur orientation γ . Elles sont établies de manière à respecter la cinématique réelle du montage. Le pilotage des essais numériques a été réalisé par l'intermédiaire d'un couple vitesse initiale/masse ponctuelle imposé dans l'un des alésages. Étant donnée la nature de l'étude, ces deux paramètres peuvent être fixés arbitrairement. La solution éléments finis a été obtenue par calcul en dynamique/explicite.

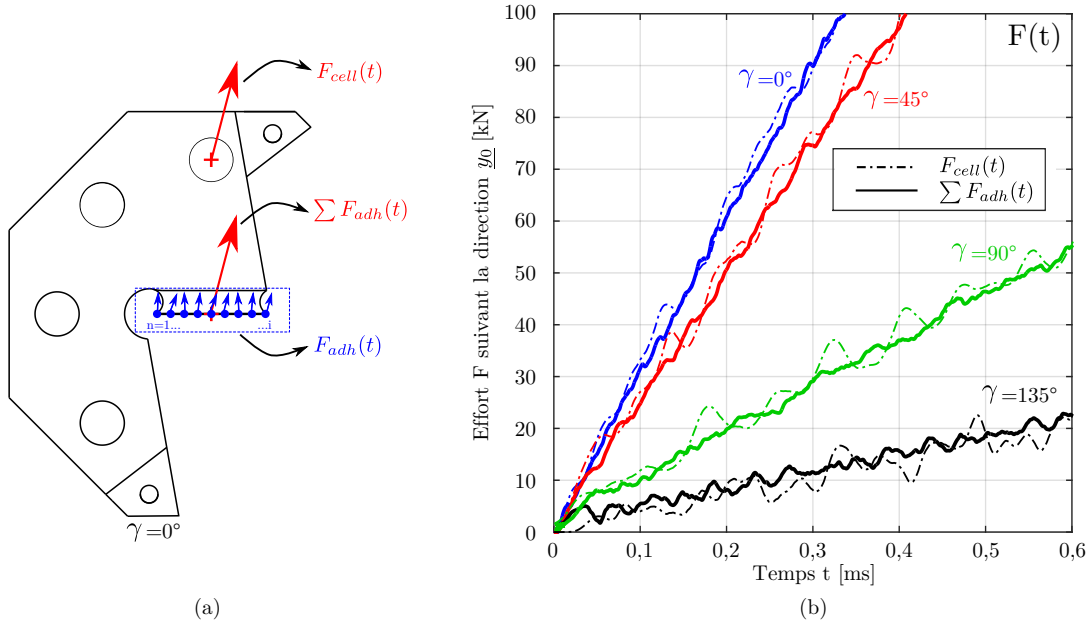


FIGURE 2.5 – Influence numérique de la position de la mesure de l'effort. (a) Position des mesures. (b) Résultats obtenus pour les quatre cas de chargement.

Les résultats extraits de cette analyse numérique sont présentés sur la figure 2.5b. Ils sont obtenus pour les quatre cas de chargement, pour une vitesse initiale d'impact de 2 m.s^{-1} et une masse ponctuelle de 200 kg. Les courbes $\sum F_{adh}(t)$ et $F_{cell}(t)$ ne montrent aucune différence majeure en amplitude et un léger décalage en temps qui correspond à la durée que met l'onde de sollicitation pour passer de l'adhésif à la cellule.

Expérimentalement, certaines éprouvettes ont été instrumentées de jauges de déformation collées sur le substrat supérieur (cf. figure 2.6a). Elles ont été positionnées sur les chemins d'effort et orientées suivant les directions principales. Ces données ont été fournies par un modèle éléments finis.

La figure 2.6b présente un comparatif des signaux provenant des jauges ainsi que de la cellule d'effort. Ils ont été enregistrés à une fréquence d'acquisition de 1 MHz pour les quatre chargements. Mis à part un décalage en temps, les deux types de capteur présentent les mêmes évolutions du signal au cours du temps.

Ces deux études démontrent que le substrat supérieur n'induit pas d'effets inertiels significatifs pouvant perturber la mesure de l'effort. Par conséquent, la charge vue par la cellule d'effort est représentative de celle vue par l'adhésif. Les efforts normal F_N et tangentiel F_T sont calculés en projetant la charge mesurée par la cellule dans un repère local à l'adhésif (obtenu par corrélation d'images).

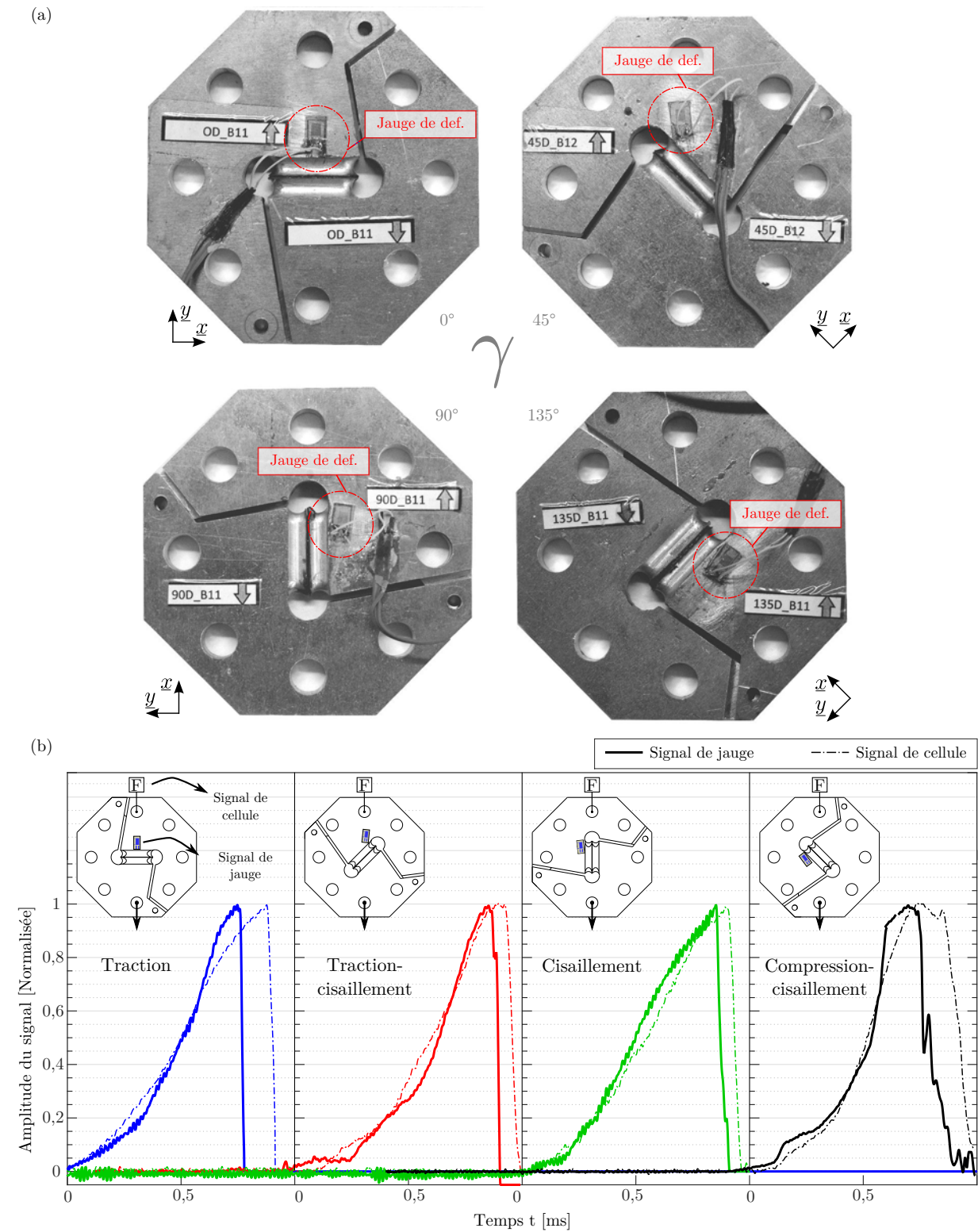


FIGURE 2.6 – (a) Éprouvettes instrumentées de jauges de déformation. (b) Comparaison des signaux des jauges et de la cellule d'effort obtenus pour les quatre cas de chargement.

2.2.2 Résultats

Influence de la vitesse de déformation

Des premiers essais ont été réalisés sur une Araldite® 420 A/B afin de répondre aux deux interrogations suivantes :

1. Le dispositif expérimental mis en place permet-il d'extraire le comportement mécanique d'un adhésif en dynamique ?
2. Le comportement de l'adhésif étudié présente-t-il une dépendance à la vitesse de déformation ?

Trois séries d'essais ont été effectuées. « QSv0,5 » et « QSv5 » sont associées à des essais quasi-statiques réalisés avec des vitesses de chargement de $0,5 \text{ mm.min}^{-1}$ et 5 mm.min^{-1} . « DYNh0,85m67,8 » est réalisée en dynamique sous une tour de chute avec une masse impactante de 67,8 kg et une hauteur de chute de 0,85 m. Afin d'évaluer la répétabilité des résultats, six éprouvettes ont été testées par jeu de paramètres et direction de chargement.

Les courbes force-déplacement présentées sur la figure 2.7 sont tracées suivant les directions normale $\underline{y}$ et tangentielle $\underline{x}$.

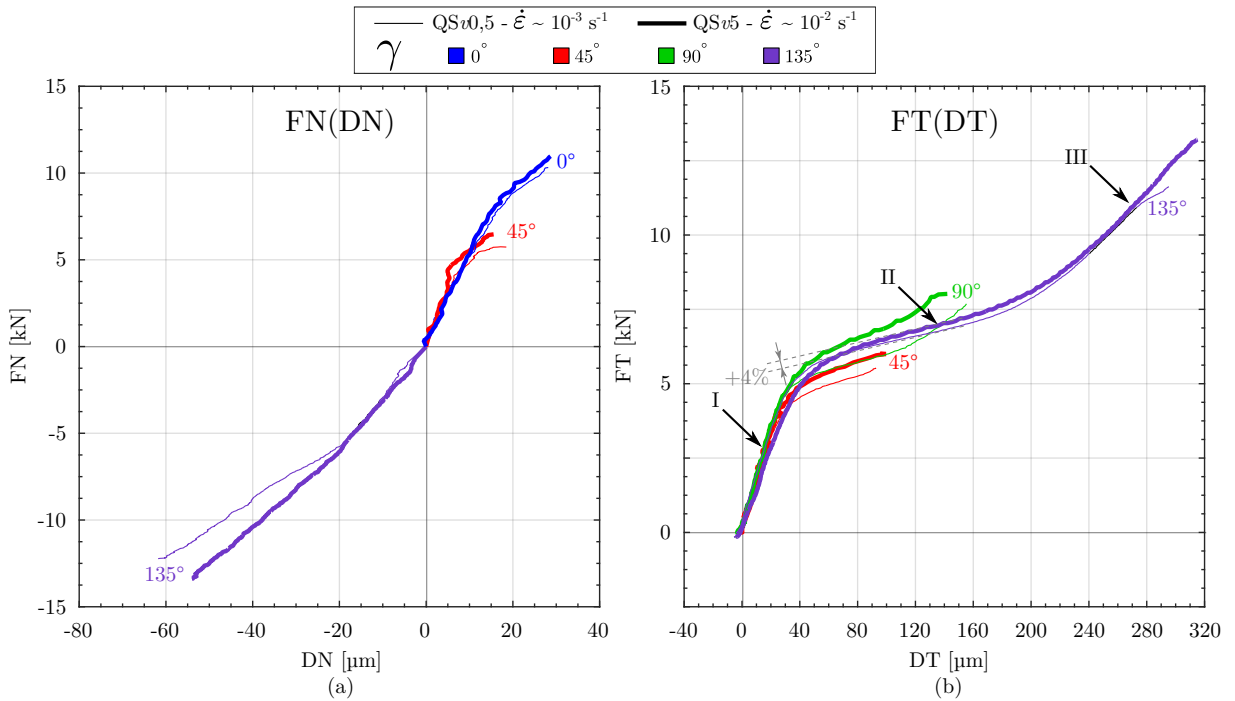


FIGURE 2.7 – Comparaison des courbes force-déplacement issues des essais quasi-statiques. (a) Suivant la direction normale. (b) Suivant la direction tangentielle.

Les comportements mécaniques non-linéaires observés sur cette figure sont similaires à ceux obtenus par Créac'hcadec *et al.* dans [Créac'hcadec *et al.*, 2015]. Les courbes de charge commencent par une partie quasi-linéaire (cf. « I ») suivie d'un plateau d'effort (« II ») et d'une reprise d'effort pour les essais de cisaillement et compression-cisaillement (« III »).

Les résultats issus de la série « QSv5 » montrent une augmentation minimale du plateau d'effort de 4 % en comparaison avec les résultats issus de la série « QSv0,5 », quelle que soit

la configuration de chargement. Cette variation traduit l'influence de la vitesse de déformation sur la réponse mécanique de l'adhésif pour des sollicitations quasi-statiques (pour des vitesses de déformation proches de 10^{-2} s^{-1}).

Les courbes force-déplacement présentées sur la figure 2.8 sont tracées suivant les directions normale y et tangentielle x . Elles sont obtenues pour des sollicitations dynamiques (*i.e.* pour des vitesses de déformation de l'ordre de 10^3 s^{-1}).

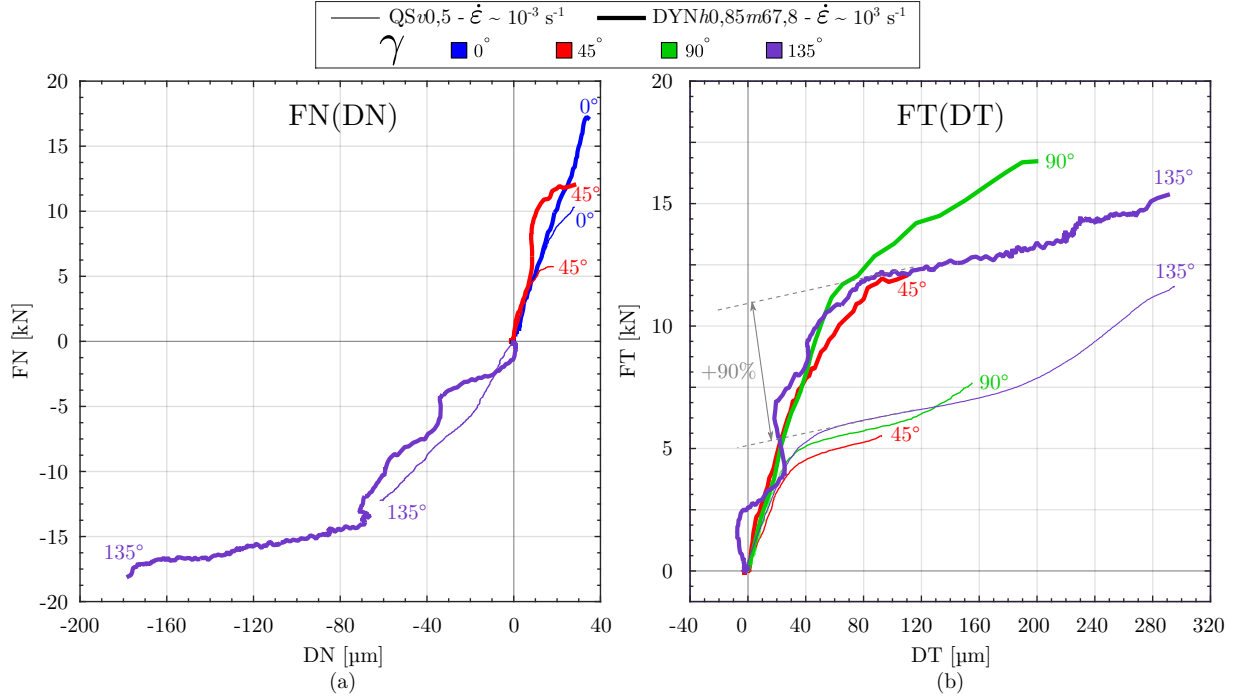


FIGURE 2.8 – Comparaison des courbes force-déplacement issues des essais quasi-statique et dynamique. (a) Suivant la direction normale. (b) Suivant la direction tangentielle.

Les résultats extraits de la série « DYNh0,85m67,8 » montrent une augmentation minimale du plateau d'effort de 90 % en comparaison avec les résultats issus de la série « QSV0,5 » (cf. figure 2.8). Les écarts les plus importants relevés sur les efforts à rupture sont obtenus pour les essais de traction-cisaillement et cisaillement où ils excèdent les 130 % d'augmentation.

Cette première étude montre que le dispositif expérimental mis en place permet, dans ces conditions d'essais, d'extraire une partie de l'enveloppe de réponse de l'Araldite® 420 A/B en dynamique. Les résultats obtenus ont une dépendance marquée à l'augmentation de la vitesse de déformation.

Influence des conditions initiales d'essais

La seconde étude expérimentale porte sur l'influence de la hauteur de chute h et de la masse de l'impacteur m sur le comportement dynamique de l'essai. Elle a été réalisée afin :

1. D'identifier le ou les paramètres permettant d'ajuster la vitesse de déformation.
2. De mettre en évidence les limites d'utilisation du dispositif expérimental.

Quatre séries d'essais, notées « DYNh3m2,27 », « DYNh3m8 », « DYNh0,85m8 » et « DYNh0,85m67,8 », ont été réalisées. D'une série à l'autre, une seule condition initiale a été modifiée afin de pouvoir mettre en évidence son influence. Les différents jeux de paramètres testés sont listés dans le tableau 2.1. Six essais ont été réalisés par jeu de paramètres et direction de chargement.

Série	Hauteur de chute h [m]	Masse de l'impacteur m [kg]	Vitesse mesurée v_0 [m.s ⁻¹]	Energie cinétique calculée E_c [J]
DYNh3m2,27	$3 \pm 5 \times 10^{-2}$	2,27	$7,7 \pm 0,2$	67 ± 3
DYNh3m8	$3 \pm 5 \times 10^{-2}$	8	$7,7 \pm 0,1$	237 ± 6
DYNh0,85m8	$0,85 \pm 5 \times 10^{-2}$	8	$4,1 \pm 0,2$	67 ± 6
DYNh0,85m67,8	$0,85 \pm 5 \times 10^{-2}$	67,8	$4,1 \pm 0,1$	570 ± 28

TABLEAU 2.1 – Essais réalisés pour tester l'influence des conditions initiales d'essai.

Les figures 2.9a et b présentent les évolutions du déplacement relatif moyen tangentiel en fonction du temps $DT(t)$ et de l'effort tangentiel en fonction du déplacement relatif moyen tangentiel $FT(DT)$ obtenues pour des sollicitations de cisaillement. Un exemple est extrait par série testée.

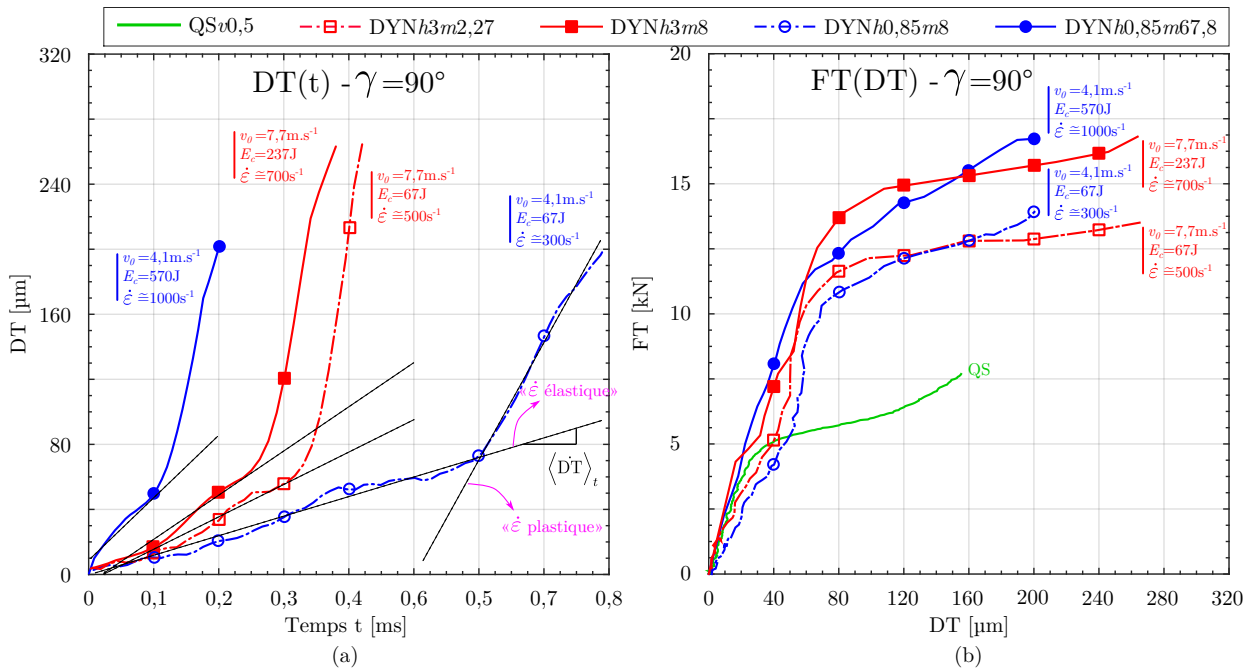


FIGURE 2.9 – Influence des conditions initiales d'essai sur le comportement en cisaillement. (a) Évolutions de DT en fonction du temps. (b) Comparaison des courbes $FT(DT)$.

Les courbes tracées sur la figure 2.9a font apparaître deux vitesses de déformation par essai notées « $\dot{\epsilon}$ élastique » et « $\dot{\epsilon}$ plastique » sur l'exemple « DYNh0,85m8 ». Sur la base des résultats en effort-déplacement tracés sur la figure 2.9b, il peut être remarqué qu'une première vitesse de déformation est liée aux parties linéaires des courbes et la seconde aux écoulements plastiques. Pour caractériser le comportement mécanique d'une colle en dynamique, seule la vitesse de déformation initiale liée à la partie linéaire de la courbe force-déplacement (avant que l'adhésif ne soit endommagé) est considérée.

Les résultats de cette même figure montrent également un lien entre l'énergie cinétique amenée lors de l'impact et la vitesse de déformation. En effet, pour une même vitesse d'impact les essais réalisés avec des impacteurs lourds provoquent des vitesses de déformation moyennes plus importantes. Cette évolution a pour conséquence secondaire d'élever la hauteur du plateau d'effort comme le montre la figure 2.9b.

Les figures 2.10a et b présentent les évolutions du déplacement relatif moyen normal et de l'effort normal en fonction du temps obtenues pour des sollicitations de traction. Un exemple est extrait par série testée.

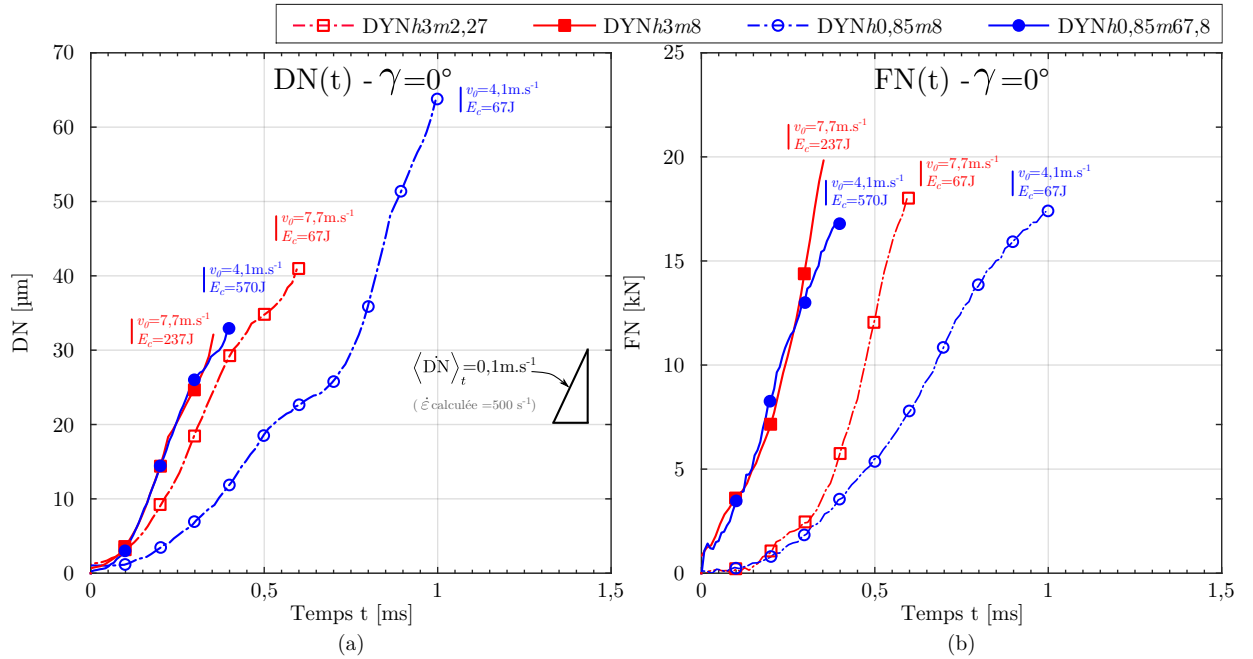


FIGURE 2.10 – Évolutions de (a) $DN(t)$ et (b) $FN(t)$ pour chaque série étudiée en traction.

Des courbes de réponse quasi-linéaires sont obtenues pour les deux essais à hautes énergies (à 237 J et 570 J). En revanche, les essais à basse énergie (à 67 J) laissent apparaître un régime transitoire significatif accompagné d'oscillations. Dans ces conditions, l'adhésif n'atteint jamais une vitesse de déformation stabilisée ce qui rend l'exploitation des résultats non pertinente.

Les observations précédentes montrent que la masse impactante joue un rôle essentiel sur la réponse mécanique de l'adhésif car elle régularise le chargement. Sa valeur doit être suffisamment importante pour que la vitesse de déformation imposée au joint de colle soit monotone. La hauteur de chute reste alors le seul paramètre permettant d'ajuster la vitesse

de déformation.

Les courbes effort normal-déplacement relatif moyen normal tracées sur la figure 2.11a sont issues d'essais de traction-cisaillement. Un exemple est étudié par série testée.

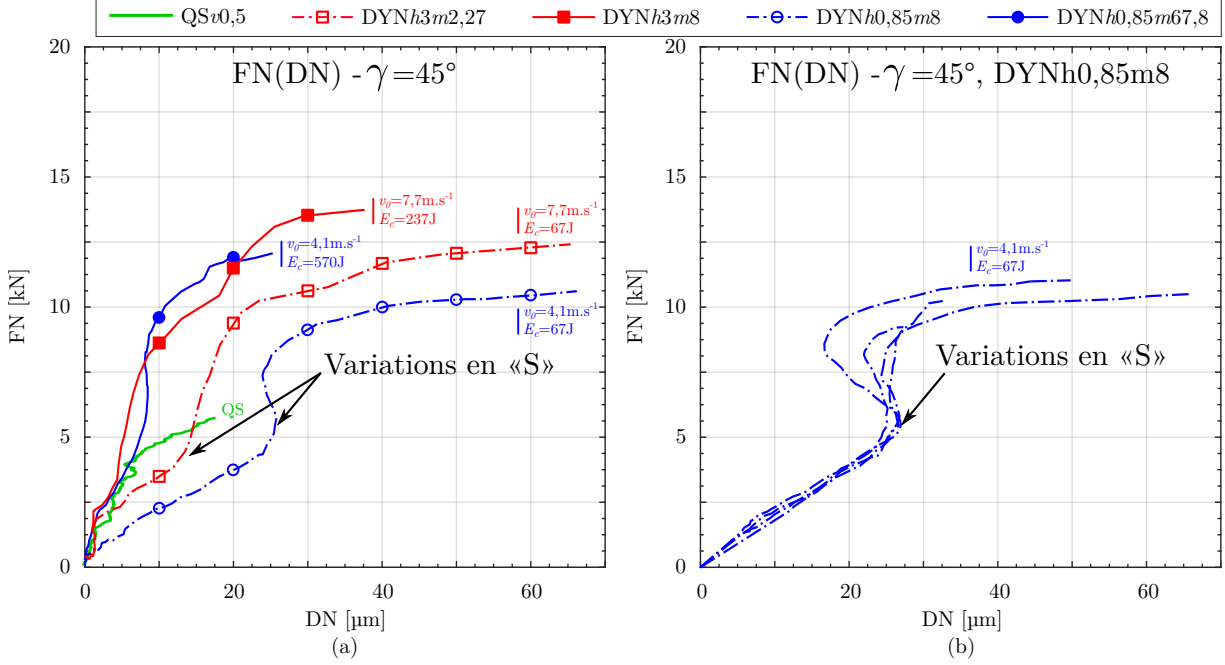


FIGURE 2.11 – Influence des conditions initiales d'essai sur le comportement en traction-cisaillement. (a) Comparaison des courbes FN(DN). (b) Évaluation de la répétabilité sur les résultats FN(DN) issus de la série « DYNh0,85m8 ».

Les résultats montrent des variations d'allure en forme de « S » sur la partie « normalement linéaire » des courbes. Cet effet est plus marqué sur les séries « DYNh3m2,27 » et « DYNh0,85m8 » correspondants aux essais à basse énergie. Les résultats présentés sur la figure 2.11b sont issus de la série « DYNh0,85m8 » et montrent la répétabilité du phénomène.

Pour comprendre l'origine de ces variations, il est intéressant d'analyser les rotations de corps rigides des deux substrats au cours du temps, présentées sur la figure 2.12. Un décalage angulaire entre les substrats $\Delta\Theta_z$ apparaît au cours de l'essai. Il se traduit par des phases d'ouverture $\Delta\dot{\Theta}_z > 0$ et de fermeture $\Delta\dot{\Theta}_z < 0$. Par conséquent, le chargement associé de l'adhésif peut s'apparenter à du clivage, c'est-à-dire au mode I de la mécanique de la rupture. Ce phénomène rend l'essai inadéquat pour de la caractérisation car il mène à la perte d'homogénéité des champs de contrainte et de déformation dans l'adhésif.

De ces dernières observations, il peut être déduit que pour une même vitesse d'impact, ce dispositif d'essai est uniquement adapté à la caractérisation si une masse suffisamment lourde est utilisée.

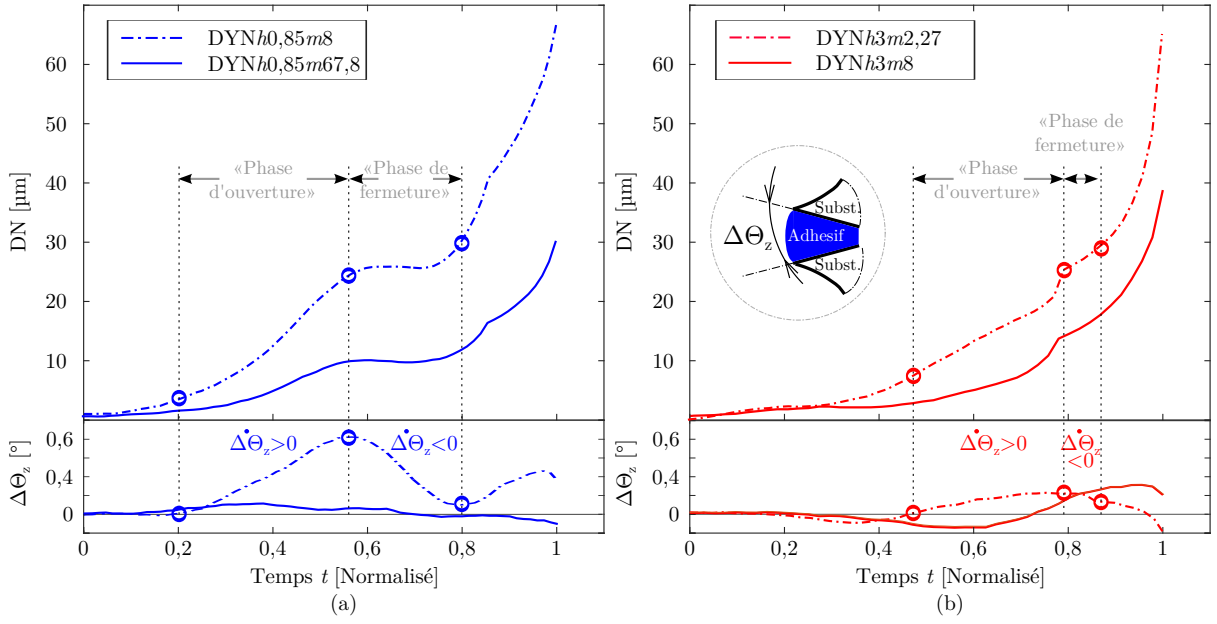


FIGURE 2.12 – Origine des variations en « S » obtenues en traction-cisaillement sur les exemples $DN(t)$ et $\Delta\Theta_z(t)$. (a) Résultats pour $h = 0,85$ m. (b) Résultats pour $h = 3$ m.

À ce stade de l'étude, il est essentiel de s'intéresser au chargement de l'adhésif. Pour cela, une étude éléments finis de l'éprouvette Arcan TCS a été réalisée.

2.3 Étude éléments finis

L'étude numérique proposée dans cette section est réalisée par l'intermédiaire du code de calcul par éléments finis Abaqus®. Son objectif est d'amener d'une part, une compréhension plus fine des phénomènes observés expérimentalement et d'autre part, de poser les bases de dimensionnement d'une éprouvette Arcan dédiée à la dynamique.

2.3.1 Présentation du modèle éléments finis

Le développement du modèle est effectué avec une hypothèse de contraintes planes telle qu'utilisée par Créac'hcadec *et al.* dans [Créac'hcadec *et al.*, 2015]. Le modèle éléments finis 2D est présenté sur la figure 2.13. Sa conception est basée sur l'éprouvette réelle. Les épaulements 3D permettant de réaliser le positionnement des substrats avant collage n'ont pas été modélisés afin de simplifier la géométrie à mailler. Pour l'analyse des résultats, les repères $(O, \underline{x}_0, \underline{y}_0)$ et $(O, \underline{x}, \underline{y})$ définis précédemment sont introduits.

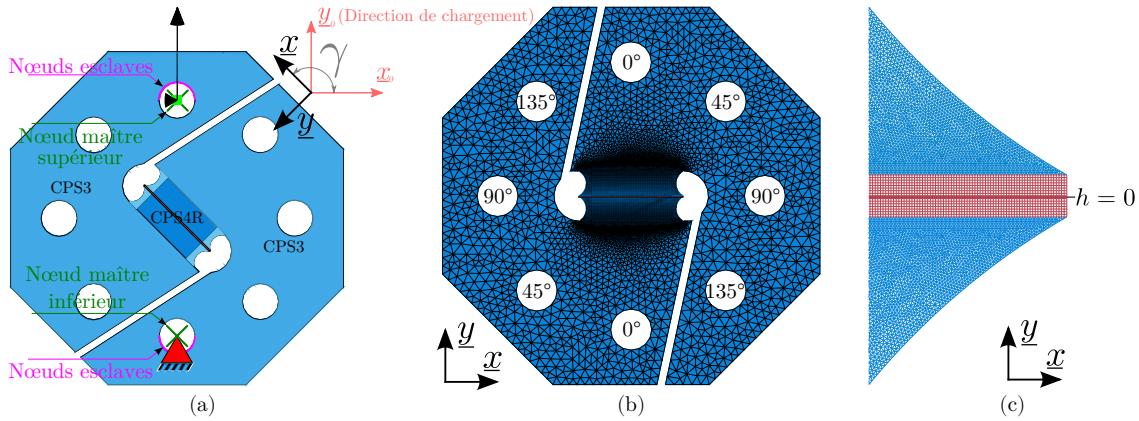


FIGURE 2.13 – Description du modèle éléments finis. (a) Conditions aux limites. (b) Maillage. (c) Zoom sur le maillage près du bord droit de l'assemblage.

Les conditions aux limites sont appliquées sur des nœuds maîtres créés au centre des deux alésages sollicités et définis par leur orientation γ . Ces nœuds sont reliés *via* une relation de corps rigide à des nœuds esclaves des deux demi-trous chargés (cf. figure 2.13a). Chaque configuration γ est définie par son nœud maître inférieur pour lequel seule la rotation autour de $\underline{z}$ est libre et son nœud maître supérieur pour lequel la rotation autour de $\underline{z}$ et la translation suivant la direction de chargement $\underline{y}_0$ sont libres.

L'adhésif est maillé avec des éléments solides 2D quadrilatéraux à quatre nœuds et intégration réduite CPS4R [Abaqus, 2012] (cf. figure 2.13). Des éléments CPS4R et triangulaires à trois nœuds et intégration réduite CPS3R sont utilisés pour mailler le reste de l'éprouvette. Une étude de convergence a été menée afin de sélectionner une taille adéquate des éléments. Seize rangées d'éléments sont utilisées dans l'épaisseur de l'adhésif. Le modèle maillé est composé de 401626 éléments et 589268 degrés de liberté. Un chemin d'analyse, noté « $h = 0$ » sur la figure 2.13c, est défini dans le plan moyen du joint. Il permet d'analyser les distributions des contraintes dans l'adhésif, le long de la surface de recouvrement.

2.3.2 Résultats

Distributions des contraintes dans l'adhésif

Une première étude éléments finis porte sur l'analyse des distributions des contraintes dans l'adhésif. Elle a été réalisée pour deux raisons :

1. Voir si l'utilisation de becs et la prise en considération du gradient de rigidité existant entre l'adhésif et les substrats permettent de limiter les effets de bords en dynamique.
2. Voir si les conditions initiales d'essai ont une influence sur la répartition et l'évolution des contraintes dans l'adhésif.

Seules les configurations de traction et compression-cisaillement, correspondant aux chargements limites (en terme de qualité) sont ici présentées.

L'analyse dynamique est réalisée avec une hypothèse de loi de comportement purement élastique. Les propriétés mécaniques des matériaux utilisés sont : $E_a = 1,495$ GPa, $E_s = 73$ GPa, $\nu_a = 0,34$, $\nu_s = 0,37$, $\rho_a = 1100$ kg.m⁻³ et $\rho_s = 2700$ kg.m⁻³. Elles correspondent aux modules d'Young, coefficients de Poisson et masses volumiques de l'adhésif et des substrats. Les conditions aux limites appliquées au point de référence supérieur sont une masse ponctuelle ainsi qu'une vitesse initiale modélisant la masse et la vitesse d'impact du poids tombant. La solution éléments finis est obtenue en utilisant la procédure dynamique/explicite d'Abaqus® [Abaqus, 2012].

Les figures 2.14 & 2.15 présentent les distributions des contraintes issues d'essais de traction et compression-cisaillement dans le plan moyen de l'adhésif (en $h = 0$). Trois jeux de configurations initiales ont été testés à iso énergie cinétique $E_c = 57,8$ J, fixés arbitrairement : $m = 1$ kg/ $v_0 = 10,75$ m.s⁻¹, $m = 10$ kg/ $v_0 = 3,4$ m.s⁻¹ et $m = 50$ kg/ $v_0 = 1,52$ m.s⁻¹. Les contraintes normales σ_{ii} , $i = \{x, y\}$ et tangentielle σ_{xy} du tenseur des contraintes σ sont extraites dans la base $\mathcal{B}(\mathbf{O}, \underline{x}, \underline{y})$ associée à l'éprouvette. Compte tenu des hypothèses numériques de modélisation, seule la masse de l'impacteur a une influence sur les répartitions des contraintes.

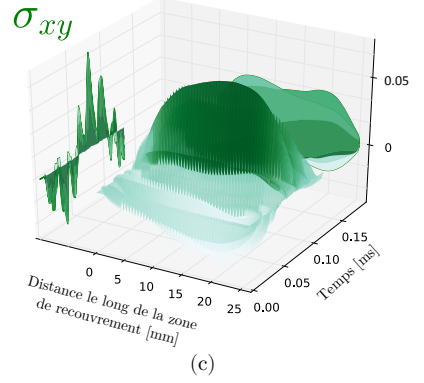
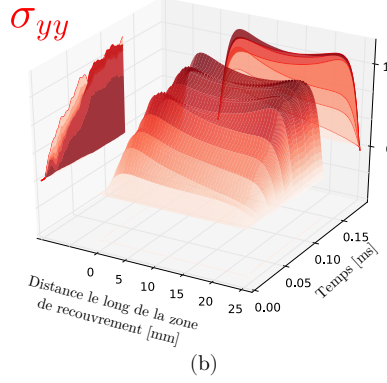
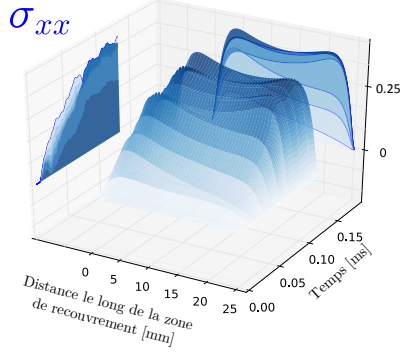
Premièrement, les distributions spatiales des contraintes ne montrent aucun effets de bords. De fait, les solutions développées en quasi-statique pour limiter ces singularités peuvent être étendues à la dynamique.

Deuxièmement, quels que soient la vitesse de sollicitation, la masse de l'impacteur et le moment dans l'essai, les résultats extraits des simulations de traction montrent des distributions spatiales quasi-uniformes au milieu de la zone de recouvrement (pour x compris entre 5 mm et 20 mm, cf. figure 2.14). En compression-cisaillement, l'uniformité du chargement dépend de la masse de l'impacteur. En effet, les répartitions des contraintes sont non-uniformes spatialement et accidentées temporellement lorsque la masse imposée est de 1 kg. Elles sont quasi-uniformes au milieu de la zone de recouvrement et stables temporellement lorsque la masse imposée est de 50 kg.

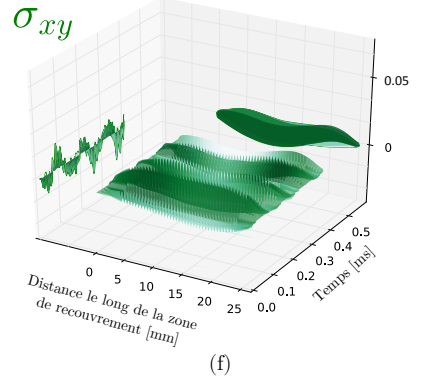
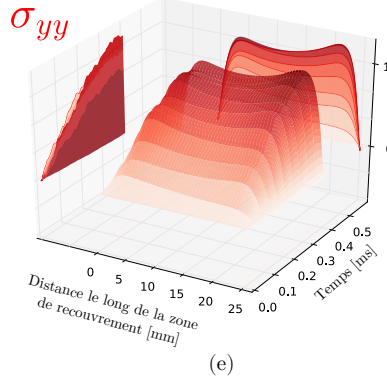
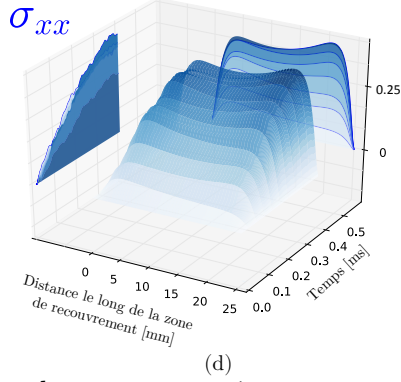
Ces dernières observations sont en accord avec l'expérimental : un impacteur de masse importante doit être utilisé afin de garantir l'homogénéité des contraintes dans l'adhésif au cours de l'essai.

Essai de traction ($\gamma=0^\circ$)

$m=1\text{kg}$ - $v_0=10,75\text{m.s}^{-1}$



$m=10\text{kg}$ - $v_0=3,4\text{m.s}^{-1}$



$m=50\text{kg}$ - $v_0=1,52\text{m.s}^{-1}$

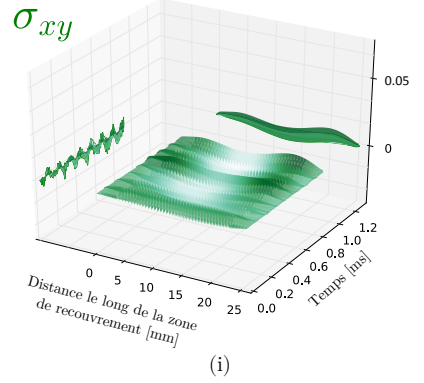
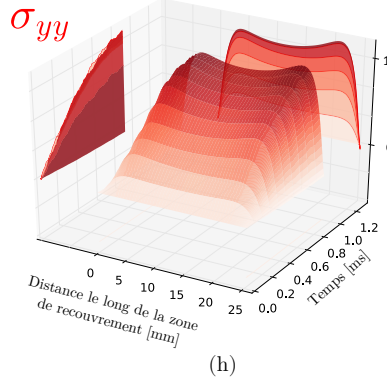
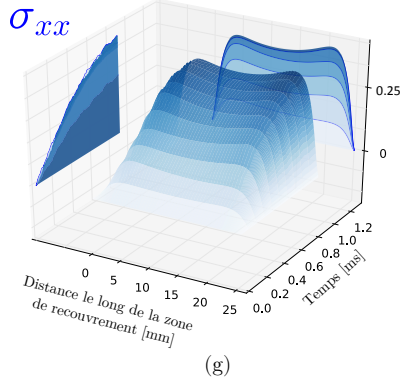


FIGURE 2.14 – Distributions spatiales et temporelles des contraintes normalisées obtenues en traction.

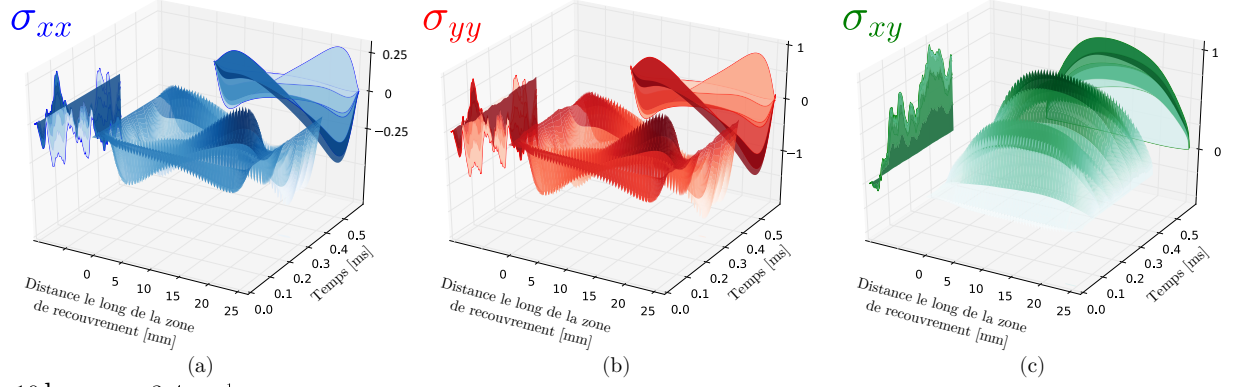
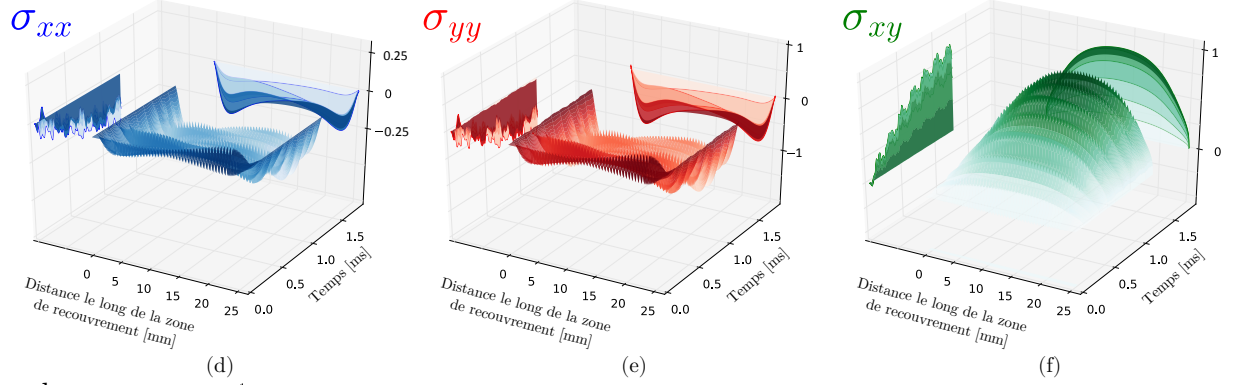
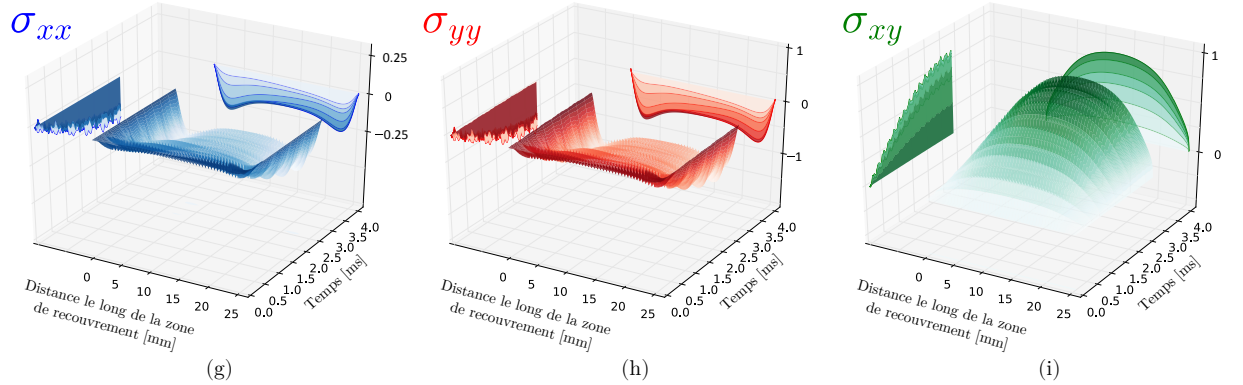
Essai de compression-cisaillement ($\gamma=135^\circ$)m=1kg - $v_0=10,75\text{m.s}^{-1}$ m=10 kg - $v_0=3,4\text{m.s}^{-1}$ m=50kg - $v_0=1,52\text{m.s}^{-1}$ 

FIGURE 2.15 – Distributions spatiales et temporelles des contraintes normalisées obtenues en compression-cisaillement.

Analyse modale de l'éprouvette

Un seconde étude éléments finis a été réalisée pour cerner le comportement vibratoire de l'éprouvette Arcan TCS. Son objectif est de comprendre l'origine des perturbations soulevées lors de l'analyse des distributions dans l'adhésif.

Les principaux résultats issus de l'analyse modale sont présentés sur la figure 2.16. En particulier, trois essais sont analysés :

1. Un essai de traction avec une masse imposée de 1 kg (cf. figures 2.16a & b).
2. Un essai de compression-cisaillement avec une masse imposée de 1 kg (provoquant des oscillations de forte amplitude, cf. figures 2.16c-f).
3. Un essai de compression-cisaillement avec une masse imposée de 50 kg (permettant de stabiliser le signal temporel, cf. figures 2.16g-i).

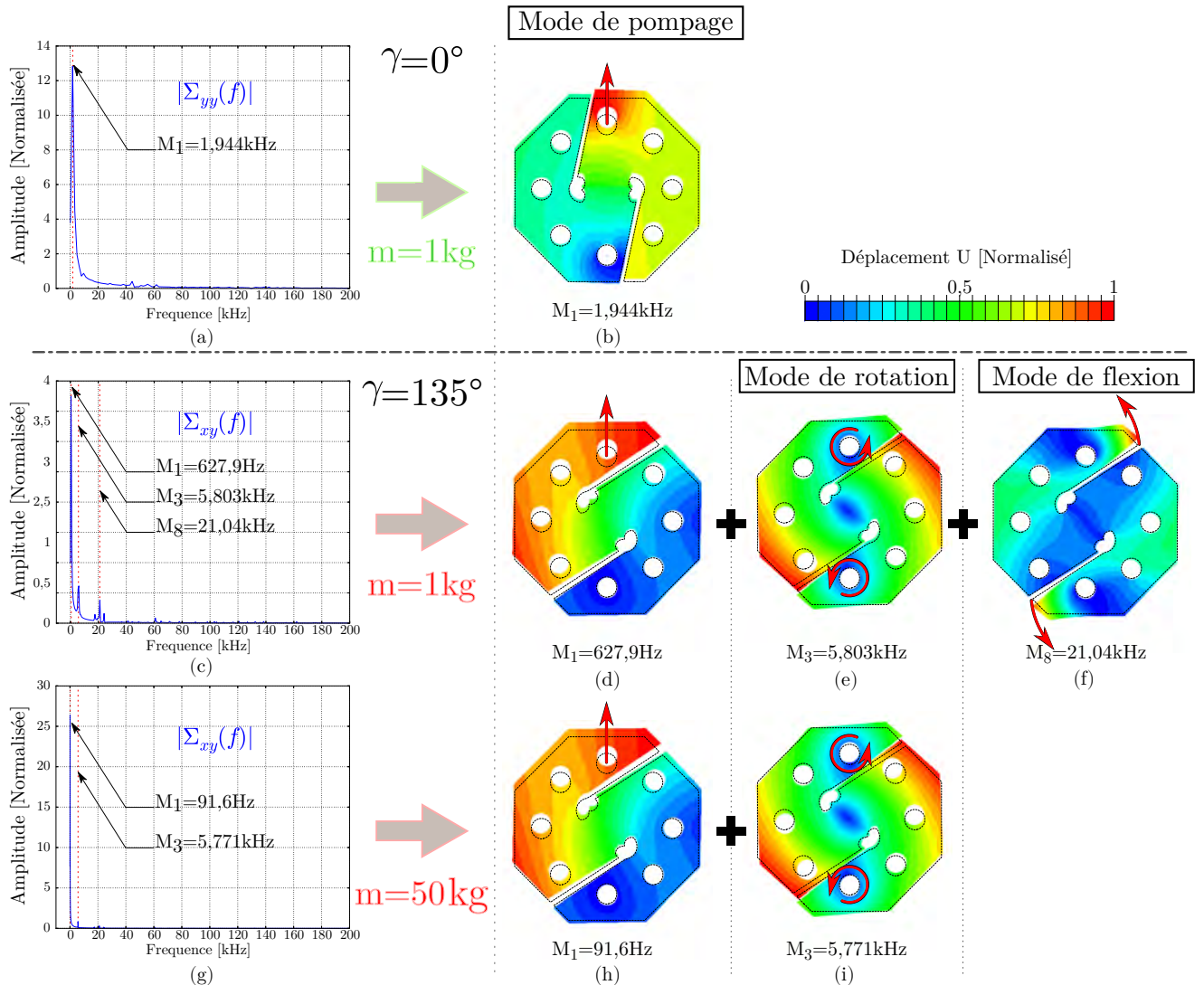


FIGURE 2.16 – Influence des conditions initiales d'essai sur le comportement vibratoire de l'éprouvette Arcan TCS utilisée en traction et compression-cisaillement.

Le spectre vibratoire associé à la distribution temporelle de $\sigma_{yy}(h = 0, x = 12,5 \text{ mm})$ en traction est tracé sur la figure 2.16a. Les spectres associés aux distributions temporelles de $\sigma_{xy}(h = 0, x = 12,5 \text{ mm})$ en compression-cisaillement sont tracés sur les figure 2.16c & g. Ces résultats ont été obtenus en calculant le module de la Transformée de Fourier Discrète (TFD) du signal.

Les modes propres de vibration de l'éprouvette Arcan TCS (marqués par des traits en pointillés sur les figures 2.16a, c & g) et les déformées associées aux modes les plus excités ont été calculés avec la procédure perturbation linéaire/fréquence d'Abaqus® [Abaqus, 2012].

Le spectre vibratoire associé à l'essai de traction avec une masse imposée de 1 kg montre qu'un seul mode est excité à $M_1 = 1,944 \text{ kHz}$ (cf. figure 2.16a). Il correspond au fondamental, *i.e.* à un mode de pompage, et se rapporte à la sollicitation (cf. figure 2.16b).

Les deux spectres vibratoires associés à l'essai de compression-cisaillement pointent également le fondamental à $M_1 = 627,9 \text{ Hz}$ (pour $m = 1 \text{ kg}$) et $M_1 = 91,6 \text{ Hz}$ (pour $m = 50 \text{ kg}$). En revanche, ils montrent la présence de modes supplémentaires significativement excités.

Avec une masse imposée de 1 kg, le spectre présenté sur la figure 2.16c présente six modes additionnels fortement excités. Parmi ceux-ci, la troisième et la huitième harmoniques, à $M_3 = 5,903 \text{ kHz}$ et $M_8 = 21,04 \text{ kHz}$ ont les plus grandes amplitudes avec un contenu énergétique 5,5 et 11 fois inférieur à celui du fondamental. Le troisième mode correspond à la rotation relative des deux substrats autour de leur axe de pivot (cf. figure 2.16e). Ce mouvement est similaire aux rotations à l'origine des variations en « S » observées expérimentalement. La huitième harmonique correspond à la flexion des extrémités de l'éprouvette comme le montre la figure 2.16f.

En augmentant la masse imposée à $m = 50 \text{ kg}$ tout en gardant la même énergie cinétique, les résultats tracés sur la figure 2.16g présentent un écart plus important entre le fondamental et les harmoniques en terme de contenu énergétique. En effet, le troisième mode de vibration a un contenu énergétique 26 fois plus faible que celui du fondamental et le huitième n'est plus visible.

Ces derniers résultats sont à nouveaux en adéquation avec les observations faites expérimentalement. En particulier, ils montrent que l'utilisation d'un impacteur lourd permet d'assurer un chargement stable et homogène de l'adhésif au cours de l'essai.

Tenue mécanique de l'éprouvette Arcan TCS

Une troisième étude éléments finis a porté sur la tenue mécanique de l'éprouvette Arcan TCS. Elle a été réalisée afin d'identifier les zones de l'éprouvette qui sont susceptibles de plastifier au cours des essais dynamiques.

La loi de comportement utilisée pour les substrats est élastoplastique. Elle a été identifiée à partir des courbes en contrainte-déformation vraies extraites d'essais quasi-statiques normalisés [ISO 6892-1, 2009] réalisés sur des éprouvettes altères en alliage d'aluminium 2017A-T451 (les dimensions de l'échantillon sont présentées en annexe A). Elle est rentrée de manière tabulée dans Abaqus®. La loi de comportement de l'adhésif est élastique, les paramètres matériaux associés restent inchangés.

L'essai numérique est piloté par un effort imposé au point de référence supérieur. La solution éléments finis est obtenue en utilisant la procédure de résolution statique/générale d'Abaqus® [Abaqus, 2012].

La figure 2.17 présente les distributions de la déformation plastique équivalente ε_{eq}^{pl} dans l'éprouvette Arcan TCS. Ces distributions sont obtenues dans les quatre configurations, pour un chargement de 30 kN imposé. Cette valeur correspond à l'effort maximal de 20 kN relevé expérimentalement en dynamique multiplié par un coefficient de sécurité $s = 1,5$ fixé arbitrairement. $\varepsilon_{eq}^{pl} = \sqrt{\frac{2}{3} \boldsymbol{\varepsilon}^{pl} : \boldsymbol{\varepsilon}^{pl}}$, où $\boldsymbol{\varepsilon}^{pl}$ est le tenseur des déformations plastiques. Il correspond à une valeur scalaire pouvant être assimilée à une déformation plastique équivalente de type von Mises.

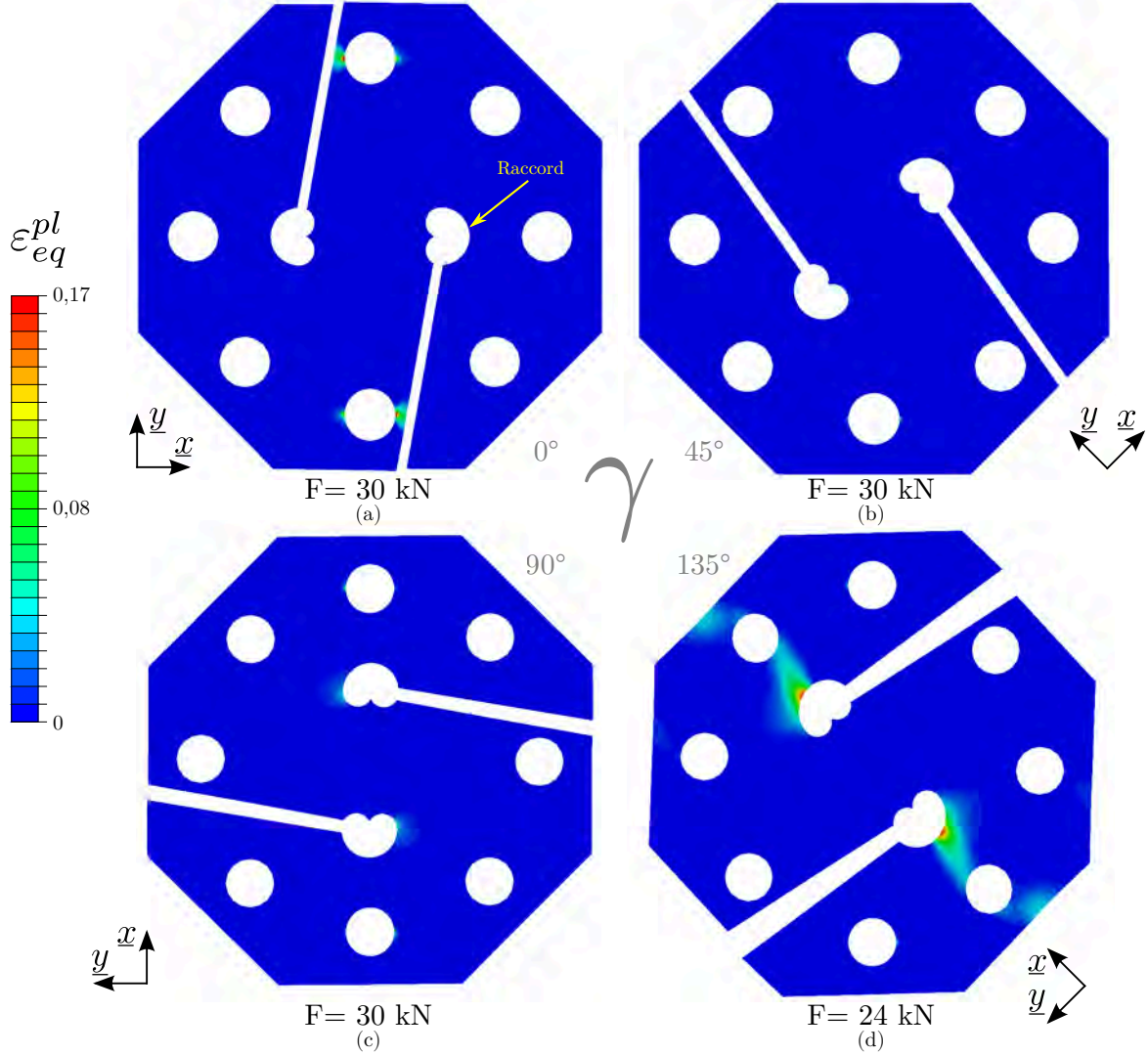


FIGURE 2.17 – Distributions de la déformation plastique équivalente ε_{eq}^{pl} dans l'éprouvette Arcan TCS (obtenues pour un chargement de 30 kN).

Les configurations de cisaillement et de compression-cisaillement montrent la présence de déformations irréversibles aux niveaux des raccords (cf. figure 2.17). Le cas de la compression-cisaillement est le plus critique : le calcul implicite ne converge pas pour cette configuration car la contrainte maximale de la loi élastoplastique tabulée est atteinte pour un effort imposé inférieur à 30 kN. La distribution présentée sur la figure 2.17d est relevée pour un effort imposé de 24 kN (avant l'apparition des problèmes de convergence). Elle montre la présence de déformations plastiques importantes supérieures à 17 % dans les deux raccords.

La figure 2.18 est une photo de l'éprouvette Arcan TCS prise après un essai de compression-cisaillement réalisé en dynamique. Elle montre la présence de déformations irréversibles localisées au niveau des rayons de raccord.

Les résultats issus des simulations sont par conséquent cohérents vis-à-vis des observations expérimentales.

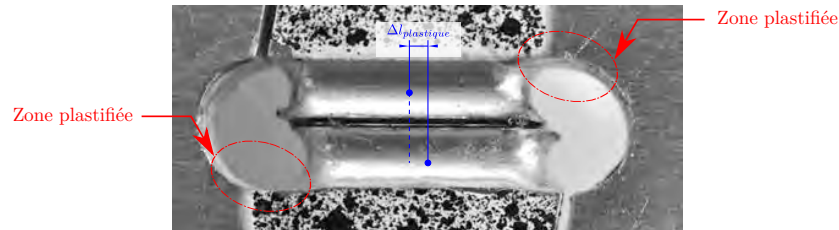


FIGURE 2.18 – Localisation des zones plastifiées.

Dans l'état, l'éprouvette Arcan TCS ne peut pas être utilisée pour de la caractérisation dynamique d'adhésifs. Elle va devoir être dimensionnée pour être en mesure de résister aux hauts niveaux d'efforts rencontrés en dynamique.

2.4 Conclusions

Dans ce second chapitre, l'extension de l'utilisation de l'éprouvette Arcan TCS développée par Créac'hcadec *et al.* [Créac'hcadec *et al.*, 2015] a été étudiée dans des conditions d'essai sous tour de chute. Une étude prospective expérimentale et numérique a été réalisée. De ces travaux, trois conclusions majeures peuvent être tirées.

La première conclusion est liée à la pertinence du développement d'un essai de caractérisation approprié des adhésifs sous chargements dynamiques. En effet, les premiers résultats expérimentaux montrent, pour l'adhésif étudié, une dépendance marquée du comportement mécanique à l'augmentation de la vitesse de déformation.

La deuxième conclusion concerne l'extension de l'utilisation de l'éprouvette Arcan TCS dans des conditions d'essai sous une tour de chute. Les observations expérimentales et numériques s'accordent à montrer qu'il est possible d'extraire de nombreux résultats fiables et pertinents de ce type d'éprouvette.

Néanmoins, la version actuelle n'étant pas dimensionnée pour les niveaux d'effort rencontrés en dynamique, une nouvelle version va devoir être développée. Celle-ci devra nécessairement garder les stratégies permettant de limiter les effets de bords, c'est-à-dire l'utilisation de becs et d'un gradient de rigidité faible entre les substrats et l'adhésif, afin d'assurer la quasi-uniformité du champ des contraintes.

La troisième conclusion concerne le choix des conditions initiales d'essai. Celles-ci doivent permettre de produire un chargement stable et uniforme de l'adhésif au cours de l'essai. Un moyen d'atteindre cet objectif consiste à utiliser une masse suffisamment importante. Cet aspect est essentiel pour obtenir des résultats exploitables.

Le dispositif de sollicitation à double cadre mis en œuvre pour les essais prospectifs est limité en terme d'utilisation. Son dimensionnement ne lui permet pas de résister aux niveaux de charge qu'implique l'utilisation d'un impacteur de masse supérieure à 68 kg lâché à une hauteur de 85 cm (masse et hauteur les plus importantes utilisées durant les essais prospectifs). Un nouveau montage de traction dynamique devra donc être conçu pour élargir la plage d'essai en terme de masse d'impacteur.

Cette étude prospective a permis de mettre en évidence des guides de conception qui seront mis à profit pour développer :

1. Une éprouvette dimensionnée pour les sollicitations dynamiques, permettant de charger de manière quasi-uniforme et répétable le joint de colle.
2. Un dispositif de traction dynamique sous tour de chute permettant de recevoir des énergies d'impact élevées.

CHAPITRE 3

Développement d'un moyen d'essais

Résumé

Ce chapitre porte sur le développement d'un moyen d'essais dédié à la caractérisation des adhésifs sous chargements dynamiques combinés.

Le premier volet de l'étude est consacré au dimensionnement de l'éprouvette originale pour des niveaux d'efforts inférieurs à 30 kN. L'objectif de la démarche est d'adapter l'éprouvette Arcan TCS aux sollicitations dynamiques. La stratégie de modélisation mise en place dans l'étude prospective a été réemployée à cet effet.

Le second volet est dédié à la conception d'un dispositif de traction dynamique sous tour de chute. Il permet de transformer l'énergie cinétique issue du mouvement d'une masse en chute libre en un chargement de traction. Son dimensionnement est réalisé avec pour objectif principal d'assurer la monotonie du chargement de l'éprouvette jusqu'à la rupture du joint de colle. Plusieurs études éléments finis associés à des systèmes masse/ressorts équivalents sont effectuées à cet effet.

Enfin la validation du moyen d'essais est traitée. Une nouvelle méthode de dépouillement en « contrainte moyenne équivalente »-« déformation moyenne » est définie. Elle est utilisée pour analyser les résultats issus d'essais expérimentaux réalisés sur le moyen développé. Les résultats obtenus valident les choix de conception effectués.

Sommaire

3.1	Extension de l'éprouvette Arcan TCS à la sollicitation dynamique	68
3.1.1	Éprouvette modifiée pour la dynamique	68
3.1.2	Dimensionnement	68
3.2	Développement d'un dispositif de sollicitation dynamique . . .	71
3.2.1	Moyen d'essais développé	71
3.2.2	Dimensionnement	74
3.3	Validation expérimentale du moyen d'essais	81
3.3.1	Analyse du chargement de l'éprouvette	81
3.3.2	Comparaison des éprouvettes Arcan TCS et Arcan optimisée pour la dynamique	82
3.3.3	Influence des conditions d'essais	90
3.4	Conclusions	94

3.1 Extension de l'éprouvette Arcan TCS à la sollicitation dynamique

L'étude prospective a mis en évidence la nécessité d'adapter l'éprouvette Arcan TCS aux sollicitations dynamiques. Une éprouvette modifiée pour la dynamique a donc été développée.

3.1.1 Éprouvette modifiée pour la dynamique

Des modifications d'ordre géométrique et matériau ont été réalisées sur l'éprouvette originale. Elles ont pour objectif d'augmenter sa résistance mécanique pour lui permettre de faire face aux efforts rencontrés en dynamique. L'éprouvette modifiée est présentée sur la figure 3.1. Le plan de définition associé est disponible en annexe A.

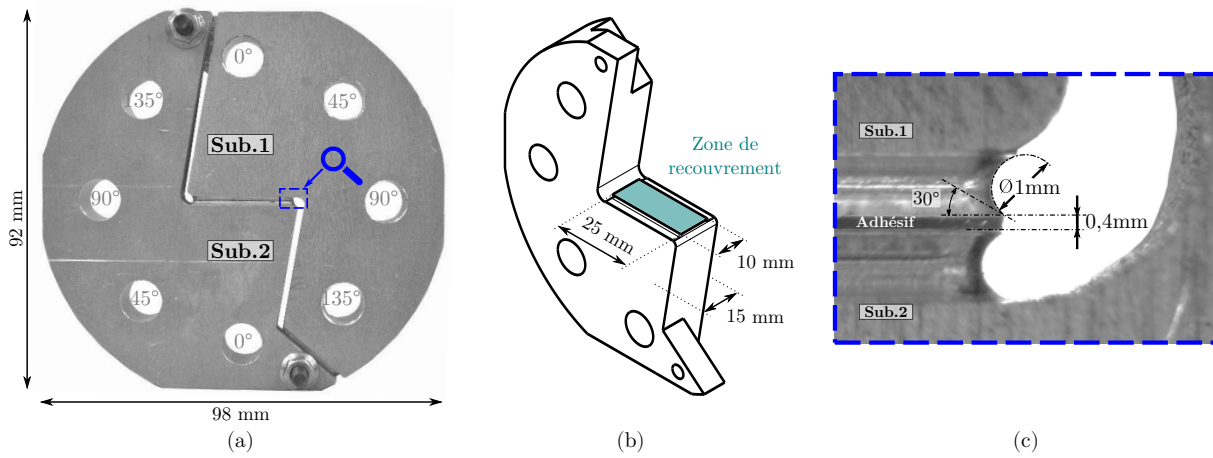


FIGURE 3.1 – Éprouvette modifiée pour la dynamique. (a) Vue générale. (b) Vue d'un substrat. (c) Zoom sur les becs.

L'enveloppe globale de l'éprouvette mesure 98 mm de largeur par 92 mm de hauteur et 15 mm d'épaisseur. La zone de recouvrement présente au centre de l'échantillon mesure 25 mm de long par 10 mm de large et 0,4 mm d'épaisseur. Les substrats sont fabriqués en alliage d'aluminium 7075-T651 à haute limite élastique. Le module d'Young et le coefficient de Poisson mesurés de ce matériau sont $E_s = 73 \text{ GPa}$ et $\nu_s = 0,34$. L'ensemble des modifications apportées à l'éprouvette originale fait passer sa masse de 170 g à 280 g pour la version modifiée.

La solution consistant à usiner des becs rayonnés dans les substrats, aux niveaux des bords libres de la zone de recouvrement, pour limiter les effets de bords est réutilisée. Ils ont un diamètre 1 mm et forment un angle de 30° avec la zone de recouvrement (cf. figure 3.1c).

3.1.2 Dimensionnement

Le dimensionnement de l'éprouvette a été réalisé par la méthode des éléments finis. Des modèles 2D-contraintes planes et 3D de l'éprouvette originale ont d'abord été étudiés. Les résultats obtenus avec ces deux modèles sont similaires. Pour des questions de temps de calcul, la stratégie de modélisation mise en place dans l'étude prospective pour évaluer la tenue mécanique de l'éprouvette originale a été réemployée.

Les efforts maximaux mesurés durant la campagne prospective ne dépassent pas les 20 kN. Un cahier des charges a été arbitrairement fixé afin d'obtenir une marge de sécurité. Il impose notamment que l'éprouvette optimisée vérifie un critère de dimensionnement en déformation plastique équivalente ε_{eq}^{pl} tel que : ε_{eq}^{pl} reste inférieure à 2 % pour un effort appliqué de 30 kN. L'étude prospective a également mis en évidence que l'essai de compression-cisaillement est le plus critique. Par conséquent, l'étude de dimensionnement a principalement porté sur l'analyse de l'éprouvette Arcan TCS dans cette configuration de chargement. Enfin, l'éprouvette optimisée étant utilisée à des fins de caractérisation dynamique, un compromis entre sa masse et sa résistance a été recherché afin de limiter les effets inertiels.

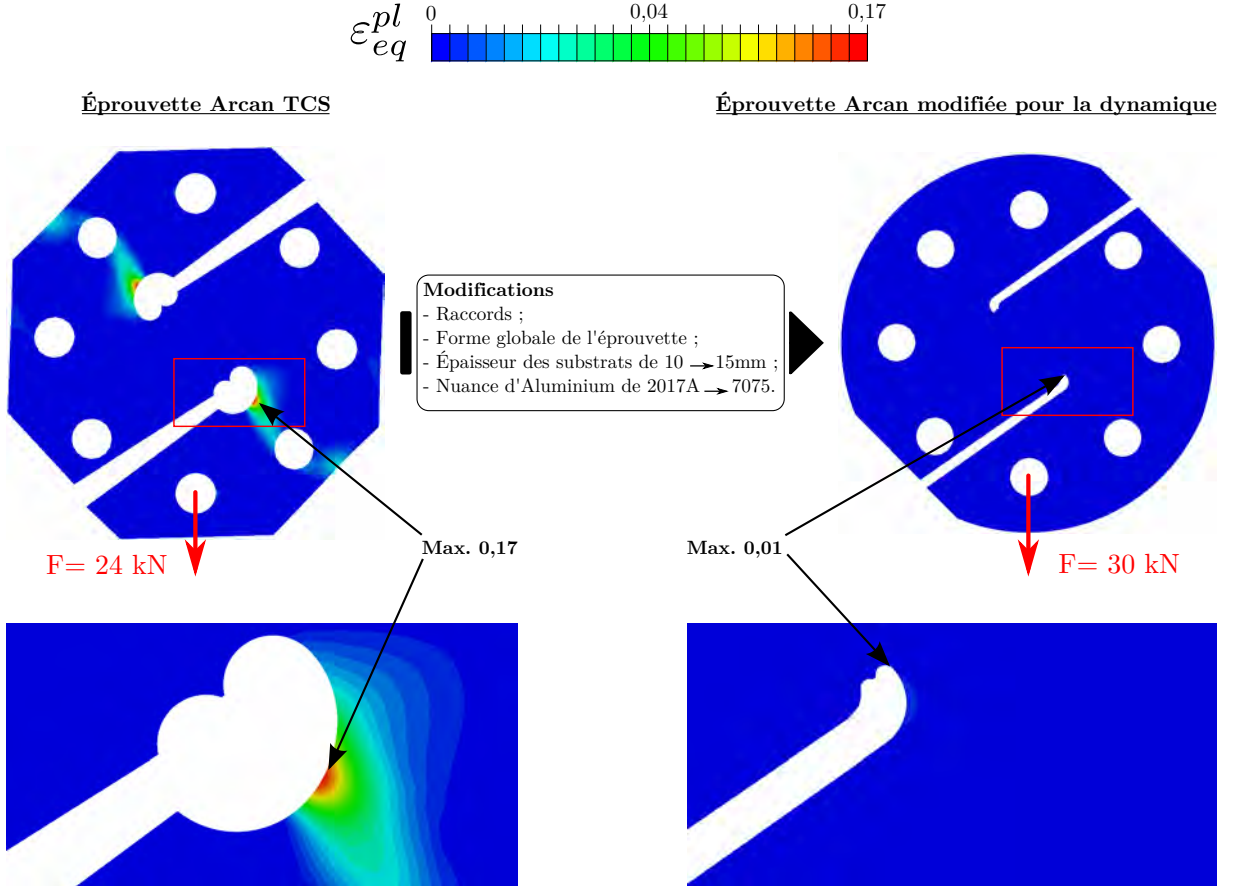


FIGURE 3.2 – Distribution de ε_{eq}^{pl} dans l'éprouvette Arcan TCS et Arcan modifiée pour la dynamique.

En compression-cisaillement, l'apparition des déformations irréversibles dans les raccords est générée par la flexion des substrats. Dans ces zones, les contraintes sont d'autant plus importantes que le moment de flexion est grand et le moment quadratique local associé est faible. La forme cylindrique des raccords permet le passage de l'outil lors de l'usinage des becs rayonnés. Par conséquent, une modification de la géométrie globale des raccords entraîne une modification de la géométrie des becs. Afin d'augmenter la résistance globale des substrats tout en gardant la stratégie des becs, un premier travail a été réalisé sur cette zone. L'angle $\alpha = 30^\circ$, entre la zone de recouvrement et les becs rayonnés, est conservé. En revanche, le diamètre des congés passe de 6 mm à 1 mm permettant de modifier la forme des raccords. Dans le cas de la compression-cisaillement, ces modifications permettent de

diminuer la déformation plastique équivalente maximale supérieure à 17 % pour une charge appliquée de 24 kN, à approximativement 9 % pour 30 kN. Outre l'aspect dimensionnement, la diminution du diamètre des becs rayonnés permet de rapprocher les zones d'analyse sur lesquelles sont extraits les déplacements de corps rigides des substrats.

La forme octogonale de l'éprouvette originale est pratique d'un point de vue usinage mais diminue la section travaillante. En changeant cette forme pour une géométrie « circulaire » il est possible, en addition à la modification précédente, de diminuer la déformation plastique équivalente maximale à 7 %.

L'augmentation de l'épaisseur des substrats de 10 mm à 15 mm sans modifier les dimensions de la surface de recouvrement permet, en addition aux autres solutions, de diminuer la déformation plastique équivalente maximale à 3 %.

Enfin, l'utilisation d'un alliage d'aluminium 7075-T651 à haute limite élastique $\sigma_e = 495$ MPa et de module d'Young identique à l'alliage 2017A-T451 $E_s = 73$ GPa permet de diminuer la déformation plastique équivalente maximale à une valeur inférieure à 2 %.

La figure 3.2 présente la distribution de la déformation plastique équivalente dans l'éprouvette Arcan TCS (obtenue pour un effort imposé de 24 kN) et Arcan modifiée pour la dynamique (obtenue pour un effort imposé de 30 kN) en configuration de compression-cisaillement. Les résultats issus des simulations montrent que l'éprouvette optimisée respecte le cahier des charges.

Des informations complémentaires concernant le dimensionnement de l'éprouvette sont disponibles en annexe B. En particulier, sont présentés :

- Une comparaison des résultats obtenus via les modèles 2D-contraintes planes et 3D sur l'éprouvette modifiée.
- Les distributions de la déformation plastique équivalente dans l'éprouvette modifiée pour les quatre configurations de chargement.

L'éprouvette Arcan TCS étant étendue à la sollicitation dynamique, il reste à développer un dispositif de sollicitation adapté.

3.2 Développement d'un dispositif de sollicitation dynamique

L'étude prospective a mis en évidence la nécessité d'utiliser un impacteur de masse suffisamment élevée pour produire un chargement stable et uniforme de l'adhésif au cours de l'essai.

Fondamentalement, un système de sollicitation - par poids tombant - d'une éprouvette en traction, est constitué d'une masse tombante, d'un mécanisme de transmission d'effort à l'éprouvette, et d'un encastrement de cette dernière. La figure. 3.3 propose un paramétrage d'un tel dispositif.

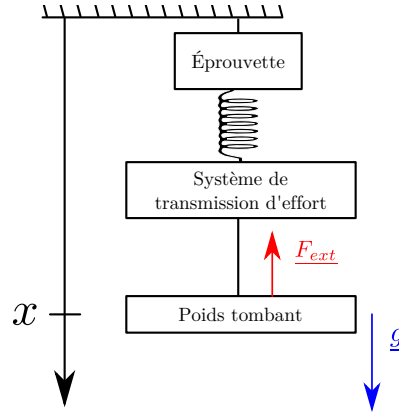


FIGURE 3.3 – Paramétrage d'un dispositif de sollicitation par poids tombant.

En première analyse simplifiée, l'application du Principe Fondamental de la Dynamique au poids tombant dans son mouvement par rapport au bâti d'essai conduit à l'équation du mouvement :

$$F_{ext} = m(\ddot{x} - g) \quad (3.1)$$

avec m la masse de l'impacteur, x le paramètre de position ($\ddot{x}$ l'accélération) du poids tombant et F_{ext} l'effort de réaction exercé sur le poids tombant par le mécanisme de transmission d'effort. De cette équation, il apparaît que la décélération $\ddot{x}$ du poids tombant est fonction de (1) l'effort exercé par le système de transmission d'effort et l'éprouvette, et de (2) la masse impactante. Plus la valeur de la masse de l'impacteur est élevée et plus elle devient le terme prépondérant de la réponse, stabilisant ainsi cette dernière.

Le dispositif de sollicitation à double cadre utilisé pour réaliser les essais prospectifs n'est pas dimensionné pour résister aux niveaux de charge que l'utilisation de masses supérieures à 68 kg implique. Il a donc été nécessaire de développer un montage de sollicitation dynamique adapté.

3.2.1 Moyen d'essais développé

Afin d'investiguer l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement mécanique des adhésifs, le dispositif de sollicitation doit permettre d'assurer la monotonie du chargement de l'éprouvette. Pour atteindre cet objectif, un montage original de traction dynamique, présenté sur la figure 3.4a, a été développé. Les plans de définitions associés sont disponibles en annexe C. Le montage combine des solutions technologiques issues du dispositif utilisé

par Beevers et Ellis dans [Beevers et Ellis, 1984] et des moyens d'essais à barres d'Hopkinson à collision utilisés en traction directe. Il est positionné sous une tour de chute et permet de transformer l'énergie cinétique liée au mouvement d'une masse en chute quasiment libre en un chargement de traction.

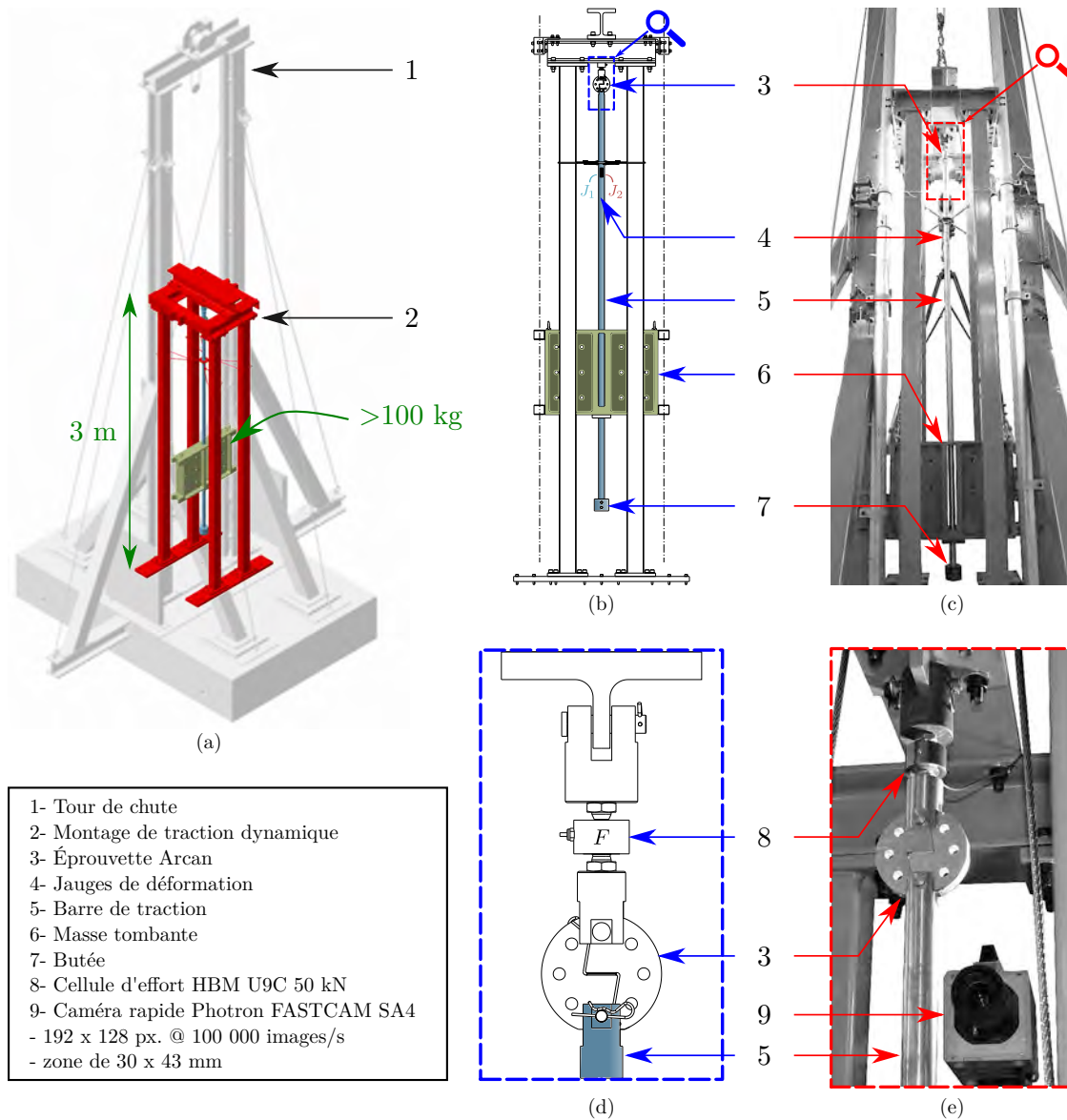


FIGURE 3.4 – Montage de Traction Dynamique. (a) Intégration du montage sous la tour de chute. (b) Schéma et (c) photographie du montage. (d) Schéma et (e) photographie de la chaîne d'acquisition.

Le dispositif est constitué d'un châssis (en rouge sur la figure 3.4a) fixé à un socle en béton par l'intermédiaire d'un marbre. Il est composé de quatre colonnes de 3 m de hauteur reliées, sur leurs extrémités hautes, par un empilement sur deux étages de trois poutrelles IPN formant un « H ». Le substrat supérieur de l'éprouvette Arcan est isostatiquement relié à la poutrelle transversale du « H ». La liaison est réalisée par l'intermédiaire de deux systèmes à chapes/goupilles orientées à 90° de manière à former une rotule à doigt (cf. figure 3.4d). Le substrat inférieur de l'éprouvette Arcan est assemblé, par l'intermédiaire d'un système à chape/goupille, à une tige cylindrique appelée « barre de traction ». L'éprouvette est par

conséquent libre de tourner autour des deux axes des goupilles. La direction de chargement est toujours orientée suivant l'axe passant par les centres des deux alésages sollicités. La barre de traction fait 2,5 m de longueur. Elle se termine, en son extrémité basse, par une butée cylindrique qui correspond à la partie impactée du montage. L'impacteur est indépendant du montage et a une masse supérieure à 100 kg. Il est percé en son centre, sur l'intégralité de sa hauteur, afin de permettre le passage de la barre de traction. Durant sa chute, il est guidé sur ses deux extrémités latérales par les glissières de la tour de chute et n'est, par conséquent, jamais en contact avec la barre de traction.

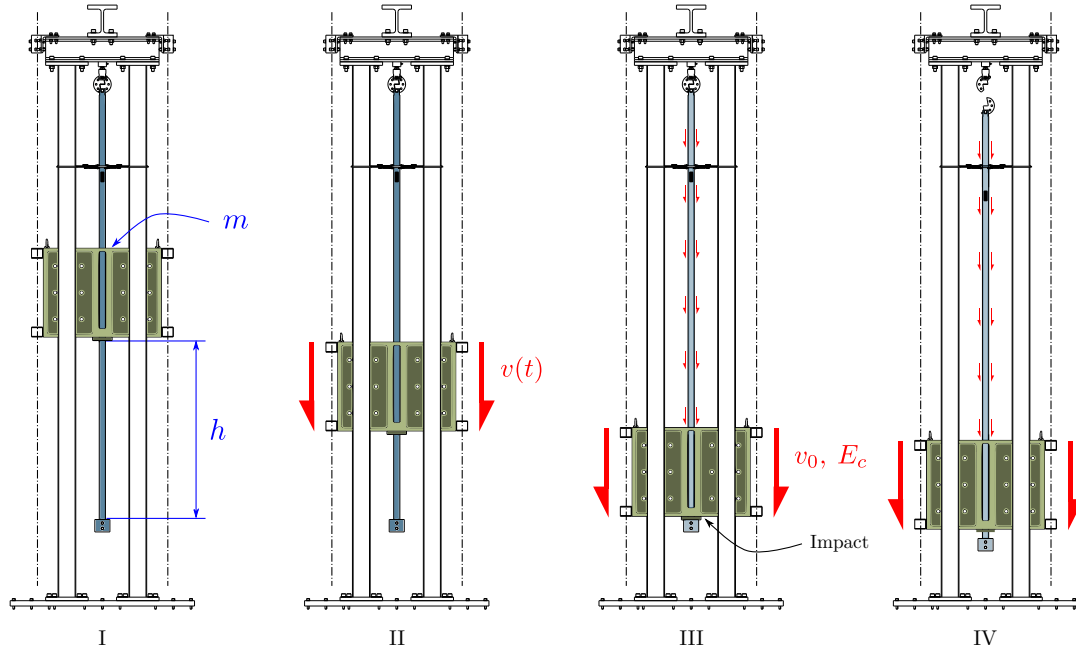


FIGURE 3.5 – Déroulement d'un essai sur le montage de traction dynamique.

Les étapes du déroulement d'un essai sont présentées sur la figure 3.5 :

- I L'impacteur de masse m est positionné à une distance h de la surface supérieure de la butée d'impact.
- II Il est ensuite lâché et chute verticalement, le long des guides, sous l'action de la gravité à une vitesse $v(t) \simeq g \times t$, où g est l'accélération de la pesanteur et t le temps.
- III Il impacte la butée à une vitesse initiale v_0 et avec une énergie cinétique E_c générant une onde de traction dans la barre.
- IV Cette dernière se propage dans la tige cylindrique jusqu'à l'éprouvette engendrant le chargement du joint de colle jusqu'à la rupture définitive.

En terme d'instrumentation, le dispositif dispose :

1. d'une cellule d'effort HBM[®] U9C de 50 kN fixée au dessus de l'éprouvette entre les deux chapes (cf. figure 3.4d & e).
2. de deux jauges de déformation de 350Ω , nommées J_1 et J_2 sur la figure 3.4b, collées en opposition sur la barre de traction suivant la direction y_0 ;
3. d'une caméra rapide Photron[®] FASTCAM SA4 (cf. figure 3.4e).

L'un des avantages de ce dispositif de traction dynamique est sa modularité en terme de chargement. En effet, il est possible d'impacter la butée avec une vitesse initiale allant d'approximativement 1 m.s^{-1} à $5,5 \text{ m.s}^{-1}$ avec un impacteur dont la masse est comprise entre 100 kg et 300 kg. Ces paramètres d'essai permettent d'obtenir une gamme d'énergie d'entrée allant de $5 \times 10^1 \text{ J}$ à $5 \times 10^3 \text{ J}$.

3.2.2 Dimensionnement

Le dimensionnement de ce dispositif a porté sur deux zones d'étude : la barre de traction et le châssis.

Dimensionnement de la barre de traction

Le dimensionnement de la barre de traction est important car il s'agit de l'élément du montage qui sollicite directement l'éprouvette. Par conséquent, le choix judicieux de la géométrie et du matériau constituant cette barre est essentiel pour obtenir un chargement monotone du joint de colle jusqu'à la rupture.

Dans le cadre du dispositif présenté, le chargement de l'éprouvette résulte d'une onde de traction provenant de la barre de sollicitation qui est générée par l'impact du poids tombant sur la butée. Pour assurer la monotonie du chargement, il est donc nécessaire que la rupture de l'adhésif intervienne à partir du premier front d'onde incident de la barre.

Afin d'identifier les paramètres qui vont contrôler le front d'onde dans la barre, une première étude éléments finis a été menée sur un système masse/ressort simple dont une extrémité est libre (schéma de la figure 3.6).

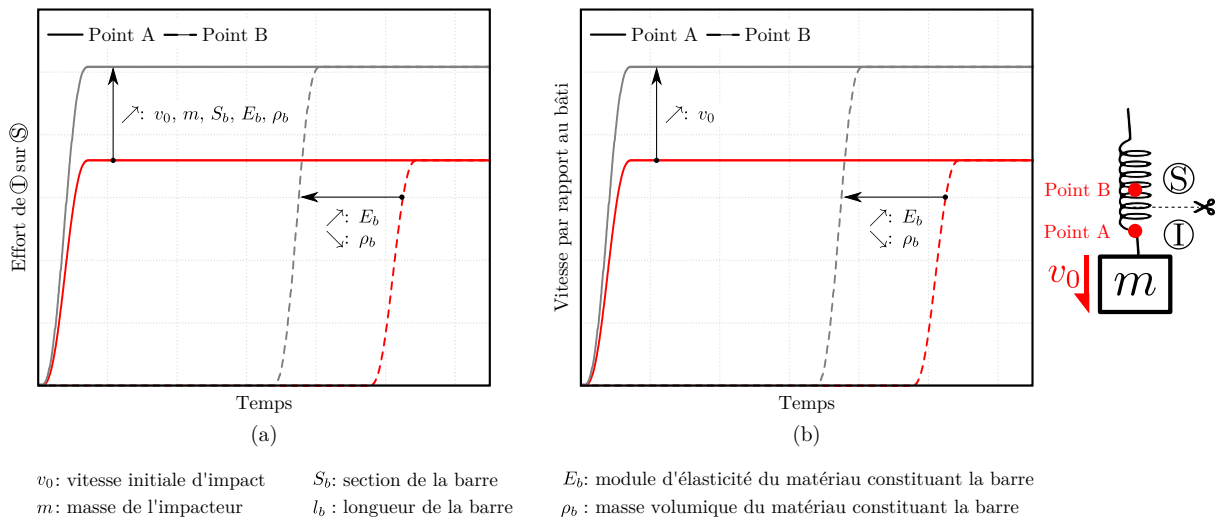


FIGURE 3.6 – Influence des différents paramètres mis en jeu sur l'amplitude et le temps de propagation de l'onde de choc dans un ressort sollicité en dynamique. (a) En effort. (b) En vitesse de sollicitation.

La barre de sollicitation est représentée par un ressort. Celui-ci est modélisé par des éléments T2D2 dont le comportement est purement élastique. Le poids tombant est représenté par une

masse ponctuelle m dotée d'une vitesse initiale v_0 appliquée sur le nœud inférieur du ressort. L'extrémité supérieure du ressort est arbitrairement laissée libre d'effort. Cette condition limite modélise une éprouvette de raideur nulle.

Deux points d'analyse ont été définis pour l'étude : le point A est proche du nœud sollicité et le point B est situé au milieu du ressort. Les évolutions de l'effort et de la vitesse de sollicitation au cours du temps sont extraites en ces deux points.

Trois familles de paramètres ont été investiguées :

- m et v_0 sont des paramètres d'essais.
- E_b et ρ_b sont des paramètres matériaux. Ils correspondent au module d'élasticité et à la masse volumique du matériau constituant le ressort.
- S_b et l_b sont des paramètres géométriques. Ils correspondent à la section et à la longueur libre du ressort.

La réponse du système masse/ressort étudié est représentée sur la figure 3.6 pour différents jeux de paramètres. L'amplitude du front d'onde dépend des paramètres d'essais m & v_0 , des paramètres matériaux E_b & ρ_b et de la section S_b du ressort. Plus ces paramètres sont importants, plus l'amplitude de l'onde de propagation est élevée (cf. figure 3.6a). La vitesse de sollicitation dépend uniquement de la vitesse initiale d'impact v_0 (cf. figure 3.6b). La vitesse de propagation de l'onde dans le ressort v_b est définie telle que $v_b = \sqrt{\frac{E_b}{\rho_b}}$ (cf. figure 3.6). L'ensemble de ces résultats peut être retrouvé *via* les équations liés à la physique de propagation des déformations en traction uniaxiale [Graff, 2012].

Dans le cadre du dispositif proposé, le chargement de l'éprouvette débute lorsque l'onde de sollicitation arrive à l'extrémité supérieure de la barre de traction. À ce moment, une partie de l'onde incidente est transmise à l'éprouvette et l'autre est réfléchie dans la barre. Il existe donc une interaction, entre l'éprouvette et la barre de traction, qui a une influence sur le chargement de l'échantillon. Afin de l'étudier, une seconde étude éléments finis a été menée par le même modèle masse/ressort.

Deux conditions limites différentes ont été imposées au nœud localisé à l'extrémité supérieure du ressort : il est libre d'effort dans le premier cas et encastré dans le second (schémas de la figure 3.7). Cela permet de simuler une éprouvette dont la raideur est quasi-nulle et une éprouvette considérée comme un solide rigide indéformable bornant le domaine d'étude. Les résultats normalisés associés à ces deux études sont présentés sur la figure 3.7. Pour les besoins de l'étude, un point supplémentaire d'analyse C a été défini, proche du nœud situé à l'extrémité supérieure du ressort (*i.e.* au point de chargement de l'éprouvette).

Quelle que soit la configuration (libre ou encastrée), l'onde de sollicitation est identique sur le trajet aller c'est-à-dire avant d'atteindre l'extrémité supérieure du ressort, mais diffère par la suite. Dans le cas d'un ressort libre, étant donné qu'aucune réaction ne s'oppose à la sollicitation, l'équilibre en effort est obtenu par un retour élastique du ressort (*i.e.* par une onde réfléchie de compression). De fait, le point C situé à l'extrémité supérieure subit seulement un effort lié à sa mise en mouvement (cf. figure 3.7a) et se déplace à une vitesse deux fois supérieure à la vitesse imposée par la masse. Ce phénomène est lié au cumul des déplacements imposés par la masse et du retour élastique (cf. figure 3.7b). Dans le cas d'un ressort encastré, il existe une réaction permettant d'obtenir l'équilibre en effort du système. De fait, le nœud situé à l'extrémité supérieure subit un déplacement nul (cf. figure 3.7d) mais est chargé par un effort dont l'amplitude est deux fois supérieure à celle de l'onde incidente. Ce phénomène est lié au cumul des amplitudes des ondes incidente et réfléchie de traction (cf. figure 3.7c). Finalement, cette étude met en évidence le rôle important de la liaison entre la barre de chargement et le bâti *via* l'éprouvette.

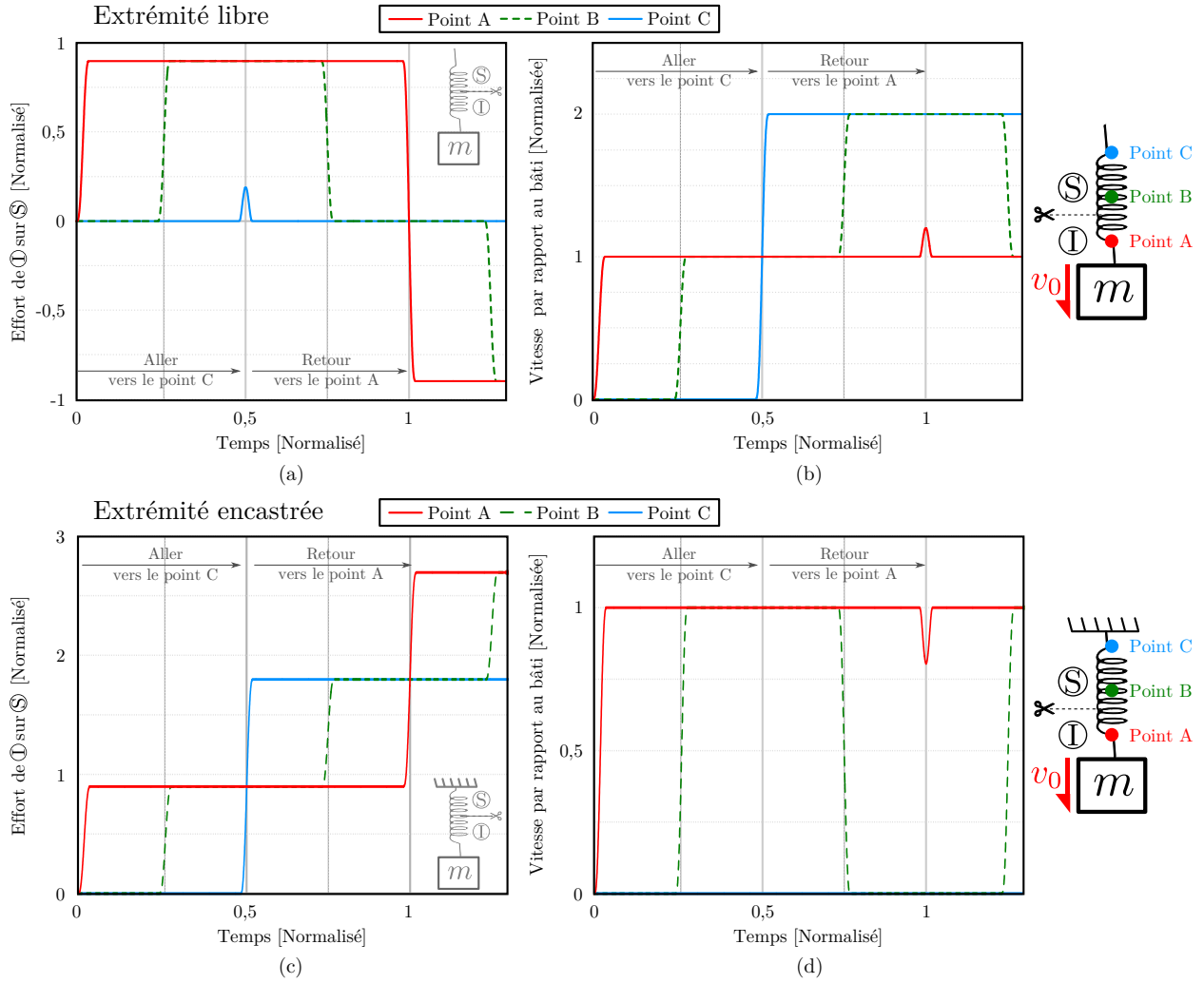


FIGURE 3.7 – Comportement dynamique, (a) en effort et (b) en vitesse de sollicitation, d'un ressort dont une extrémité est libre. Comportement dynamique, (c) en effort et (d) en vitesse de sollicitation, d'un ressort dont une extrémité est encastree.

Afin de mieux comprendre l'évolution du flux d'effort au cours du temps dans l'éprouvette, une troisième étude éléments finis est proposée. Elle implique deux ressorts associés en série (schéma de la figure 3.8). Le premier ressort modélise la barre de chargement (de section S_b et de longueur l_b) et le second l'éprouvette (de section $S_e = 0,1 \times S_b$ et de longueur $l_e = 0,1 \times l_b$). Les deux ressorts ont la même masse volumique $\rho_b = \rho_e$ et le même module d'élasticité $E_b = E_e$. L'extrémité supérieure du ressort éprouvette est encastree au bâti. Son extrémité inférieure est connectée au ressort barre. Pour les besoins de l'étude un point d'analyse D a été défini au centre du ressort éprouvette (*i.e.* au niveau de l'adhésif). Les résultats normalisés associés à cette étude sont présentés sur la figure 3.8.

L'onde de traction incidente de la barre (d'amplitude notée « F_{inc} » sur la figure 3.8a) se sépare en une onde transmise de traction (d'amplitude « F_{tran} ») et réfléchie de compression (d'amplitude $F_{réf} = F_{inc} - F_{tran}$) lorsqu'elle est au point de jonction barre/éprouvette. L'amplitude de la première onde de traction transmise par la barre F_{tran} est fonction des paramètres E_e , ρ_e et S_e associés au ressort éprouvette (cf. figure 3.8a). L'effort qui transite

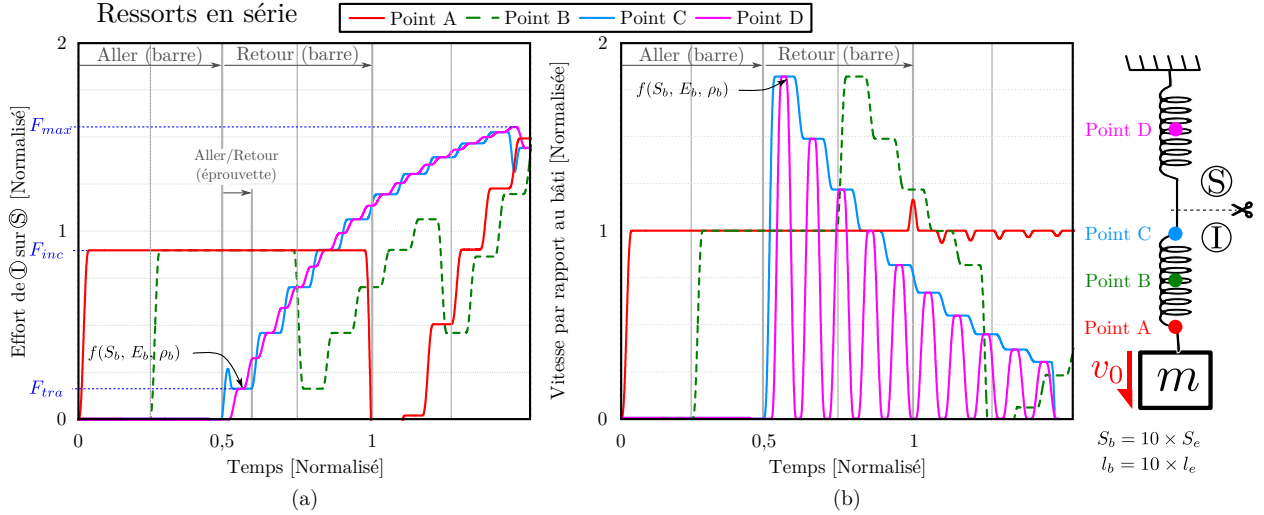


FIGURE 3.8 – Comportement dynamique, (a) en effort et (b) en vitesse de sollicitation, de deux ressorts en série.

dans l'éprouvette au point D monte par paliers successifs. Ce phénomène s'explique par la superposition des ondes incidente et réfléchie de traction dans l'éprouvette au point d'encastrement. Il est fonction de la vitesse de propagation de l'onde dans l'éprouvette et de la différence de longueur existant entre les deux ressorts. L'effort maximal atteint à partir de la première onde incidente de la barre de chargement est noté F_{max} sur la figure 3.8a. Sa valeur dépend de l'amplitude de la première onde transmise ainsi que des temps de propagation des ondes dans les deux ressorts. Elle peut atteindre une amplitude maximale deux fois supérieure à celle de l'onde incidente.

Ces derniers résultats confirment l'importance de la prise en compte des paramètres géométriques et matériaux liés à l'éprouvette pour le dimensionnement de la barre de traction.

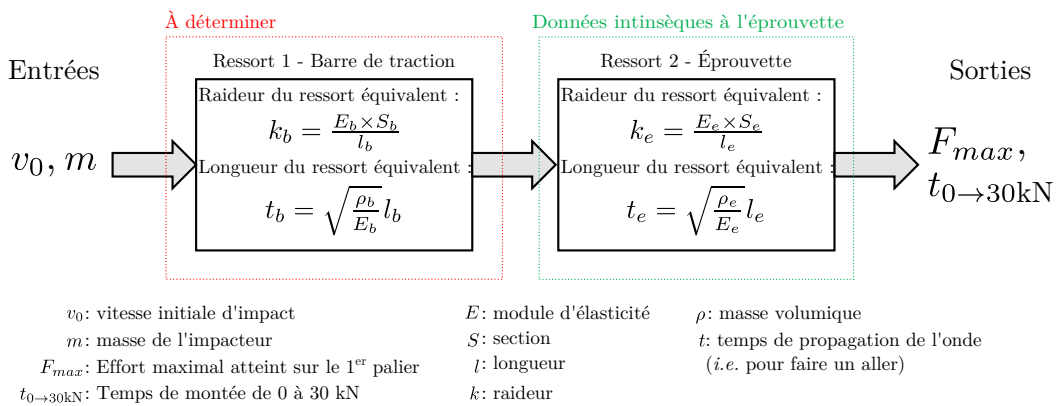


FIGURE 3.9 – Représentation schématique du problème de dimensionnement associé au montage de sollicitation.

Finalement, ces trois études intermédiaires simples ont permis d'identifier les différents paramètres influant sur l'amplitude et la manière dont se propage l'onde de sollicitation dans

le montage. Les observations réalisées permettent de définir une démarche de dimensionnement en deux étapes, schématisées sur la figure 3.9 :

1. Identification des paramètres associés au ressort équivalent à l'éprouvette Arcan optimisée pour chaque configurations de chargement ($\gamma = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ et 135°).
2. Identification des paramètres associés au ressort équivalent à la barre de traction permettant d'obtenir la rupture de l'échantillon sur le premier front d'onde pour un couple de paramètres d'essai m et v_0 donné.

Afin de déterminer le ressort équivalent à l'éprouvette Arcan optimisée pour chaque configuration de chargement, il est nécessaire d'identifier les jeux de paramètres (E_e, S_e, l_e) et (E_e, ρ_e, l_e). Ils doivent permettre d'obtenir la même raideur k_e d'éprouvette ainsi que le même temps de propagation t_e de l'onde dans l'échantillon. Le modèle éléments finis présenté pour l'évaluation de la tenue mécanique de l'éprouvette Arcan est réutilisé à cet effet. Les réponses mécaniques en effort-déplacement obtenues pour un effort imposé de 9 kN sont tracées sur la figure 3.10a. Elles permettent d'extraire les raideurs associées aux différentes configurations de l'éprouvette Arcan optimisée.

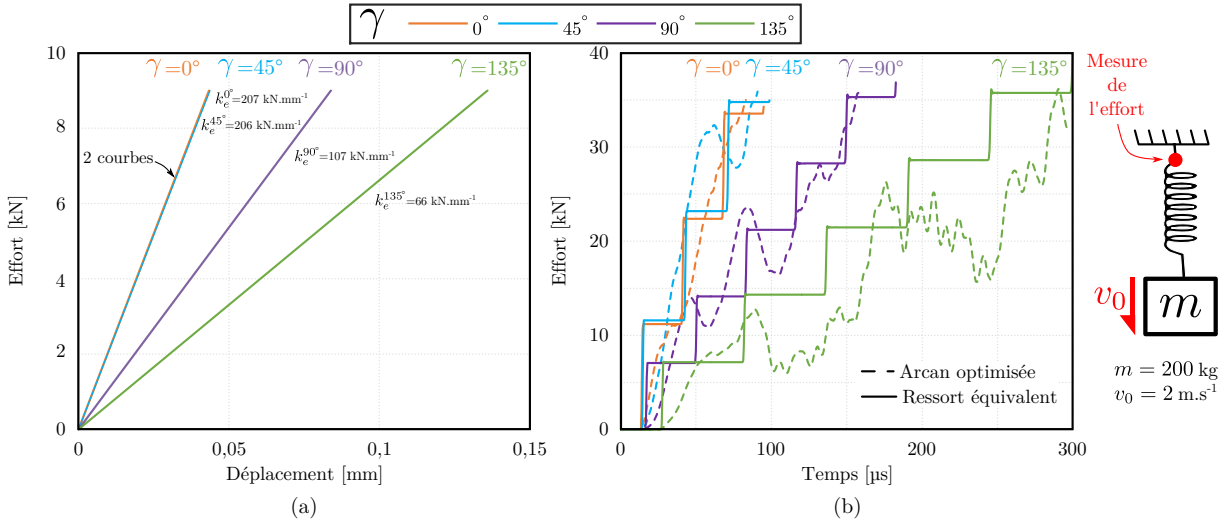


FIGURE 3.10 – (a) Détermination de la raideur de l'éprouvette Arcan optimisée pour les quatre configurations de chargement ($F_{\text{imposé}} = 9 \text{ kN}$). (b) Comparaison des réponses mécaniques en dynamique de l'éprouvette Arcan modifiée et des ressorts équivalents associés, pour les quatre configurations de chargement ($m = 200 \text{ kg}$ et $v_0 = 2 \text{ m.s}^{-1}$).

Afin de mesurer le temps de propagation t_e que met l'onde de sollicitation pour passer du point de chargement à l'encastrement, le modèle éléments finis utilisé a été adapté. Les conditions de chargement dynamique m et v_0 ont été appliquées et un schéma d'intégration explicite a été utilisé.

À partir des données k_e et t_e extraites des simulations, il est possible de déterminer les paramètres équivalents S_e et l_e en fixant arbitrairement les paramètres matériaux E_e et ρ_e .

La figure 3.10b présente une comparaison des réponses mécaniques en dynamique de l'éprouvette Arcan optimisée et des ressorts équivalents identifiés associés. Les résultats sont extraits au nœud encastré pour les quatre configurations de chargement. Ils sont obtenus pour une vitesse initiale imposée de 2 m.s^{-1} et une masse ponctuelle de 200 kg .

Sur l'exemple des résultats en compression-cisaillement, le temps de calcul total s'élève à 42 min pour le modèle fidèle à la géométrie d'éprouvette (résultat en pointillé, calcul lancé sur deux processeurs et vingt cœurs) et d'environ 2 s pour le ressort équivalent associé (résultat en trait continu, calcul lancé sur un processeur et six cœurs) pour un temps virtuel d'essai de 300 μ s. Malgré la simplicité des modèles associés aux ressorts équivalents, les résultats montrent que leur utilisation pour une étude de dimensionnement est appropriée.

Le modèle éléments finis composé de deux ressorts en série est utilisé pour dimensionner la barre de traction (*i.e.* pour déterminer sa section S_b). Seule la configuration de compression-cisaillement est considérée pour l'étude. En effet, l'éprouvette est plus souple dans cette configuration que dans les autres. Par conséquent, si la barre de traction est dimensionnée pour l'éprouvette Arcan optimisée en configuration de compression-cisaillement, elle l'est également pour les autres.

Les propriétés du matériau constituant le ressort équivalent à la barre de traction correspondent à un acier : $E_b = 210$ GPa, $\rho_b = 7600$ kg.m⁻³ et $\nu_b = 0,3$. Sa longueur est arbitrairement fixée $l_b = 2,5$ m afin de pouvoir faire varier la hauteur de chute de l'impacteur jusqu'à 1,6 m. Les conditions initiales d'essais appliquées au modèle correspondent à la limite basse d'utilisation de la tour de chute, *i.e.* $m = 100$ kg et $v_0 = 1,5$ m.s⁻¹ (correspondant à une hauteur de chute d'environ 10 cm).

L'évolution de deux paramètres est étudiée en fonction de la section S_b :

1. $t_{0 \rightarrow 30 \text{ kN}}$ correspond au temps que met l'onde transmise pour passer d'un effort nul à un effort de 30 kN.
2. F_{max} correspond à l'effort maximal atteint par l'onde transmise à partir du premier front d'onde incident de la barre de traction.

Ces paramètres sont extraits au centre du ressort modélisant l'éprouvette (*i.e.* au niveau de l'adhésif).

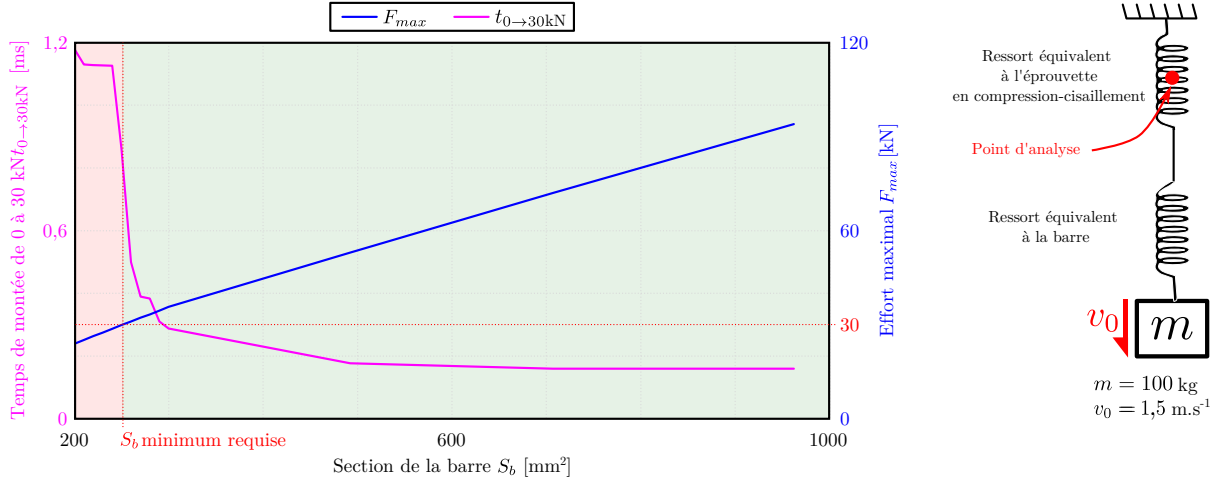


FIGURE 3.11 – Détermination de la section critique de la barre de traction pour un essai en compression-cisaillement avec $m = 100$ kg et $v_0 = 1,5$ m.s⁻¹.

Les résultats issus de cette étude sont présentés sur la figure 3.11. D'une part, ils montrent que pour obtenir un effort maximal F_{max} supérieur à 30 kN, une barre de section S_b supérieure à 250 mm² est nécessaire. D'autre part, ils font apparaître que le temps de montée $t_{0 \rightarrow 30 \text{ kN}}$ tend vers une asymptote de 160 μ s pour des sections S_b supérieures à 500 mm².

Les propriétés mécaniques d'autres matériaux (alliage d'aluminium, etc.) ont été investiguées. Pour des questions de coût ainsi que de capacité de mise en œuvre, l'acier a finalement été adopté pour la fabrication de la barre de traction. La barre dimensionnée choisie est cylindrique pleine de diamètre 35 mm ($S_b = 962 \text{ mm}^2$).

Les résultats tracés sur la figure 3.12 présentent le comportement dynamique du montage dimensionné dans le cas d'un essai de compression-cisaillement. Les courbes sont extraites du modèle éléments finis représentant le système à masse et deux ressorts en série. Les conditions initiales d'essais sont $m = 100 \text{ kg}$ et $v_0 = 1,5 \text{ m.s}^{-1}$.

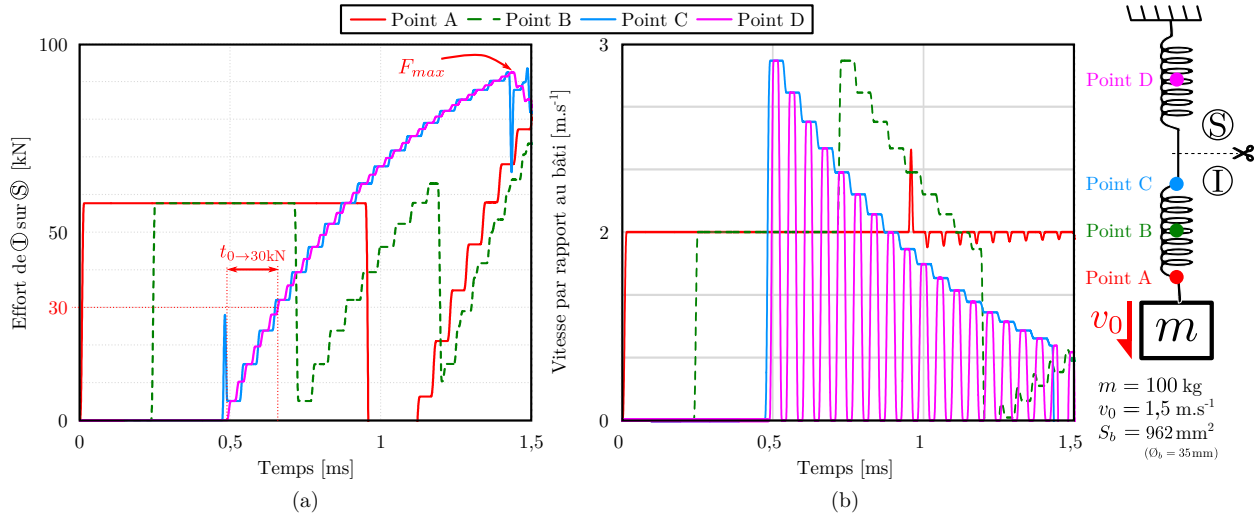


FIGURE 3.12 – Comportement dynamique, (a) en effort et (b) en vitesse de sollicitation, du montage dimensionné (essai en compression-cisaillement, $m = 100 \text{ kg}$ et $v_0 = 1,5 \text{ m.s}^{-1}$).

Dans la configuration d'essai la plus défavorable, les courbes montrent que la barre de traction identifiée permet d'assurer la monotonie du chargement jusqu'à la rupture du joint de colle (*i.e.* jusqu'à un effort d'environ 30 kN). Les résultats issus de cette simulation confirment ainsi les choix de dimensionnement effectués.

Dimensionnement du châssis

Le dimensionnement du châssis a porté essentiellement sur l'analyse vibratoire et en flambage de la structure. Les procédures perturbation linéaire/fréquence et perturbation linéaire/flambage d'Abaqus® [Abaqus, 2012] ont été utilisées. Ces deux études ont mis en évidence la présence de modes de vibration et de flambage associés à des mouvements de bascule du châssis. Afin de bloquer ces mouvements, deux cales ajustables ont été ajoutées sur la partie haute du montage. Elles sont composées d'une rainure cylindrique qui épouse la forme des deux glissières de la tour de chute. Ce montage additionnel permet de forcer la structure à travailler suivant la direction longitudinale aux axes des colonnes.

Le moyen d'essais étant développé, il reste à valider les choix de conception *via* une étude expérimentale.

3.3 Validation expérimentale du moyen d'essais

La validation expérimentale du moyen d'essais développé est traitée dans cette section. La démarche de validation doit permettre de répondre à deux questions principales :

1. Le moyen d'essais développé répond-il au cahier des charges ?
2. Quelles sont ses limites en terme de capacité de chargement ?

L'adhésif et le procédé de mise en œuvre utilisés dans l'étude prospective sont réemployés pour la campagne de validation.

3.3.1 Analyse du chargement de l'éprouvette

Des exemples de signaux d'efforts enregistrés à une fréquence d'acquisition de 1 MHz sont tracés sur la figure 3.13.

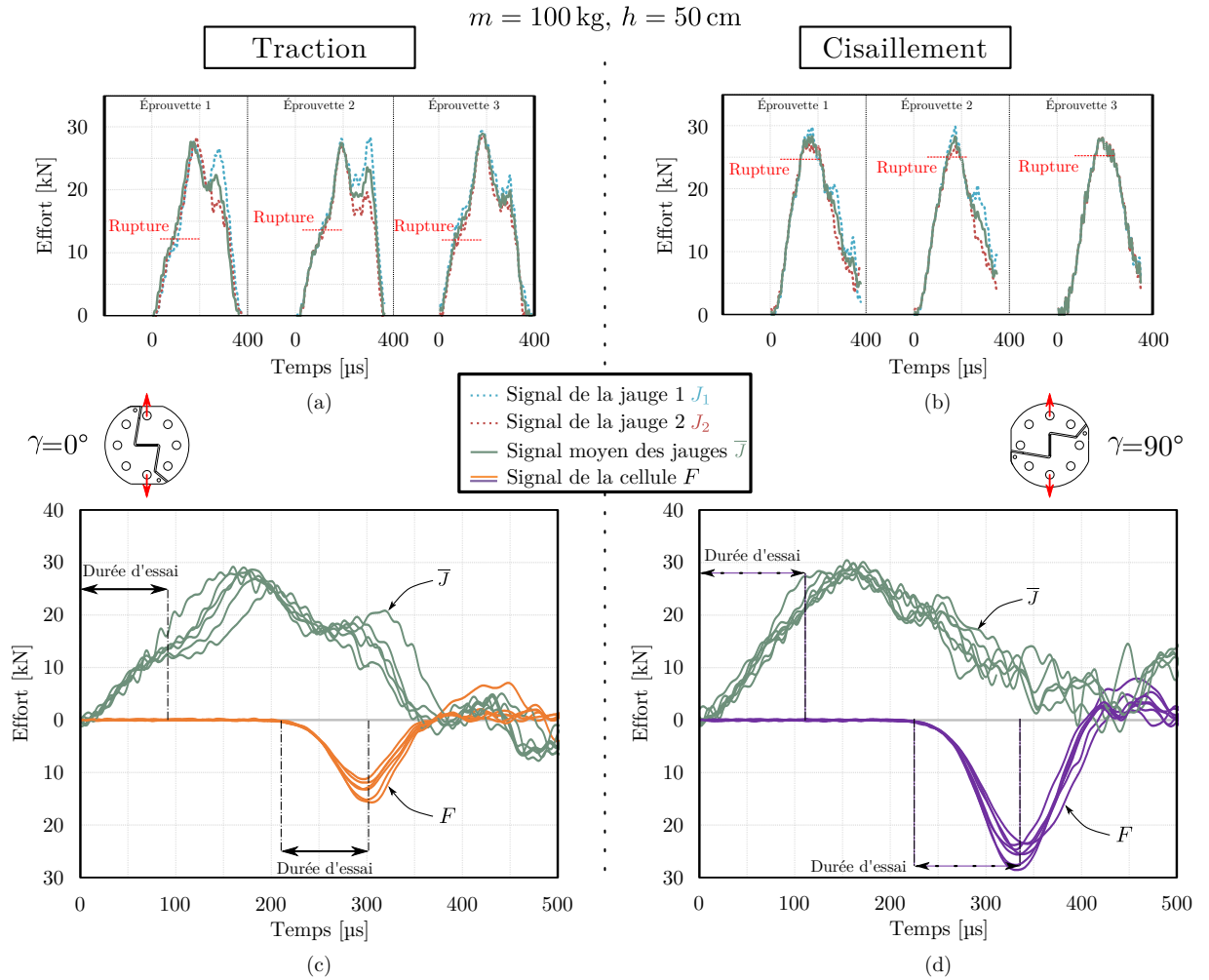


FIGURE 3.13 – Chargements obtenus avec le dispositif développé sur la caractérisation d'un adhésif Araldite® 420 A/B avec $m = 100 \text{ kg}$ et $h = 0,5 \text{ m}$. Comparaison des signaux des jauges en (a) traction et (b) cisaillement. Évolutions dans le temps des signaux moyens des jauges et de la cellule d'effort en (c) traction et (d) cisaillement.

Ils sont extraits d'essais de traction (cf. figures 3.13a & c) et de cisaillement (cf. figures 3.13b & d) réalisés sur l'éprouvette modifiée avec le dispositif de traction dynamique pour un impacteur de 100 kg lâché à une hauteur de 0,5 m.

Les signaux des jauges $J_1(t)$ et $J_2(t)$ sont tracés en pointillés bleus et rouges sur les figures 3.13a & b. Les moyennes $\bar{J}(t) = \frac{1}{2}(J_1(t) + J_2(t))$ sont tracées en trait plein vert sur ces mêmes figures. Ils ont la dimension d'un effort et sont calculés à partir de l'équation suivante : $J = E_b S_b \varepsilon_{y_0}$ où ε_{y_0} , E_b et S_b correspondent respectivement à la dilatation linéique relative mesurée par la jauge, au module d'Young et à la section de la barre.

Les signaux mesurés par la cellule d'effort $F(t)$ sont tracés en traits continus oranges et violets. Ils sont associés aux signaux moyens des jauges $\bar{J}$.

Les ondes de sollicitation vues par la cellule d'effort ainsi que les jauges de déformation ont une forme ainsi qu'une amplitude répétables. Les résultats tracés sur les figures 3.13c & d montrent également que la rupture de l'adhésif est toujours obtenue à partir du premier front d'onde incident de la barre. Enfin, les signaux $\bar{J}(t)$, $J_1(t)$ et $J_2(t)$ sont toujours superposés avant la rupture de l'adhésif. Cela signifie que la barre de traction n'est soumise qu'à un chargement uniaxial de type traction/compression durant l'essai (*i.e.* qu'il n'y a pas de flexion transverse).

Les observations faites sur ces deux configurations peuvent être étendues aux résultats issus d'essais sous des sollicitations combinées, sur d'autres adhésifs et pour des conditions initiales d'essais différentes ($h \in [20, 60]$ cm et $m \in [100, 300]$ kg).

3.3.2 Comparaison des éprouvettes Arcan TCS et Arcan optimisée pour la dynamique

Afin de valider l'éprouvette Arcan optimisée pour la dynamique, deux campagnes d'essais comparatives avec des éprouvettes Arcan TCS originales ont été réalisées : la première en quasi-statique ($v = 0,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) et la seconde en dynamique ($h = 50 \text{ cm}$ et $m = 300 \text{ kg}$). Les dimensions du joint de colle sont identiques d'une éprouvette à une autre (25 mm de longueur par 10 mm de largeur et 0,4 mm d'épaisseur) et un minimum de deux essais a été mené par configuration de chargement.

Résultats en effort-déplacement

Les résultats en effort-déplacement tracés sur la figure 3.14 sont obtenus pour des sollicitations quasi-statiques.

Globalement, les mêmes niveaux d'efforts sont rencontrés pour les deux types d'éprouvette. En revanche, des divergences apparaissent sur les niveaux des déformations. En effet, notamment pour les configurations en traction, traction-cisaillement et cisaillement, les réponses extraites des éprouvettes Arcan TCS sont plus souples que celles des éprouvettes Arcan optimisée. Par exemple, des écarts relatifs de l'ordre de 35 % et 50 % sont mesurés sur les raideurs longitudinale et de cisaillement (cf. figures 3.14a & b). Ces variations peuvent s'expliquer par la localisation des deux zones sur lesquelles sont réalisées les extractions des déplacements. Effectivement, les déplacements de corps rigides calculés lors des essais résultent à la fois de la déformation du joint de colle mais également de celle des « becs », situés entre les deux zones analysées. Le diamètre des becs rayonnés de l'éprouvette optimisée étant six fois plus petits que celui de l'éprouvette Arcan TCS, les zones d'analyses sont, par conséquent, plus proches de la zone de recouvrement.

Les résultats tracés sur la figure 3.15 présentent les comportements mécaniques obtenus pour des sollicitations dynamiques.

Les mêmes observations peuvent être faites concernant les raideurs. En revanche, les écarts sont moins marqués entre les deux types d'éprouvettes (de l'ordre de 5 % et 35 % mesurées sur les raideurs longitudinale et de cisaillement, cf. figures 3.15a & b).

Concernant le dimensionnement, l'éprouvette Arcan TCS a plastifié en configuration de compression-cisaillement générant des résultats erronés (cf. figures 3.15e & f). En revanche, aucune déformation irréversible n'a été observée sur les substrats de l'éprouvette optimisée lors des différents essais. Ces derniers résultats valident le dimensionnement de l'éprouvette en dynamique.

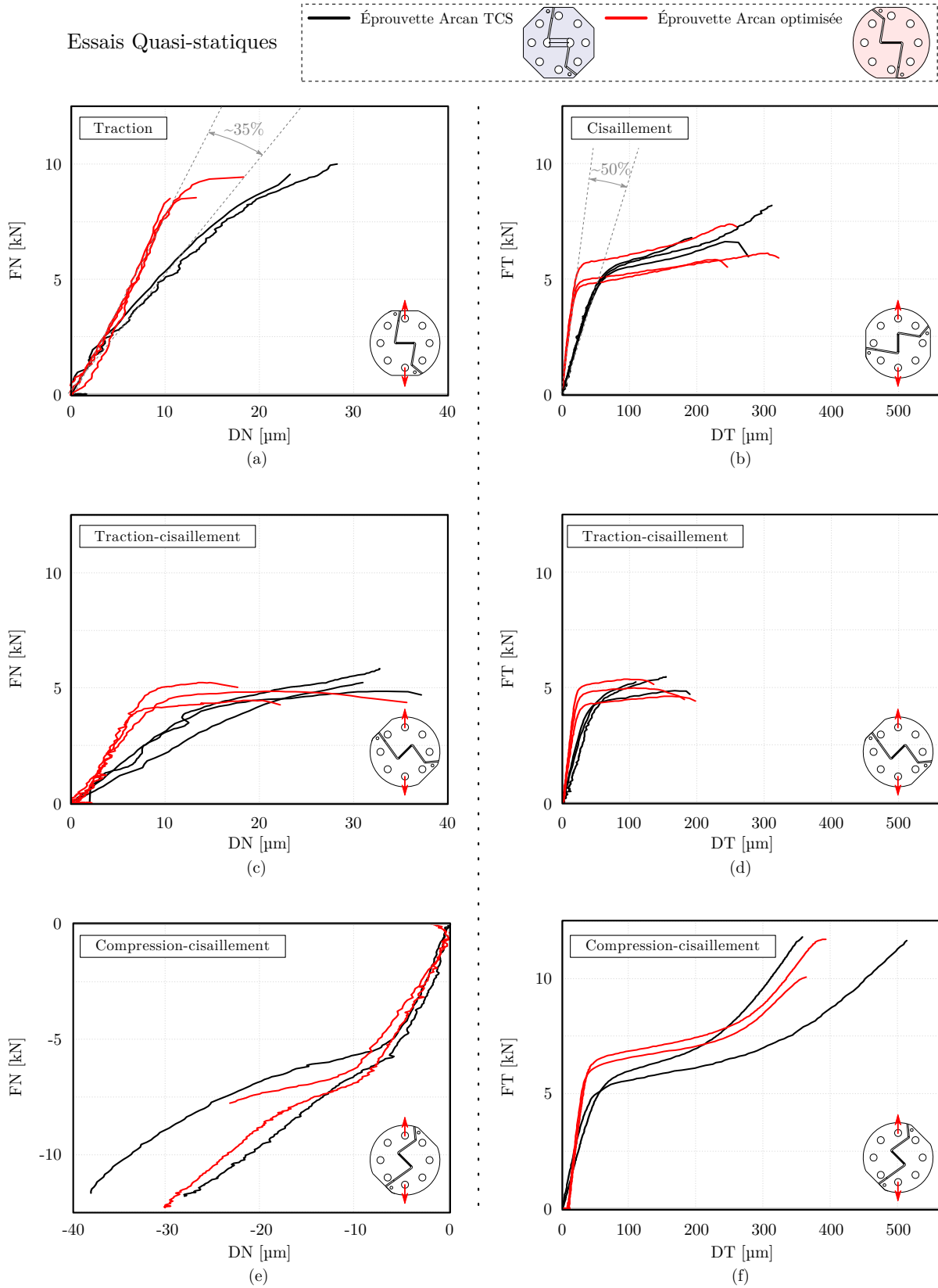


FIGURE 3.14 – Comparaison des résultats en effort-déplacement obtenus en quasi-statique ($v = 0,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) avec les éprouvettes Arcan TCS et Arcan optimisée pour la dynamique.

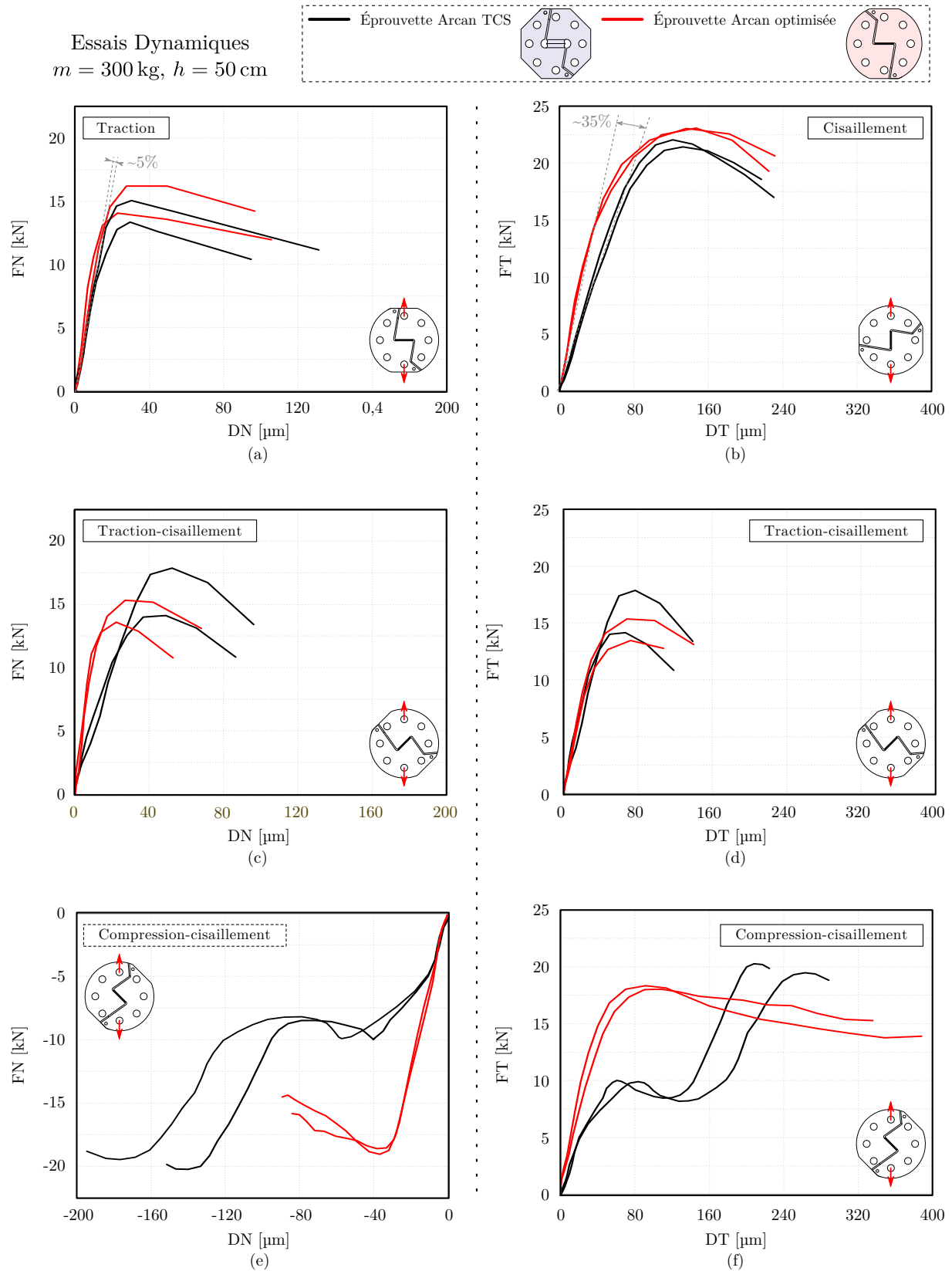


FIGURE 3.15 – Comparaison des résultats en effort-déplacement obtenus en dynamique ($h = 50 \text{ cm}$ – $m = 300 \text{ kg}$) avec les éprouvettes Arcan TCS et Arcan optimisée pour la dynamique.

Méthode d'extraction des données en contrainte moyenne équivalente - déformation moyenne

Dans le cadre de la caractérisation des adhésifs dans un montage de type Arcan classique, il est commun d'extraire les données en effort-déplacement. Les données structures qui en résultent sont difficiles à exploiter car elles incluent des renseignements associés à la géométrie de l'échantillon testé et au moyen d'essai utilisé (géométrie, raideur, position des capteurs, etc.).

Une méthode de dépouillement en « contrainte moyenne équivalente »-« déformation moyenne » est proposée dans cette section.

Afin d'extraire les déformations moyennes, les déplacements calculés des quatre extrémités de l'adhésif sont exploités. À partir de ces données et de l'utilisation des fonctions de forme d'un élément fini quadrangle linéaire de type Q4, il est possible de calculer un champ de déformation ϵ associé à l'adhésif (cf. figure 3.16). Plus précisément, une estimation de ses composantes normale ϵ_{yy} et tangentielle ϵ_{xy} peut être obtenue.

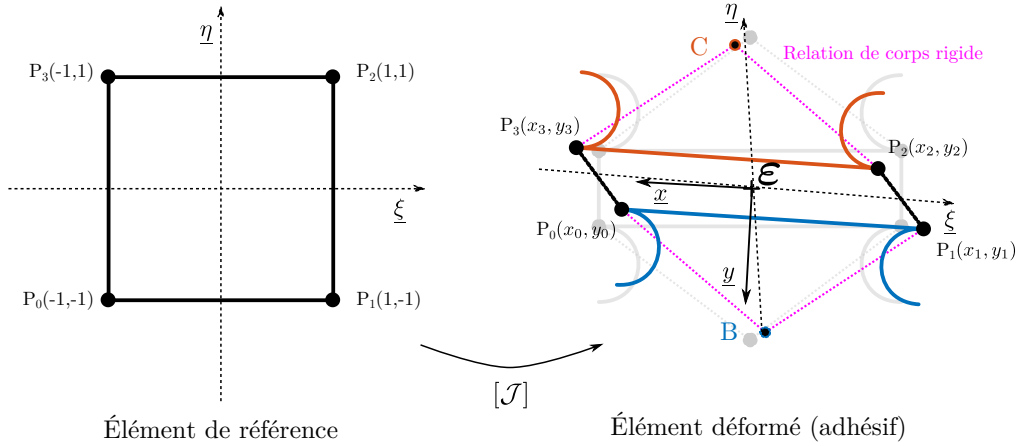


FIGURE 3.16 – Introduction d'un élément fini Q4 (P_0, P_1, P_2, P_3) pour l'extraction des déformations dans l'adhésif.

Les déformations s'expriment en fonction des déplacements normal $u(M)$ et tangential $v(M)$ d'un point $M(x, y)$ appartenant à l'élément déformé :

$$\epsilon_{yy}(M) = \frac{\partial v(M)}{\partial y} \quad \text{et} \quad \epsilon_{xy}(M) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u(M)}{\partial y} + \frac{\partial v(M)}{\partial x} \right) \quad (3.2)$$

Les fonction d'interpolation de d'éléments Q4 définies dans l'espace paramétrique $(\xi, \eta) \in [-1; 1]^2$ sont données par :

$$\begin{aligned} N_0(\xi, \eta) &= (1 - \xi)(1 - \eta)/4 & N_2(\xi, \eta) &= (1 + \xi)(1 + \eta)/4 \\ N_1(\xi, \eta) &= (1 + \xi)(1 - \eta)/4 & N_3(\xi, \eta) &= (1 - \xi)(1 + \eta)/4 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Elles permettent d'exprimer les déplacements d'un point $M(\xi, \eta)$ à partir des déplacements normal u_k et tangential v_k associés aux nœuds k de l'élément fini tel que :

$$u(M) = \sum_{k=0}^3 N_k(\xi, \eta) u_k \quad \text{et} \quad v(M) = \sum_{k=0}^3 N_k(\xi, \eta) v_k \quad (3.4)$$

Les déformations deviennent donc :

$$\varepsilon_{yy}(M) = \sum_{k=0}^3 \frac{\partial N_k(\xi, \eta)}{\partial y} v_k \quad \text{et} \quad \varepsilon_{xy}(M) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^3 \left(\frac{\partial N_k}{\partial y} u_k + \frac{\partial N_k}{\partial x} v_k \right) \quad (3.5)$$

avec :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_k(\xi, \eta)}{\partial x} \\ \frac{\partial N_k(\xi, \eta)}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial x} & \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ \frac{\partial \xi}{\partial y} & \frac{\partial \eta}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_k(\xi, \eta)}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_k(\xi, \eta)}{\partial \eta} \end{bmatrix} = [\mathcal{J}]^{-1}(\xi, \eta) \begin{bmatrix} \frac{\partial N_k(\xi, \eta)}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_k(\xi, \eta)}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$[\mathcal{J}](\xi, \eta)$ est la matrice jacobienne. Elle permet le passage de l'élément déformé à l'élément de référence (cf. figure 3.16) et est définie par :

$$[\mathcal{J}](\xi, \eta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial x}{\partial \eta} \\ \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=0}^3 \frac{\partial N_k(\xi, \eta)}{\partial \xi} x_k & \sum_{k=0}^3 \frac{\partial N_k(\xi, \eta)}{\partial \eta} x_k \\ \sum_{k=0}^3 \frac{\partial N_k(\xi, \eta)}{\partial \xi} y_k & \sum_{k=0}^3 \frac{\partial N_k(\xi, \eta)}{\partial \eta} y_k \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

où x_k et y_k correspondent à la position des nœuds k de l'élément fini.

Dans la suite du document, les déformations moyennes normale ε_{yy} et tangentielle ε_{xy} sont estimées au point $M(0,0)$, c'est-à-dire au centre de l'élément.

Les contraintes moyennes équivalentes normale σ_{yy} et tangentielle σ_{xy} vues par l'adhésif, sont calculées en divisant les valeurs calculées de l'effort normal et tangentiel par la section travaillante de l'adhésif.

Ces composantes calculées doivent être considérées comme des valeurs estimées. Elles sont uniquement pertinentes si la distribution des contraintes dans l'adhésif est quasi-uniforme, ce qui a été numériquement démontré lorsque des conditions d'essais adéquates évoquées dans l'étude prospective sont réunies.

Résultats en contrainte moyenne équivalente - déformation moyenne

Les essais comparatifs, précédemment analysés en effort-déplacement, ont été dépouillés en contrainte moyenne équivalente-déformation moyenne avec la méthode présentée. Les courbes obtenues sont tracées sur les figures 3.17 & 3.18.

Les résultats extraits avec les deux méthodes de post-traitement montrent des réponses mécaniques similaires pour les deux types d'éprouvette. Les écarts relatifs mesurés entre les modules élastiques apparents et les niveaux des contraintes obtenus avec les éprouvettes Arcan TCS et modifiée sont identiques à ceux mesurés entre les raideurs et les niveaux d'effort. Il est à noter que les modules apparents identifiés en traction E et en cisaillement G à partir des résultats quasi-statiques associés à l'éprouvette optimisée ($E = 1400$ MPa et $G = 750$ MPa, cf. figures 3.17a & b) sont relativement proches des valeurs données par Huntsman™ dans [Huntsman, 2009] ($E = 1495$ MPa et $G = 730$ MPa, mesurées à partir des essais massiques normalisés ISO 527 [ISO 527-2, 2012] et ISO 6721 [ISO 6721, 2011]).

Ces résultats valident à nouveau le dimensionnement de l'éprouvette Arcan modifiée

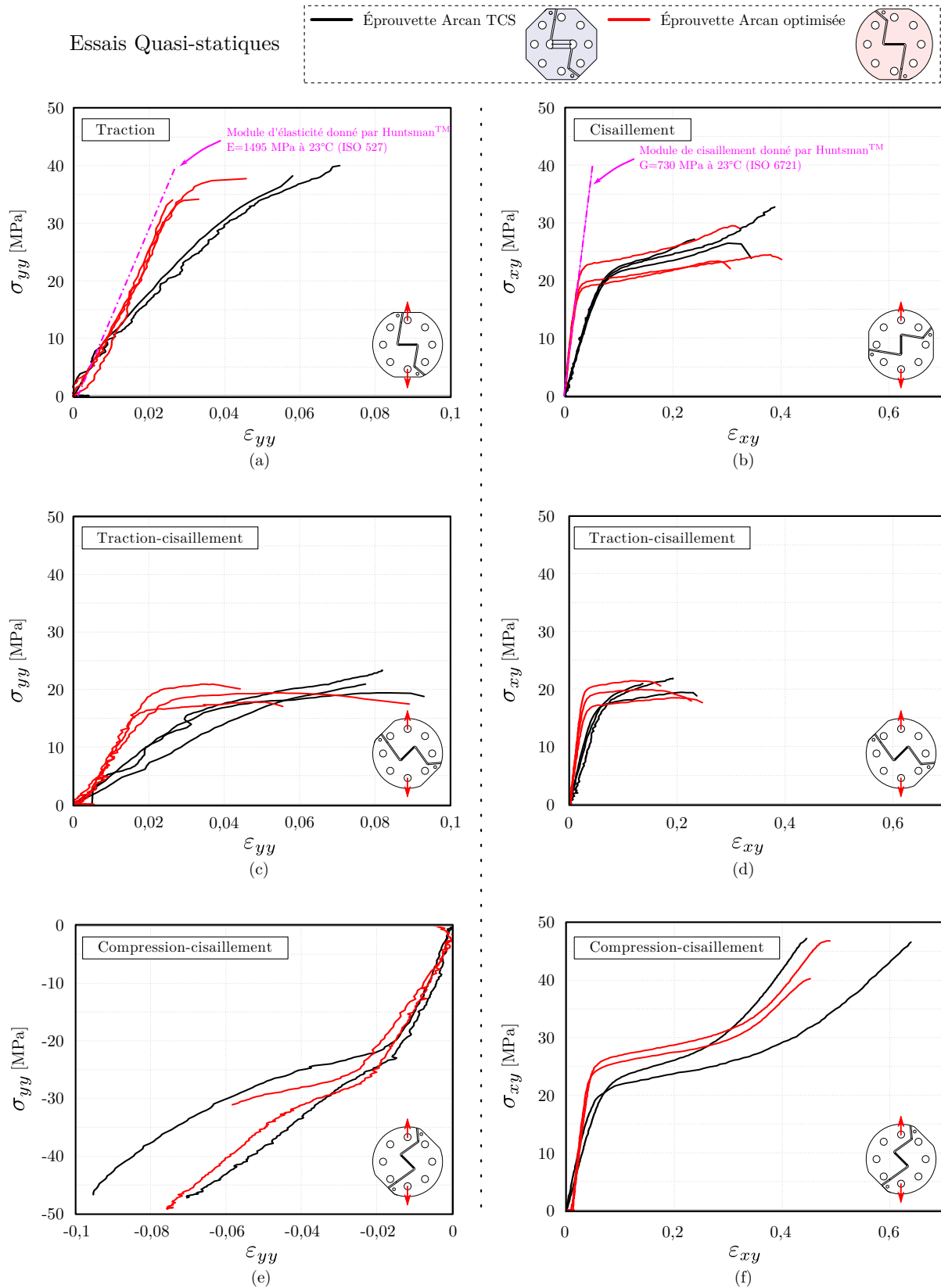


FIGURE 3.17 – Comparaison des résultats en contrainte moyenne équivalente-déformation moyenne obtenus en quasi-statique ($v = 0,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) avec les éprouvettes Arcan TCS et Arcan optimisée pour la dynamique.

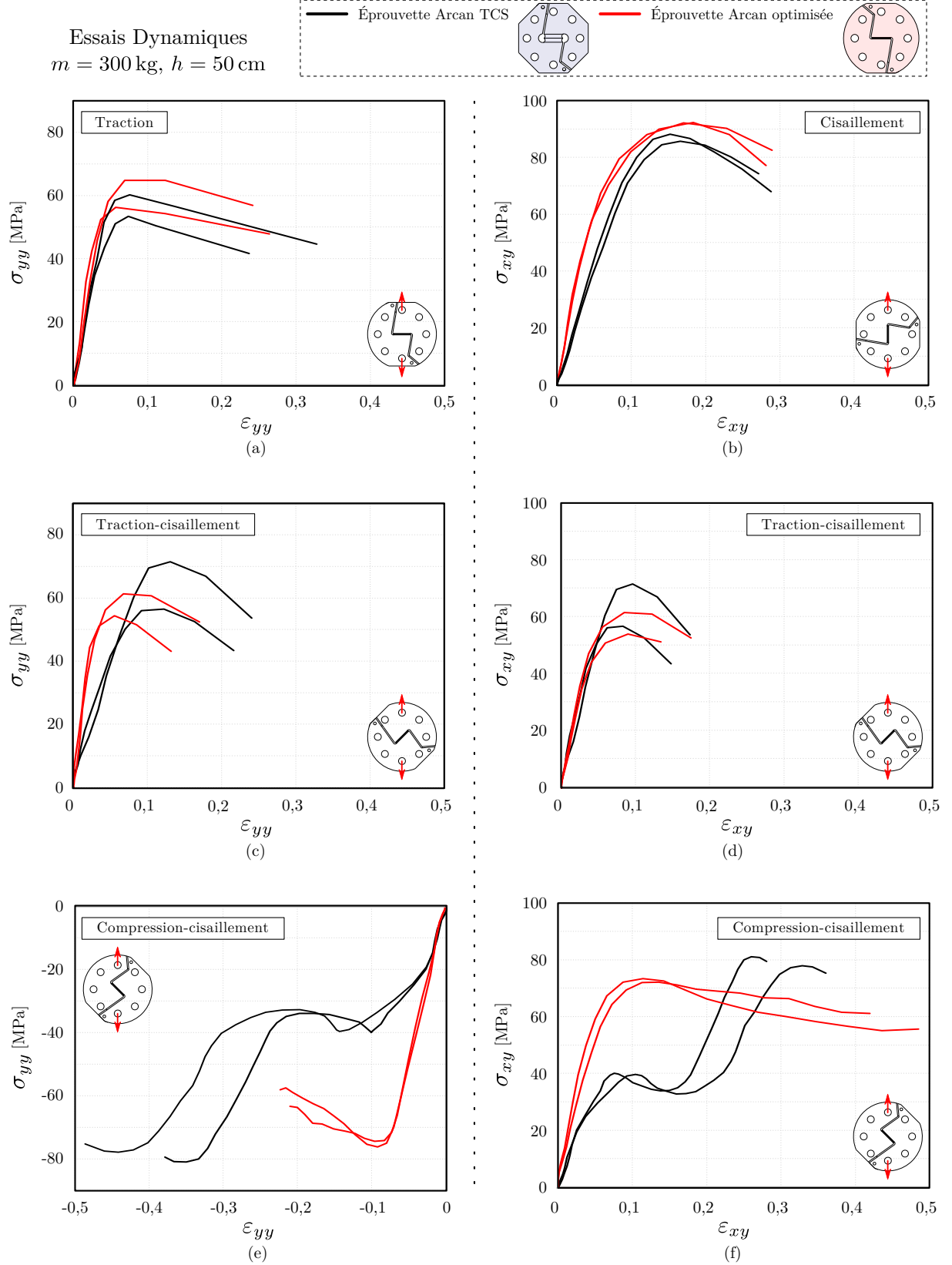


FIGURE 3.18 – Comparaison des résultats en contrainte moyenne équivalente-déformation moyenne obtenus en dynamique ($h = 50 \text{ cm}$ – $m = 300 \text{ kg}$) avec les éprouvettes Arcan TCS et Arcan optimisée pour la dynamique.

3.3.3 Influence des conditions d'essais

Influence de la masse de l'impacteur

Les résultats présentés sur la figure 3.19 sont issus d'essais de traction (cf. figure 3.19a, c & d) et de cisaillement (cf. figure 3.19b, e & f) réalisés sur les éprouvettes Arcan modifiées. Ils sont obtenus pour une même hauteur de chute de 30 cm mais avec trois masses d'impacteur de 100 kg, 200 kg et 300 kg.

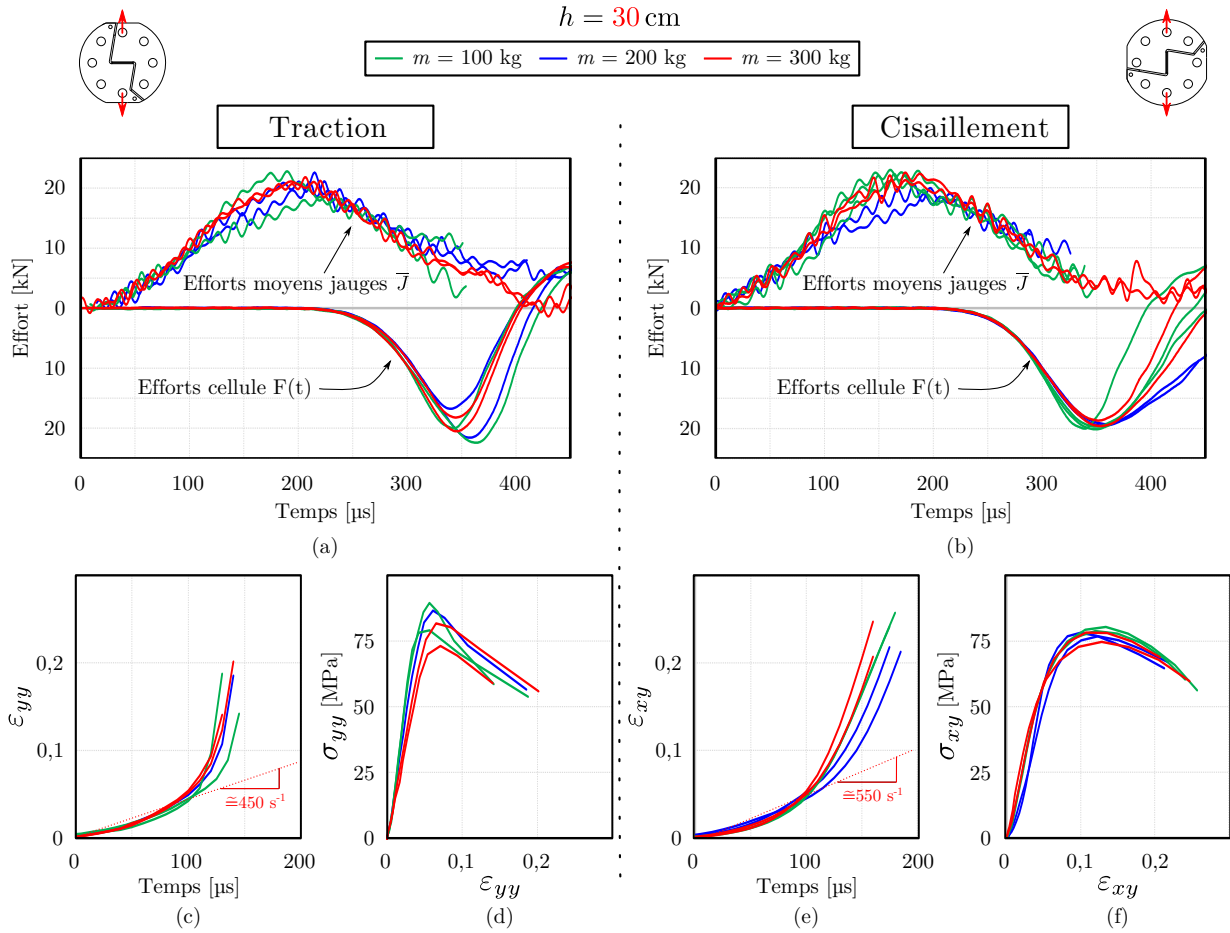


FIGURE 3.19 – Influence de la masse de l'impacteur sur (a & b) le chargement de l'éprouvette et (c-f) le comportement mécanique de l'adhésif étudié en traction et cisaillement pour une hauteur de chute $h = 30$ cm.

Les courbes tracées sur les figures 3.19a & b montrent que les ondes de sollicitation sont identiques quelle que soit la masse utilisée. De fait, les vitesses de déformation et comportements mécaniques extraits de ces essais sont également similaires d'une masse à l'autre (cf. figures 3.19c-f).

Dans les configurations testées, la quantité d'énergie transférée par le poids tombant au dispositif est suffisante pour solliciter l'éprouvette de manière monotone jusqu'à la rupture du joint de colle.

Influence de la hauteur de chute

La figure 3.20 présente les évolutions de la déformation moyenne tangentielle $\varepsilon_{xy}(t)$ (cf. figure 3.20a) et de la contrainte moyenne équivalente de cisaillement $\sigma_{xy}(t)$ (cf. figure 3.20b) pour différentes hauteurs de chute comprises entre 20 cm et 60 cm. Ces résultats sont obtenus à partir d'essais de cisaillement et pour une masse d'impacteur de 300 kg. Trois essais ont été réalisés par configuration afin de vérifier la répétabilité des résultats. Pour des questions de lisibilité, une seule courbe est tracée par hauteur étudiée.

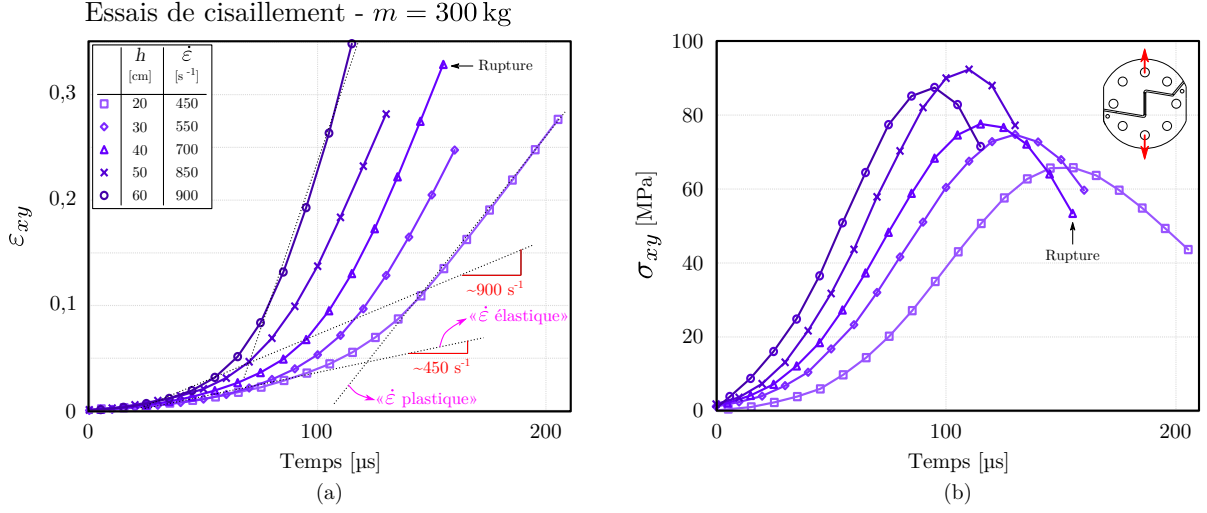


FIGURE 3.20 – Influence de la hauteur de chute sur l'évolution de (a) la déformation tangentielle $\varepsilon_{xy}(t)$ et (b) la contrainte tangentielle $\sigma_{xy}(t)$. Essais de cisaillement réalisés de $h = 20$ cm à $h = 60$ cm.

De manière similaire aux résultats obtenus lors de la campagne prospective, l'évolution de $\varepsilon_{xy}(t)$ est bilinéaire. Elle est composée d'une première partie associée au comportement élastique de l'adhésif et d'une seconde phase associée à la transformation irréversible de l'adhésif. Les résultats tracés sur la figure 3.20a permettent d'avoir un aperçu de l'étendue de la plage d'essai. Dans cette configuration de cisaillement, il est possible de charger le joint de colle avec des vitesses de déformation allant de $450 s^{-1}$ à $900 s^{-1}$.

Les courbes $\sigma_{xy}(t)$, tracées sur la figure 3.20b, sont associées aux résultats de la figure 3.20a. Elles présentent une évolution monotone du chargement jusqu'à la rupture.

Les observations faites dans cette partie montrent la modularité du montage développé et valident son dimensionnement sur la plage investiguée.

Limite d'utilisation du montage

Des essais ont également été effectués avec un impacteur de 300 kg lâché à des hauteurs inférieures à 20 cm. La figure 3.21 présente les évolutions de la contrainte moyenne équivalente tangentielle en fonction de la déformation moyenne tangentielle $\sigma_{xy}(\varepsilon_{xy})$ (figure 3.21a) et de la contrainte moyenne équivalente tangentielle en fonction du temps $\sigma_{xy}(t)$ (figure 3.21b), obtenues à partir de quatre essais de cisaillement réalisés avec une hauteur de chute de 5 cm.

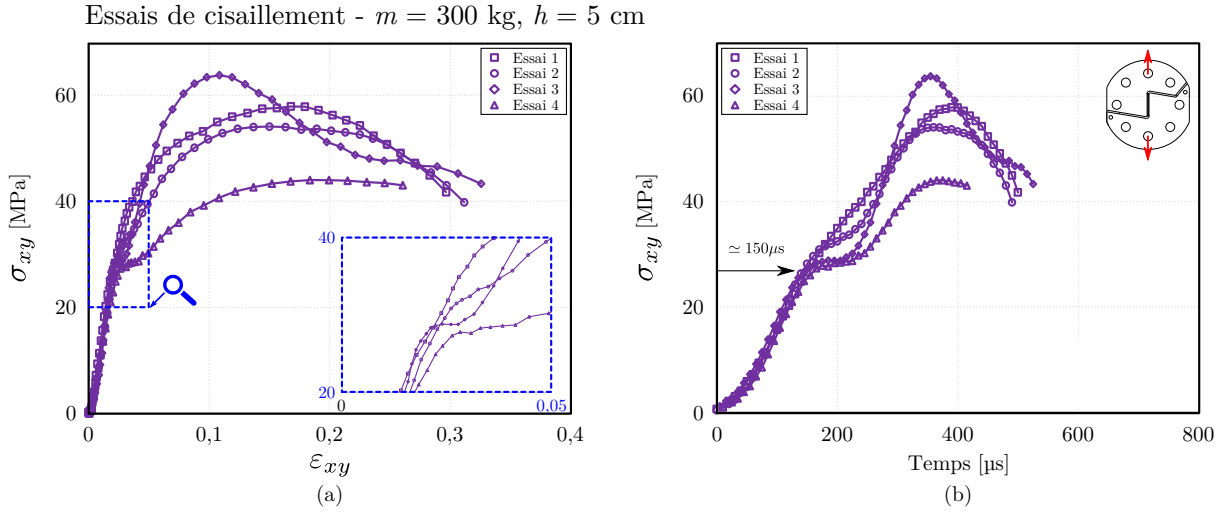


FIGURE 3.21 – Évolutions de (a) $\sigma_{xy}(\varepsilon_{xy})$ et de (b) $\sigma_{xy}(t)$ obtenues pour des essais de cisaillement réalisés avec $h = 5$ cm et $m = 300$ kg.

Les courbes tracées sur la figure 3.21a montrent l'apparition de perturbations sur la montée en charge de l'éprouvette. La réponse mesurée sur l'essai « 1 » est quasi-monotone. Les réponses mesurées des trois autres essais sont perturbées par une oscillation qui apparaît pour un niveau de contrainte d'environ 28 MPa, atteint après 150 μs de chargement (cf. essais « 2 » à « 4 »).

Pour identifier les raisons de ces perturbations, une caméra rapide supplémentaire a été positionnée à la base du dispositif de sollicitation afin d'observer la cinématique d'impact. La corrélation d'images numériques a été mise en œuvre afin de remonter aux déplacements de plusieurs points définis sur l'impacteur et la butée.

Les déplacements des points B_G et B_D (points situés aux extrémités de la butée, cf. figure 3.22a pour leur localisation), extraits suivant la direction de chargement y_0 au cours de l'essai « 3 », sont tracés sur la figure 3.22b. L'effort mesuré par la cellule durant ce même essai est tracé sur la figure 3.22c.

Les courbes montrent que l'impacteur percute le côté droit de la butée puis le côté gauche après 150 μs d'essai (cf. figure 3.22b). À chaque contact, une onde de sollicitation est générée dans la barre de traction provoquant la perturbation du chargement de l'éprouvette (cf. figure 3.22b).

Ce « double contact » est la conséquence d'un défaut de parallélisme existant entre le poids tombant et la butée lors de l'impact, lié à une longueur de guidage de l'impacteur insuffisante. Ce type de chargement parasite est aléatoire et a principalement été observé pour des

essais dont la hauteur de chute est inférieure à 20 cm. Ce phénomène limite aujourd'hui la plage d'essai à des hauteurs de chute supérieures à 20 cm.

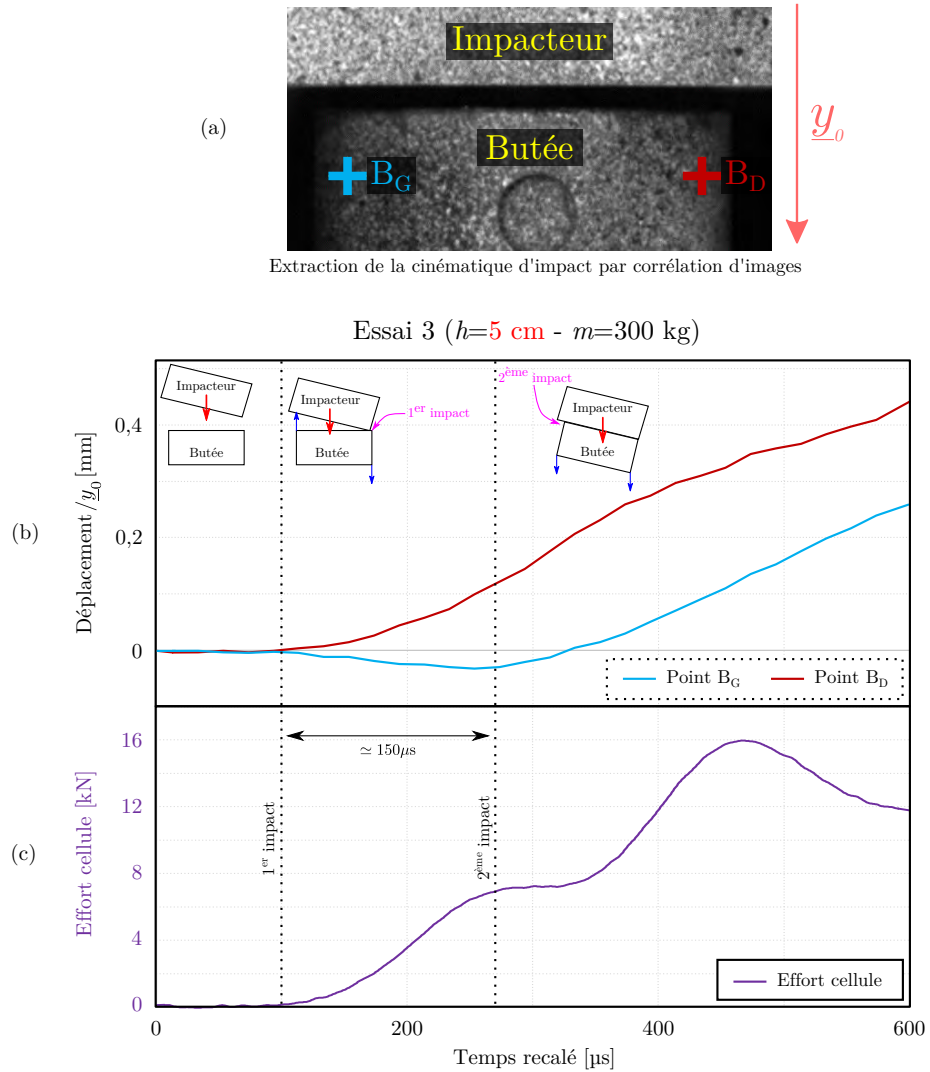


FIGURE 3.22 – Cinématique d'impact de l'essai « 3 » ($h = 5$ cm et $m = 300$ kg).

Afin d'être en mesure de travailler à des vitesses de déformation plus faibles, des solutions seront envisagées en perspective.

3.4 Conclusions

Dans ce troisième chapitre, le développement d'un moyen d'essais dédié à la caractérisation des assemblages collés sous chargements dynamiques combinés est présenté.

Dans un premier temps, l'extension de l'éprouvette Arcan TCS à la sollicitation dynamique est réalisée pour des niveaux d'efforts inférieurs à 30 kN. L'objectif de la démarche est d'augmenter la résistance mécanique de l'éprouvette originale pour lui permettre de résister aux niveaux de charge souhaités. Pour y arriver, un travail numérique d'optimisation a été réalisé sur la géométrie des substrats ainsi que sur le matériau les constituant. La solution aux effets de bords qui consiste à utiliser des « becs » au niveau des bords libres est conservée sur l'éprouvette Arcan optimisée. Les dimensions des becs ont néanmoins été modifiées afin de rapprocher les zones utilisées pour l'extraction des déplacements de corps rigides.

Dans un second temps, le développement d'un dispositif de traction dynamique sous tour de chute a été présenté. Ce dernier combine des solutions technologiques issues du dispositif utilisé par Beevers et Ellis dans [Beevers et Ellis, 1984] et des moyens d'essais à barres d'Hopkinson à collision utilisés en traction directe. Ce dispositif est notamment composé d'une barre de traction qu'il est nécessaire de dimensionner afin d'assurer la monotonie du chargement de l'éprouvette jusqu'à la rupture de l'adhésif. Un système masse/ressorts équivalent a été étudié par la méthode des éléments finis. Le modèle numérique est composé d'éléments barres représentant deux « ressorts » en série associés à la barre de traction et à l'éprouvette. Les conditions aux limites sont appliquées aux deux extrémités du système. Les résultats associés à cette étude ont permis de guider le choix du matériau constituant la barre de sollicitation ainsi que de déterminer sa géométrie.

Dans un troisième temps, la validation expérimentale du moyen d'essais développé a été traitée.

Une nouvelle méthode d'extraction des données en « contrainte moyenne équivalente »-« déformation moyenne » a été développée pour dépouiller les résultats expérimentaux. L'extraction des déformations moyennes repose sur les déplacements calculés des quatre extrémités de l'adhésif, l'utilisation de la formulation d'un élément fini quadrangle linéaire et d'un repère local de l'adhésif. Le calcul des contraintes moyennes est réalisé à partir de l'effort mesuré, de la section travaillante et du repère local de l'adhésif.

Deux analyses ont été réalisées avec cette méthode sur le même adhésif Huntsman™ Araldite® 420 A/B, que celui étudié dans l'étude prospective.

La première, comparative, concerne l'analyse des comportements mécaniques issus de l'éprouvette Arcan TCS originale et Arcan optimisée pour la dynamique en quasi-statique et dynamiques. Les résultats extraits valident le dimensionnement de l'éprouvette optimisée et montrent la pertinence du rapprochement des zones d'extraction des déplacements.

La seconde, paramétrique, a permis de tester l'influence de la hauteur de chute et de la masse de l'impacteur sur la nature du chargement. Les hauteurs de chute vont de 5 cm à 60 cm et les masses d'impacteur de 100 kg à 300 kg. Trois conclusions principales sont tirées de cette étude :

1. Une masse importante est nécessaire pour assurer la monotonie du chargement de l'éprouvette jusqu'à la rupture de l'adhésif.
2. La vitesse de déformation est ajustée par l'intermédiaire de la hauteur de chute.

3. Dans l'état, l'essai mécanique est aléatoire pour des hauteurs de chute inférieures à 20 cm lié à un guidage insuffisant de l'impacteur.

Caractérisation d'adhésifs structuraux

Résumé

Ce chapitre est consacré à la caractérisation d'adhésifs structuraux.

Le comportement mécanique quasi-statique et dynamique de trois adhésifs structuraux est d'abord étudié. Les résultats dynamiques sont extraits d'essais réalisés avec le moyen développé. Des évolutions différentes de comportement sont observées d'un adhésif à un autre et d'une configuration de chargement à une autre. La diversité des réponses obtenues justifie la pertinence de l'étude des adhésifs en dynamique.

Une confrontation des résultats issus d'essais Arcan et TAST est ensuite réalisée. L'objectif est de vérifier si ces deux essais permettent d'identifier un comportement mécanique similaire du joint de colle étudié. Plusieurs types d'éprouvettes TAST modifiées ont été développées pour cette étude. Les résultats obtenus montrent des tendances similaires d'un essai à un autre pour une même configuration de chargement.

Sommaire

4.1	Caractérisation d'adhésifs structuraux	98
4.1.1	Adhésifs étudiés et essais réalisés	98
4.1.2	Résultats et analyses	99
4.1.3	Bilan	112
4.2	Comparaison avec des essais standards	114
4.2.1	Présentation des éprouvettes TAST modifiées	114
4.2.2	Essais réalisés	115
4.2.3	Résultats et analyses	116
4.2.4	Bilan	118
4.3	Conclusions	119

4.1 Caractérisation d'adhésifs structuraux

L'étude et la caractérisation de trois adhésifs structuraux dans des conditions d'essais dynamiques est proposée dans cette section. Cette démarche permet d'avoir un aperçu des résultats ainsi que des comportements mécaniques pouvant être mis en évidence avec le moyen d'essais développé.

4.1.1 Adhésifs étudiés et essais réalisés

Trois adhésifs structuraux sont étudiés.

Adhésif Huntsman™ Araldite® 420 A/B [Huntsman, 2000 ; Huntsman, 2009]

Cette colle a été utilisée pour l'étude prospective ainsi que pour la validation du moyen d'essais développé. Il s'agit d'un adhésif époxyde, bicomposant, durcissant à température ambiante, résistant aux chocs ainsi qu'à des sollicitations de cisaillement. Il est dédié au domaine aérospatial et est recommandé pour le collage d'inserts, de profilés en aluminium ou composite, etc. dans des structures en nid d'abeilles.

Adhésif Dow® Betamate™1496 V [Dow, 2016]

Dow® Betamate™1496 V est un adhésif époxyde, monocomposant développé pour le secteur de l'automobile. Celui-ci est dédié au collage de pièces, principalement métalliques, composant la carrosserie ainsi que la caisse en blanc des véhicules. Il a été notamment conçu afin de tolérer un certain degré de contamination des surfaces de recouvrement par de l'huile afin de respecter des spécifications imposées par les constructeurs automobiles.

Adhésif 3M® AF 191 [3M, 2009]

3M® AF 191 est un adhésif époxyde utilisé dans l'aérospatial pour des assemblages composites, métalliques et mixtes exposés à des températures de fonctionnement élevées (supérieures à 150 °C). Ce type de colle se présente sous la forme d'un film dans lequel est noyée une toile en nylon formant un quadrillage. Dans le cadre des essais présentés dans ce chapitre, ce dernier est orienté à $\pm 45^\circ$ par rapport à la direction $\underline{x}$. Pour des questions de confidentialité, les résultats associés à cet adhésif seront normalisés.

Pour l'ensemble des trois colles, les conditions de stockage et les cycles de cuisson préconisés par les fabricants ont été utilisés.

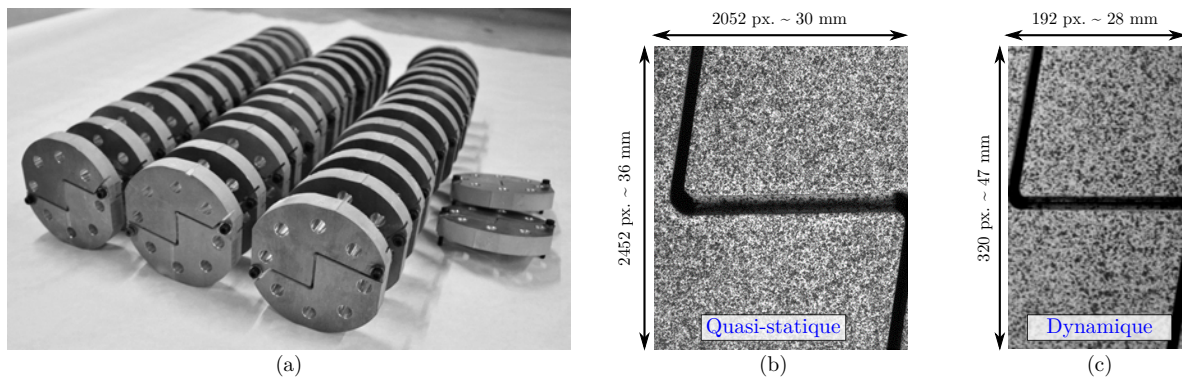


FIGURE 4.1 – (a) Éprouvettes usinées pour les différentes campagnes d'essais. Zones utilisées pour l'extraction des déplacements en (b) quasi-statique et (c) dynamique.

Quarante-deux éprouvettes Arcan optimisées pour la dynamique ont été usinées afin de réaliser les campagnes de caractérisation (cf. figure 4.1a). La zone de recouvrement mesure 25 mm de long par 10 mm de large et 0,4 mm d'épaisseur.

La préparation des surfaces à encoller et la procédure de collage sont identiques au protocole présenté dans le chapitre précédent.

Un échantillon d'au minimum quatre éprouvettes a été prélevé après chaque collage afin de vérifier l'épaisseur du joint de colle *via* l'utilisation de la tomographie RX.

Les essais quasi-statiques ont été réalisés entre chapes avec une machine de traction Instron® de capacité 100 kN. Le pilotage des essais a été effectué en déplacement avec une vitesse de sollicitation de 0,5 mm.min⁻¹. La zone utilisée pour l'extraction des déplacements en quasi-statique mesure 36 mm de hauteur par 30 mm de largeur. Elle est filmée à une résolution de 2452 pixels par 2052 pixels (cf. figures 4.1b). La fréquence d'acquisition des différents signaux est de 1 Hz.

Les essais dynamiques ont été réalisés avec le dispositif de traction dynamique. Deux hauteurs de chute de 30 cm et 50 cm ont été investiguées avec une masse d'impacteur de 200 kg. La zone utilisée pour l'extraction des déplacements en dynamique mesure 47 mm de hauteur par 28 mm de largeur. Elle est filmée à une résolution de 320 pixels par 192 pixels à 100 kHz (cf. figures 4.1c). La fréquence d'acquisition du signal d'effort est de 1 MHz.

Un minimum de trois éprouvettes a été testé par configuration de chargement γ et par condition initiale.

4.1.2 Résultats et analyses

Les résultats issus des différents essais sont présentés colle par colle. Une comparaison directe des différents adhésifs est néanmoins proposée en annexe D.

Trois résultats sont analysés pour chaque colle :

1. Le comportement mécanique de l'adhésif considéré en contrainte moyenne équivalente-déformation moyenne.
2. Les énergies de déformation calculées E_{xy} et E_{yy} . Elles correspondent à l'aire sous la courbe contrainte tangentielle-déformation tangentielle et contrainte normale-déformation normale multipliée par le volume du domaine. Les énergies de déformation sont calculées de l'état initial jusqu'au moment où la contrainte maximale est atteinte. Ce choix arbitraire porte essentiellement sur la difficulté d'identifier avec exactitude le moment de rupture en dynamique.
3. Les faciès de rupture.

L'aspect « répétabilité » a été évalué par la répétition d'au moins deux essais identiques. Pour les configurations de traction et de cisaillement qui comportent un nombre d'échantillons testés plus important, un coefficient de variation a été calculé. Il correspond au quotient de l'écart type sur la moyenne d'une grandeur mesurée de la série analysée.

Sur l'intégralité des essais réalisés, les coefficients de variation calculés à partir des contraintes maximales, des déformations associées à ces contraintes et des vitesses de déformation relevées restent respectivement inférieurs à 7 %, 20 % et 15 %. De fait, quels que soient la colle, la configuration, le type de sollicitation et la vitesse de chargement, les résultats montrent

une répétabilité satisfaisante.

Adhésif Huntsman™Araldite® 420 A/B

Les figures 4.2 à 4.4 présentent un comparatif des réponses mécaniques quasi-statiques et dynamiques de l'Araldite® 420 A/B obtenues suivant les différentes orientations de sollicitation.

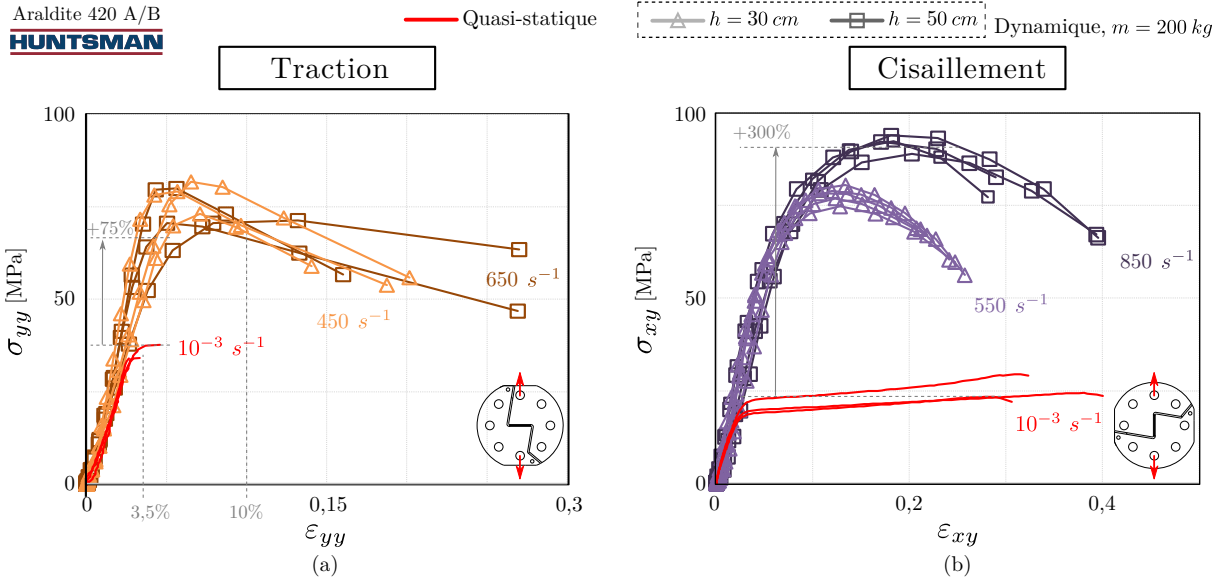


FIGURE 4.2 – Comportement mécanique de l'Huntsman™Araldite® 420 A/B en (a) traction et (b) cisaillement.

En quasi-statique, le comportement mécanique observé de l'Araldite® 420 A/B est fragile en traction et plus ou moins ductile suivant les autres directions de sollicitation. La résistance maximale du joint de colle est obtenue en traction et en compression-cisaillement avec des contraintes maximales supérieures à 35 MPa.

En dynamique, les niveaux de contrainte augmentent significativement quel que soit le type de chargement. Ainsi, par rapport aux résultats quasi-statiques, des hausses des plateaux de contrainte allant de 75 % en traction (cf. figure 4.2a) à plus de 300 % en cisaillement (cf. figure 4.2b) peuvent être relevées. Dans ce régime de sollicitation, la résistance maximale du joint de colle est obtenue en cisaillement avec une contrainte maximale moyenne d'environ 90 MPa pour $\dot{\epsilon} = 850 \text{ s}^{-1}$ (cf. figure 4.2b).

Deux comportements peuvent être observés concernant l'évolution des déformations. Suivant les composantes normales, le matériau semble « gagner en ductilité » avec l'augmentation de la vitesse de déformation. Par exemple, la déformation moyenne à rupture de l'adhésif évolue d'environ 3,5 % en quasi-statique à plus de 10 % en traction (cf. figure 4.2a). En revanche, les déformations à rupture sont quasi-identiques entre les essais quasi-statiques et dynamiques suivant les composantes tangentielles.

L'ensemble des résultats montre également une hausse des modules élastiques apparents avec l'augmentation de la vitesse de déformation. Sur l'exemple de la traction-cisaillement, le module de cisaillement apparent augmente de plus de 85 % en dynamique (cf. figure 4.3b).

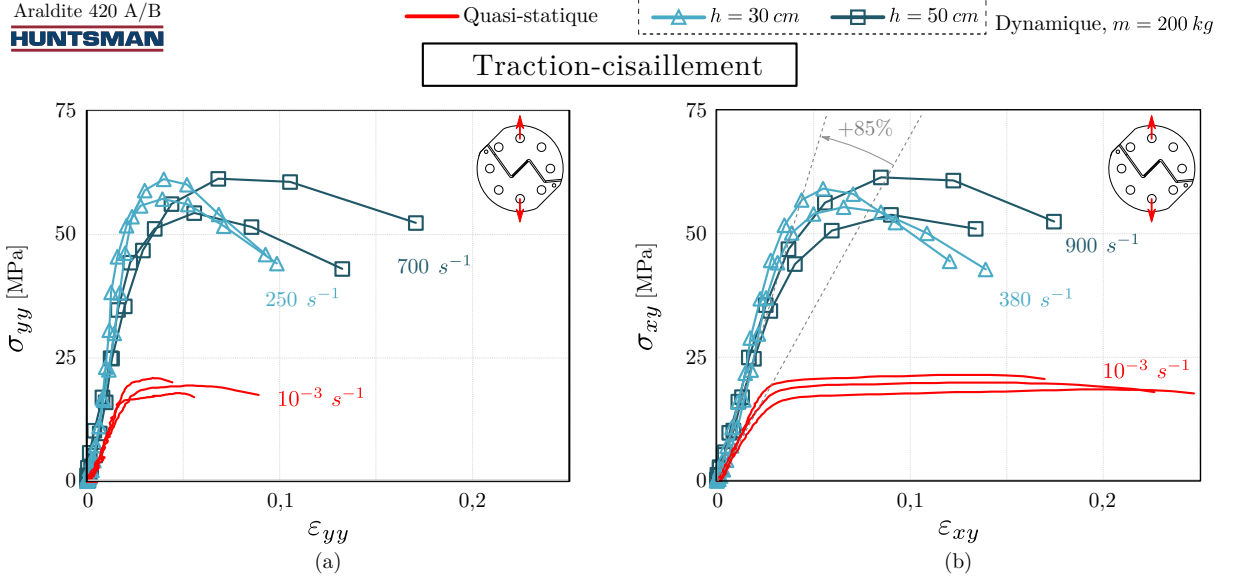


FIGURE 4.3 – Comportement mécanique de l'HuntsmanTMAraldite[®] 420 A/B en traction-cisaillement.

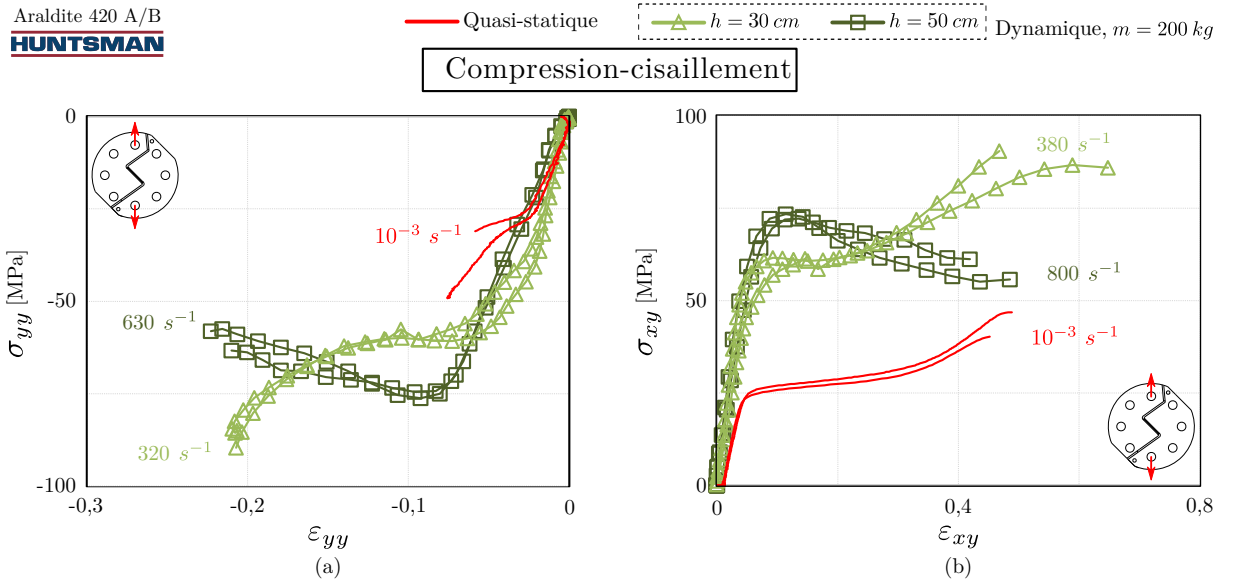


FIGURE 4.4 – Comportement mécanique de l'HuntsmanTMAraldite[®] 420 A/B en compression-cisaillement.

Les reprises de contrainte présentes sur les résultats en compression-cisaillement sont difficiles à interpréter. En effet, entre les résultats dynamiques à 380 s^{-1} et 800 s^{-1} , deux comportements sont observés (cf. figure 4.4). Dans le premier cas il existe une reprise de contrainte similaire à celle observée en quasi-statique. Celle-ci disparaît dans le deuxième cas pour laisser place à un effondrement des niveaux de contrainte.

Des résultats similaires ont été obtenus par Gerlach *et al.* dans [Gerlach *et al.*, 2008] sur la caractérisation d'une résine époxyde RTM-6 en compression *via* un dispositif à barres d'Hopkinson. L'interprétation physique de ce phénomène n'est cependant pas abordée par

les auteurs.

Lors des essais dynamiques, il a pu être observé visuellement que les deux surfaces collées restent en contact et frottent lors de la ruine de l'adhésif. Il est par conséquent difficile de savoir si cette reprise de contrainte est la conséquence d'une densification, si elle est liée à la friction des deux surfaces encollées, à un mélange de ces deux phénomènes ou d'un tout autre événement. Les mesures réalisées à cet instant et le calcul des énergies de déformation sont donc inexploitable pour cette sollicitation $\gamma = 135^\circ$. Pour identifier le moment de la ruine de l'adhésif, des solutions seront envisagées en perspective.

Un comparatif des énergies de déformation moyennes calculées à partir des courbes de réponse obtenues en traction, traction-cisaillement et cisaillement est présenté sur la figure 4.5.

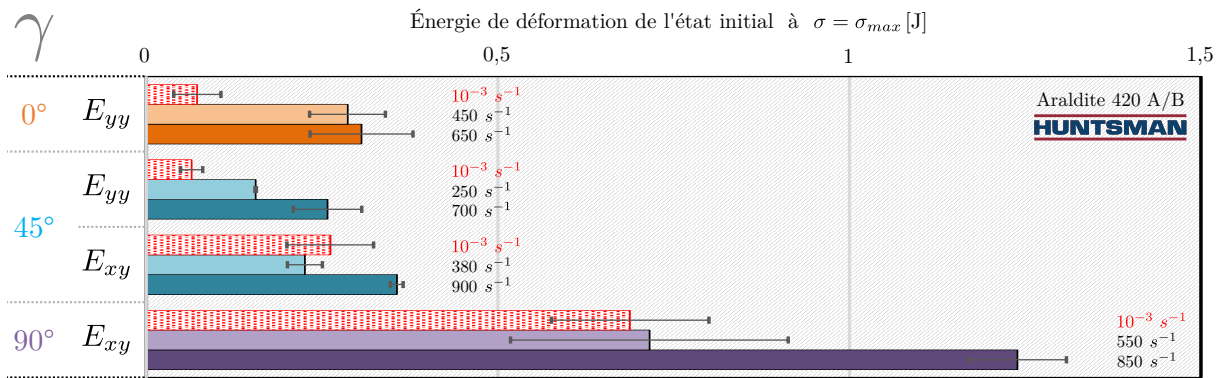


FIGURE 4.5 – Énergies de déformation calculées de l'état initial à $\sigma = \sigma_{max}$ pour l'Huntsman™ Araldite® 420 A/B.

L'augmentation de la vitesse de déformation, conduit à une hausse des valeurs des énergies de déformation calculées. Sur l'exemple de la traction, l'évolution du comportement provoque une augmentation de l'énergie de déformation moyenne de l'ordre de 300 % en comparaison avec les résultats quasi-statiques (cf. figure 4.5).

Les faciès de rupture associés aux différents essais réalisés sur l'Araldite® 420 A/B sont présentés sur la figure 4.6. Ceux-ci sont mixtes cohésifs dans la colle/adhésifs pour des sollicitations quasi-statiques et majoritairement cohésifs dans la colle en dynamique.

Les photos montrent également des formes de faciès spécifiques d'un chargement à un autre associées à différents modes de rupture et à la présence de bulles d'air. Ces dernières peuvent justifier, en partie, les écarts en contrainte observés sur les résultats d'une même série. Le procédé de cuisson en autoclave est une piste à investiguer afin de diminuer le taux de porosité dans la colle.

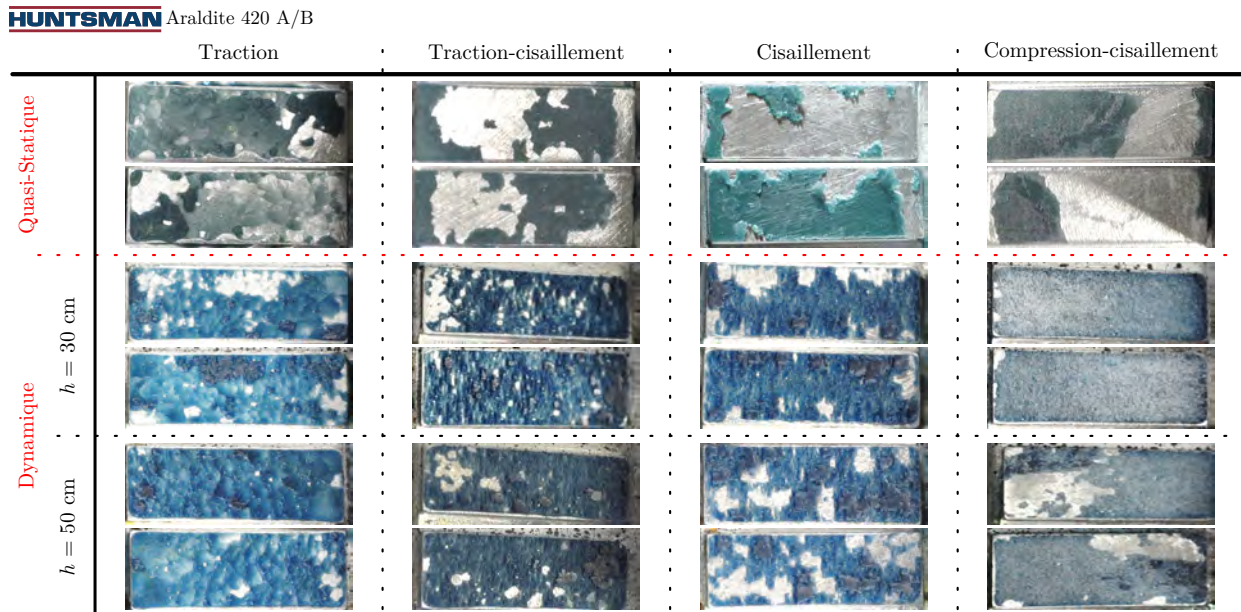


FIGURE 4.6 – Faciès de rupture obtenus avec l'Huntsman™ Araldite® 420 A/B.

Une synthèse des principales observations faites sur le comportement mécanique de l'Araldite® 420 A/B est proposée dans le tableau 4.1.

↗ Valeurs plus élevées ↘ Valeurs plus faibles ~ Valeurs similaires									
	Contraintes		Déformations		Modules d'élasticité apparents		Énergies de déformation de l'état initial à $\sigma = \sigma_{max}$		Modes de ruine
	σ_{yy}	σ_{xy}	ε_{yy}	ε_{xy}	En tract./comp.	En cisaillement	E_{xy}	E_{yy}	
Araldite 420 A/B HUNTSMAN			 ~ Si $\gamma=45^\circ$				 (Hors essais de comp.-cis.)		Mixte cohésif/adhésif ⇓ Cohésif

TABLEAU 4.1 – Effets de l'augmentation de la vitesse de déformation sur l'enveloppe de réponse de l'Huntsman™ Araldite® 420 A/B.

En conclusion, une augmentation de la vitesse de déformation provoque sur cet adhésif :

- Une hausse des niveaux de contrainte, des niveaux de déformation en traction/ compression, des modules d'élasticité apparents et des énergies de déformation.
- Des niveaux de déformation similaires en cisaillement.
- Une évolution des faciès de mixte adhésif/cohésif à majoritairement cohésif.

Peu de documents traitent de la caractérisation dynamique de l'Araldite® 420 A/B dans la littérature. Al-Zubaidy *et al.* dans [Al-Zubaidy *et al.*, 2011 ; Al-Zubaidy *et al.*, 2013] ont étudié cet adhésif en traction et à plusieurs vitesses de déformation *via* des éprouvettes massiques montées dans les mors d'un servo-vérin hydraulique. Les principaux résultats obtenus par les auteurs sont présentés sur la figure 4.7. Les vitesses de déformation affichées sont calculées en divisant la vitesse de sollicitation de la traverse par la longueur sollicitée de l'éprouvette (correspondant à la distance entre les mors de la machine).

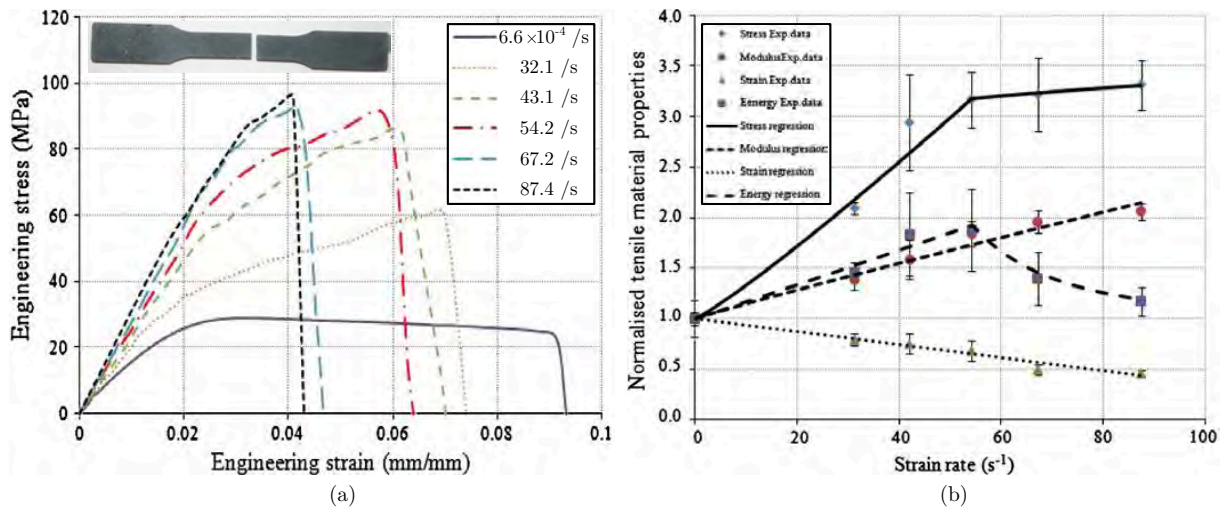


FIGURE 4.7 – Comportement dynamique de l'Huntsman™ Araldite® 420 A/B en traction identifié par Al-Zubaidy *et al.* (a) Courbes en contrainte-déformation. (b) Variation des propriétés mécanique de l'adhésif. Adapté de [Al-Zubaidy *et al.*, 2013].

Les résultats montrent des tendances similaires sur les niveaux des contraintes, les modules d'élasticité apparents et les énergies en comparaison avec les données issues des essais de traction Arcan. Des divergences apparaissent néanmoins sur les niveaux des déformations. Le comportement identifié par les auteurs en quasi-statique est ductile avec une déformation à rupture d'environ 9,5 %. La déformation à rupture mesurée sur essais Arcan est de 3,5 % et celle donnée par le fabricant de la colle à partir d'essais massiques est de 4,6 % [Huntsman, 2009].

Globalement, l'influence de la vitesse de déformation sur la réponse mécanique de l'adhésif observée par les auteurs est en adéquation avec les observations faites dans les travaux de thèse.

Adhésif Dow® Betamate™1496 V

Les figures 4.8 à 4.10 présentent un comparatif des réponses mécaniques quasi-statiques et dynamiques de la Dow® Betamate™1496 V obtenues suivant les différentes orientations de sollicitation.

En quasi-statique, le comportement mécanique de cette colle est ductile quelle que soit la direction de chargement. De manière similaire au comportement mécanique de l'Araldite® 420 A/B, la Betamate™1496 V offre sa résistance maximale en traction et en compression-cisaillement avec les mêmes niveaux de contrainte.

Avec l'augmentation de la vitesse de déformation, les résultats montrent une hausse des niveaux de contrainte et des modules élastiques apparents pour tous les chargements. Les contraintes maximales évoluent à la hausse d'environ 180 % en traction-cisaillement (cf. figure 4.9) à 225 % en cisaillement (cf. figure 4.8b) par rapport aux résultats quasi-statiques. Dans ces conditions d'essais dynamiques, cet adhésif a une meilleure résistance en traction et en cisaillement avec des contraintes maximales relevées supérieures à 95 MPa pour des vitesses de déformation supérieures à $600 s^{-1}$ (cf. figure 4.8).

Les modules élastiques apparents augmentent d'environ 50 % en traction simple et jusqu'à 240 % en traction-cisaillement sur les composantes tangentielles (cf. figure 4.9b). En revanche, contrairement au comportement de l'Araldite® 420 A/B, les niveaux de déformation diminuent fortement avec l'augmentation de la vitesse de déformation. Cette évolution est plus prononcée sur les composantes tangentielles avec, par exemple, une baisse supérieure à 50 % des déformations à rupture en cisaillement (cf. figure 4.8b).

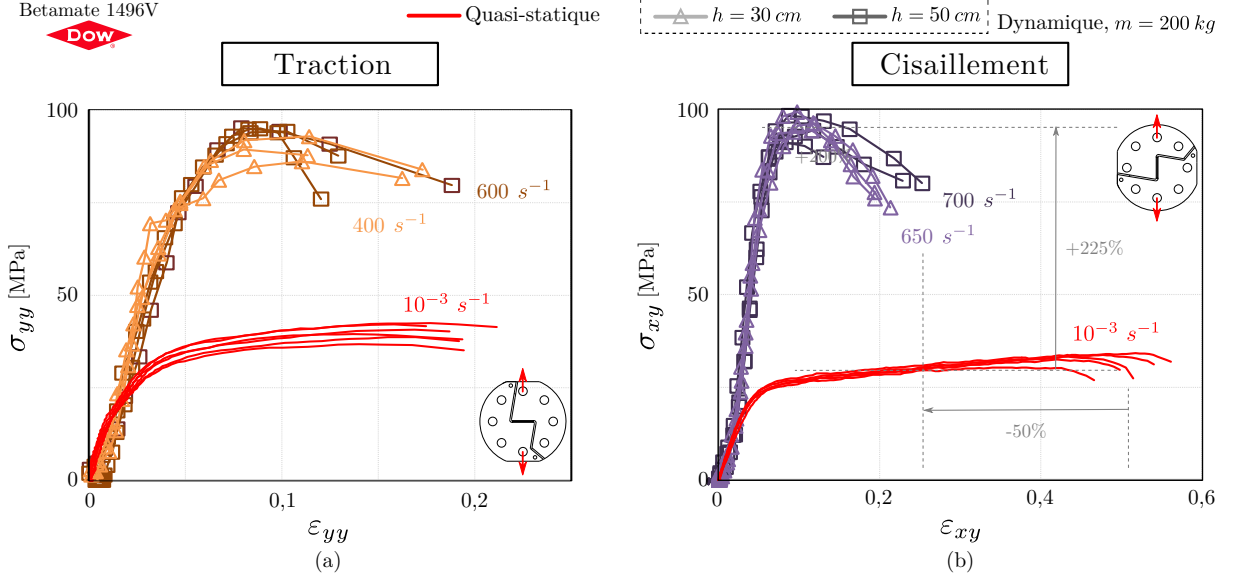


FIGURE 4.8 – Comportement mécanique de la Dow® Betamate™1496 V en (a) traction et (b) cisaillement.

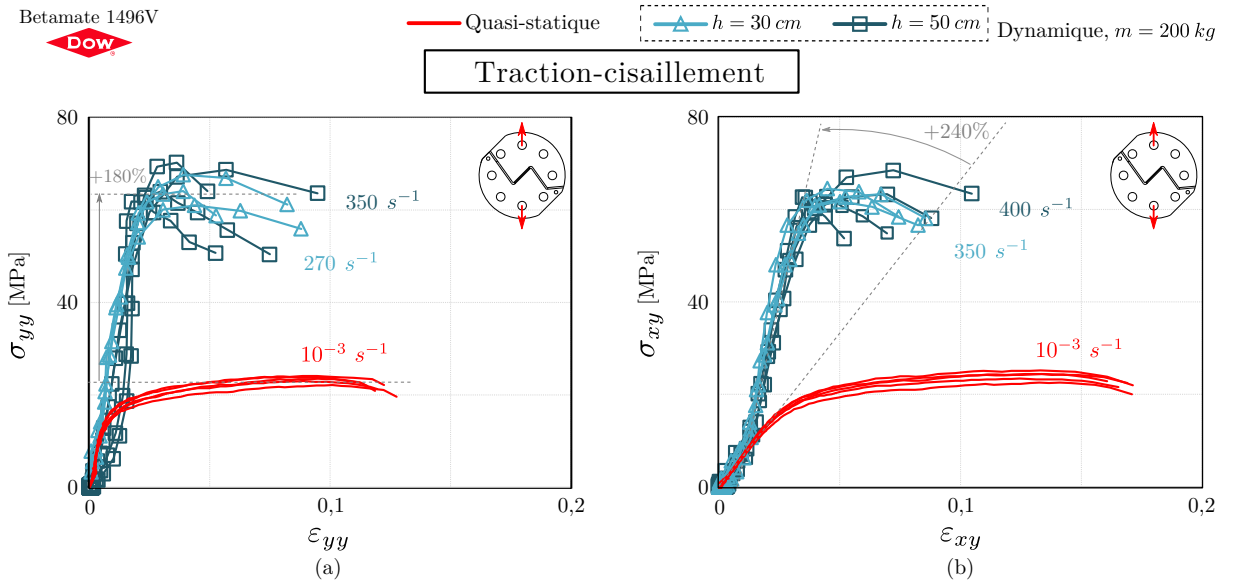


FIGURE 4.9 – Comportement mécanique de la Dow® Betamate™1496 V en traction-cisaillement.

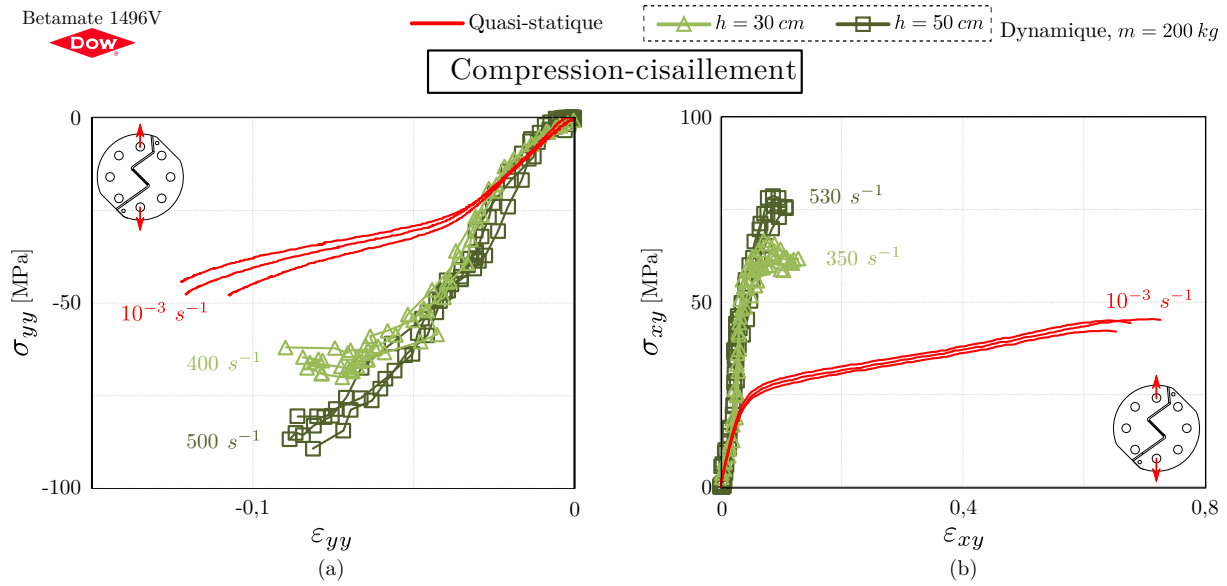


FIGURE 4.10 – Comportement mécanique de la Dow® Betamate™1496 V en compression-cisaillement.

Ces changements de comportement mécanique ont une répercussion directe sur les énergies de déformation calculées. En effet, les résultats tracés sur la figure 4.11 montrent une baisse globale des niveaux d'énergie avec l'augmentation de la vitesse de déformation. Cette évolution est plus marquée sur les composantes tangentielles associées aux essais de cisaillement et de compression-cisaillement pour lesquels des ruptures franches ont été observées.

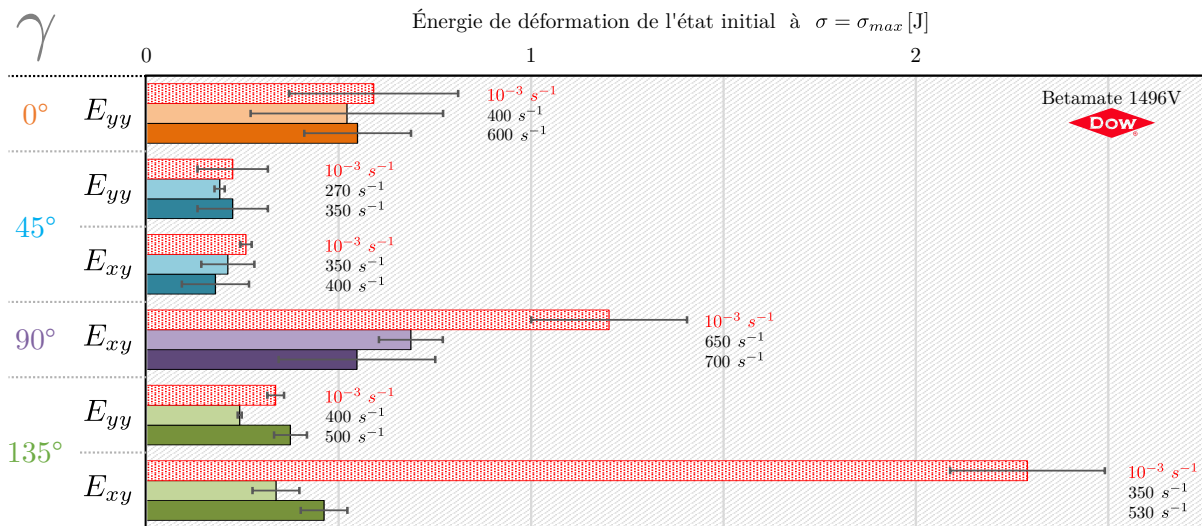


FIGURE 4.11 – Énergies de déformation calculées de l'état initial à $\sigma = \sigma_{max}$ pour la Dow® Betamate™1496 V.

Les faciès de rupture en lien avec les différents essais réalisés sur la Betamate™1496 V sont présentés sur la figure 4.12. Ces derniers sont principalement cohésifs quelles que soient la direction de chargement et la vitesse de déformation. De même que pour l'Araldite® 420 A/B, les formes de faciès diffèrent d'un chargement à un autre.

Betamate 1496V

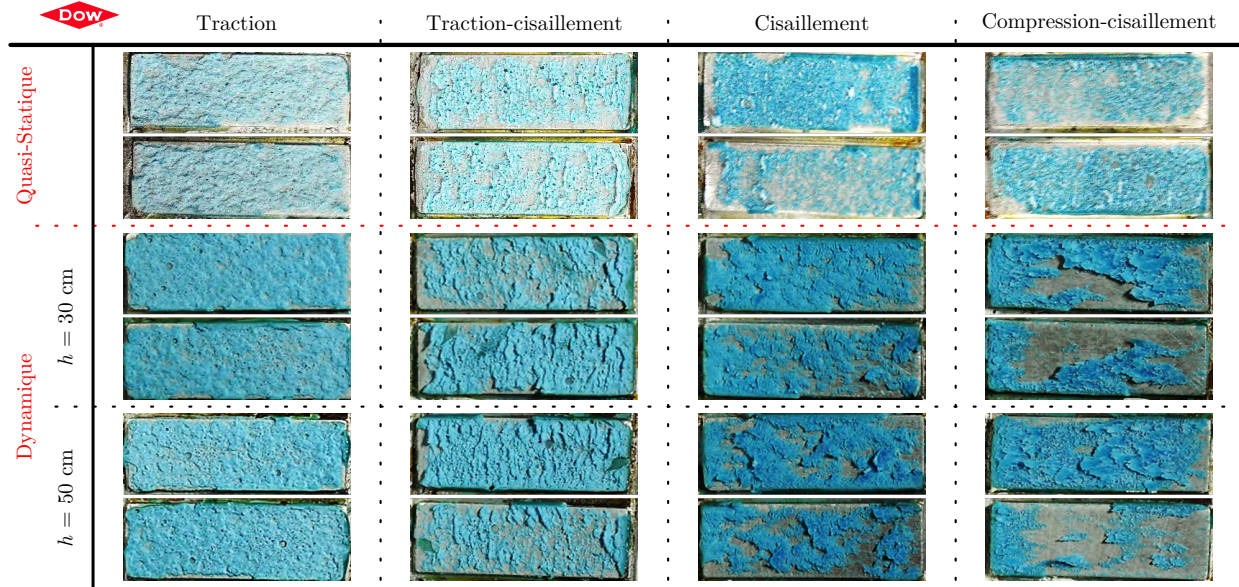


FIGURE 4.12 – Faciès de rupture obtenus avec la Dow® Betamate™1496 V.

Une synthèse des principales observations faites sur le comportement mécanique de la Dow® Betamate™1496 V est proposée dans le tableau 4.2.

	Contraintes		Déformations		Modules d'élasticité apparents		Énergies de déformation de l'état initial à $\sigma = \sigma_{max}$		Modes de ruine
	σ_{yy}	σ_{xy}	ε_{yy}	ε_{xy}	En tract./comp.	En cisaillement	E_{xy}	E_{yy}	
Betamate 1496V Dow	↗	↗	↘	↘	↗	↗	~	↘	Cohésif $\Rightarrow$ Cohésif

TABLEAU 4.2 – Effets de l'augmentation de la vitesse de déformation sur l'enveloppe de réponse de la Dow® Betamate™1496 V.

En conclusion, une augmentation de la vitesse de déformation provoque sur cet adhésif :

- Une hausse des niveaux de contrainte et des modules d'élasticité apparents.
- Une baisse des niveaux de déformation et des énergies de déformation (plus marquée en cisaillement).

Des tendances similaires ont été obtenues par Morin *et al.* dans [Morin *et al.*, 2010 ; Morin *et al.*, 2011] et May *et al.* dans [May *et al.*, 2015] sur la caractérisation dynamique de la Betamate™1496 V, bien que des essais très différents aient été mis en œuvre.

Les résultats tracés sur la figure 4.13 sont issus d'essais de traction réalisés sur cette colle *via* des éprouvettes en bout-à-bout montées entre les mors d'un dispositif à servo-vérin hydraulique. Les vitesses de déformation sont calculées en divisant la vitesse de sollicitation de

la machine par l'épaisseur du joint de colle.

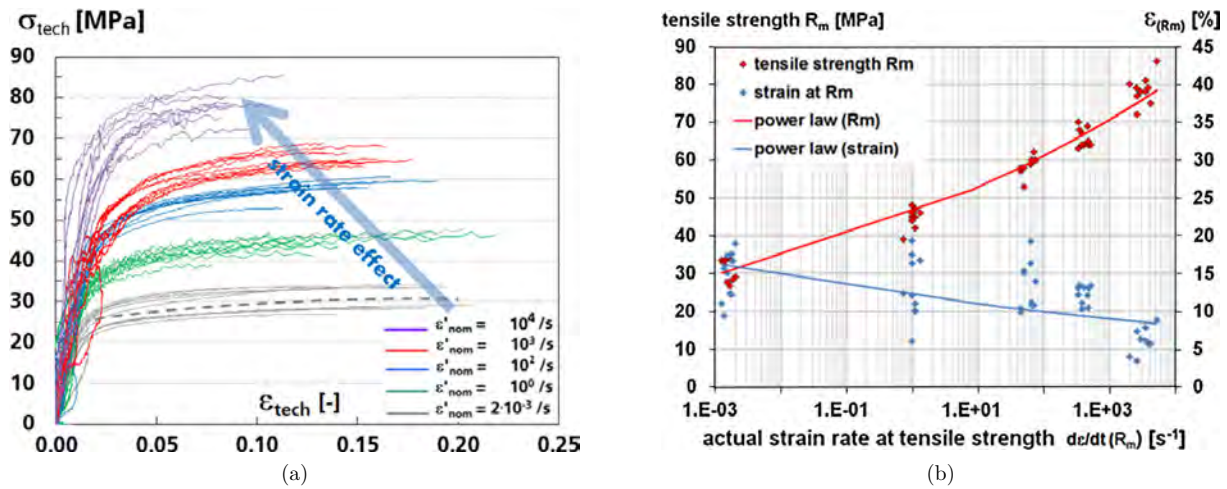


FIGURE 4.13 – Comportement dynamique de la Dow® Betamate™1496 V en traction identifié par May *et al.* (a) Courbes en contrainte-déformation. (b) Évolution des contraintes maximales et des déformations à rupture. Adapté de [May *et al.*, 2015].

Les réponses en contrainte-déformation tracées sur la figure 4.13a sont proches de celles obtenues avec les essais Arcan en dynamique, tant sur la forme que sur les niveaux atteints. Les tendances associées aux évolutions des contraintes maximales et des déformations à rupture (cf. figure 4.13b) sont identiques.

Adhésif 3M® AF 191

Les figures 4.14 à 4.16 présentent un comparatif des courbes de réponse en contrainte-déformation obtenues en quasi-statique et dynamique pour la caractérisation de la 3M® AF 191 suivant les différentes orientations de sollicitation.

Le comportement mécanique de cet adhésif sous sollicitation quasi-statique est ductile en cisaillement et compression-cisaillement ; fragile en traction et traction-cisaillement. Dans ce régime, la résistance maximale du joint de colle est obtenue en traction et compression-cisaillement.

Contrairement aux deux autres adhésifs, l'augmentation de la vitesse de déformation n'entraîne pas forcément une augmentation des niveaux de contrainte. C'est le cas notamment de l'essai de traction et de compression-cisaillement (cf. figures 4.14a et 4.16) où les contraintes maximales relevées en quasi-statique et dynamique sont identiques. Pour les configurations de traction-cisaillement et de cisaillement, des augmentations respectives d'environ 50 % et 140 % des contraintes maximales peuvent être relevées (cf. figures 4.15 et 4.14b). En dynamique, cet adhésif a une meilleure résistance en cisaillement.

Concernant l'évolution des modules élastiques apparents, ils augmentent avec la vitesse de déformation sauf sur les composantes normales en traction et traction-cisaillement où ils restent identiques. Pour les configurations de cisaillement et de compression-cisaillement, des hausses respectives d'environ 90 % et 380 % peuvent être relevées (cf. figures 4.14b et 4.16a).

L'évolution des niveaux de déformation diffère d'une configuration de chargement à une autre. Dans le cas de la compression-cisaillement, le comportement mécanique de l'adhésif passe de ductile en quasi-statique à fragile en dynamique (cf. figure 4.16). En cisaillement, les mêmes niveaux de déformation sont obtenus dans les deux régimes de sollicitation. Dans le cas de la traction et de la traction-cisaillement, l'adhésif « gagne » en ductilité avec l'augmentation de la vitesse de déformation. Ainsi, une augmentation de plus de 150 % des déformations à rupture peut être relevée sur l'exemple de l'essai de traction entre les résultats quasi-statiques et dynamiques (cf. figure 4.14a).

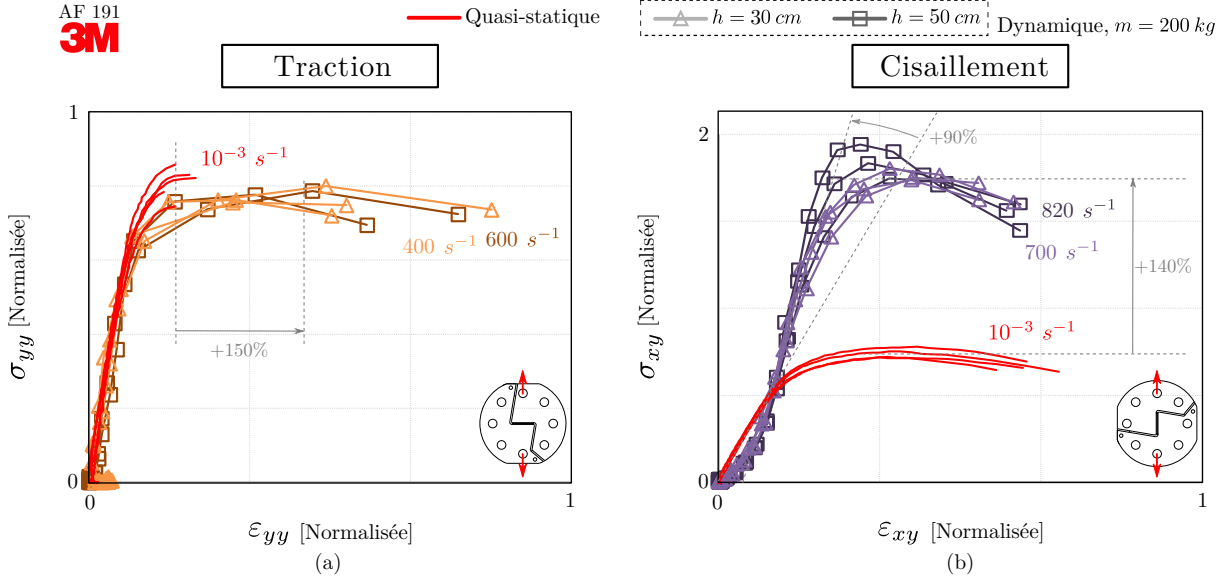


FIGURE 4.14 – Comportement mécanique de la 3M[®] AF 191 en (a) traction et (b) cisaillement.

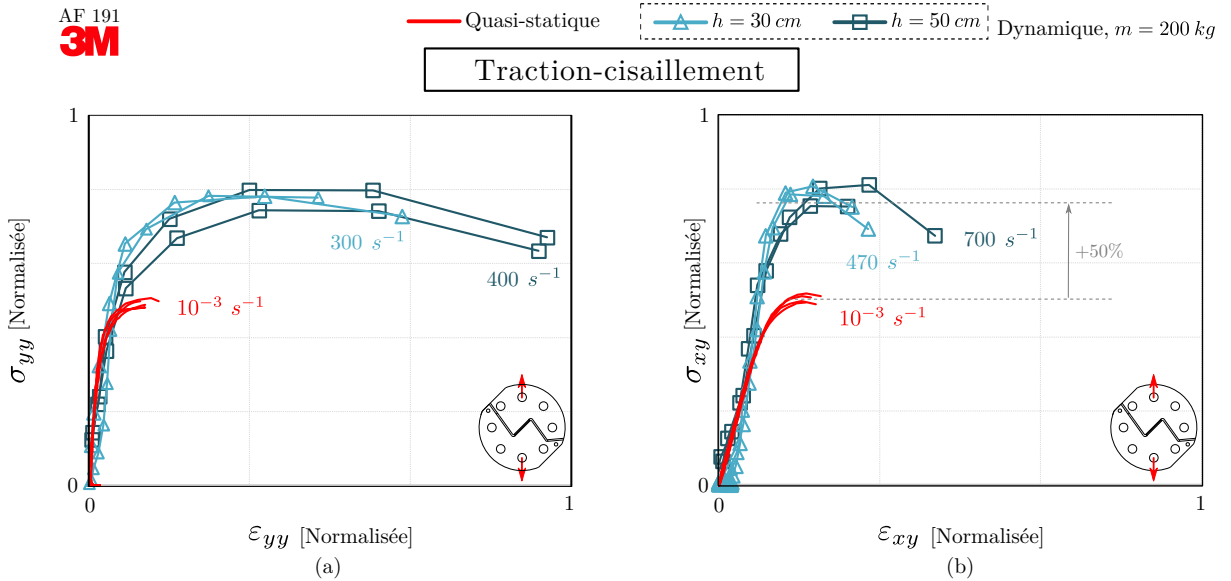


FIGURE 4.15 – Comportement mécanique de la 3M[®] AF 191 en traction-cisaillement.

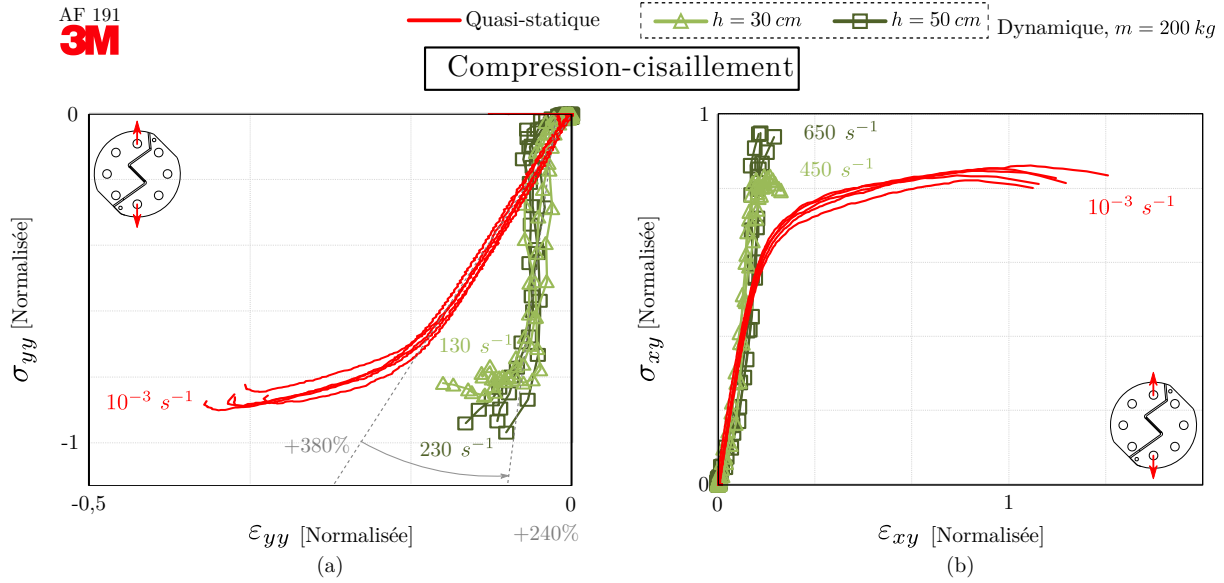


FIGURE 4.16 – Comportement mécanique de la 3M[®] AF 191 en compression-cisaillement.

En lien avec ces observations, les énergies de déformation calculées augmentent significativement pour les cas de traction, traction-cisaillement et cisaillement avec la montée en vitesse de déformation. Elles diminuent pour les essais de compression-cisaillement pour lesquels des ruptures nettes ont été observées (cf. figure 4.17).

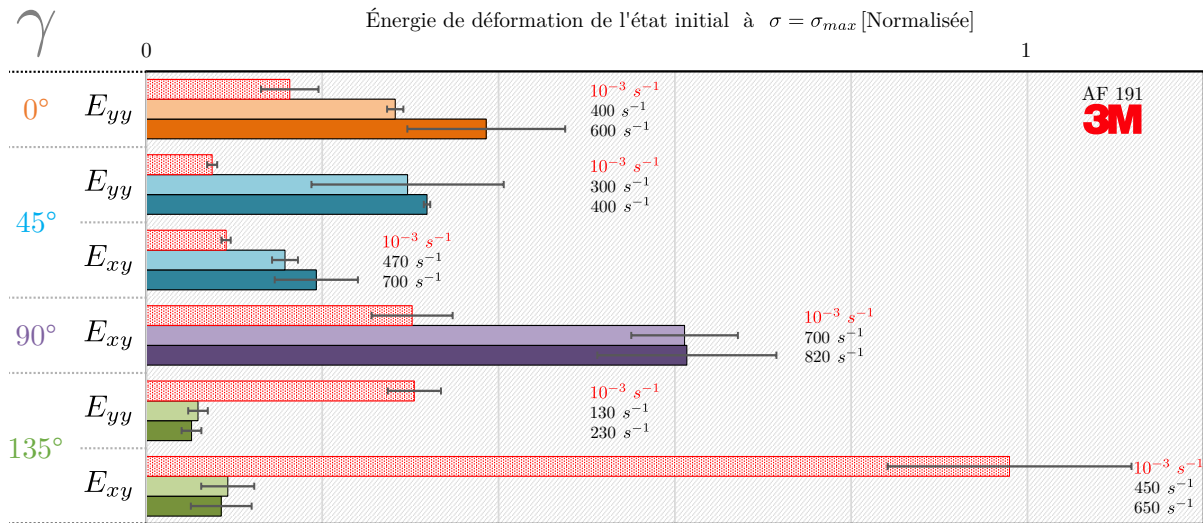
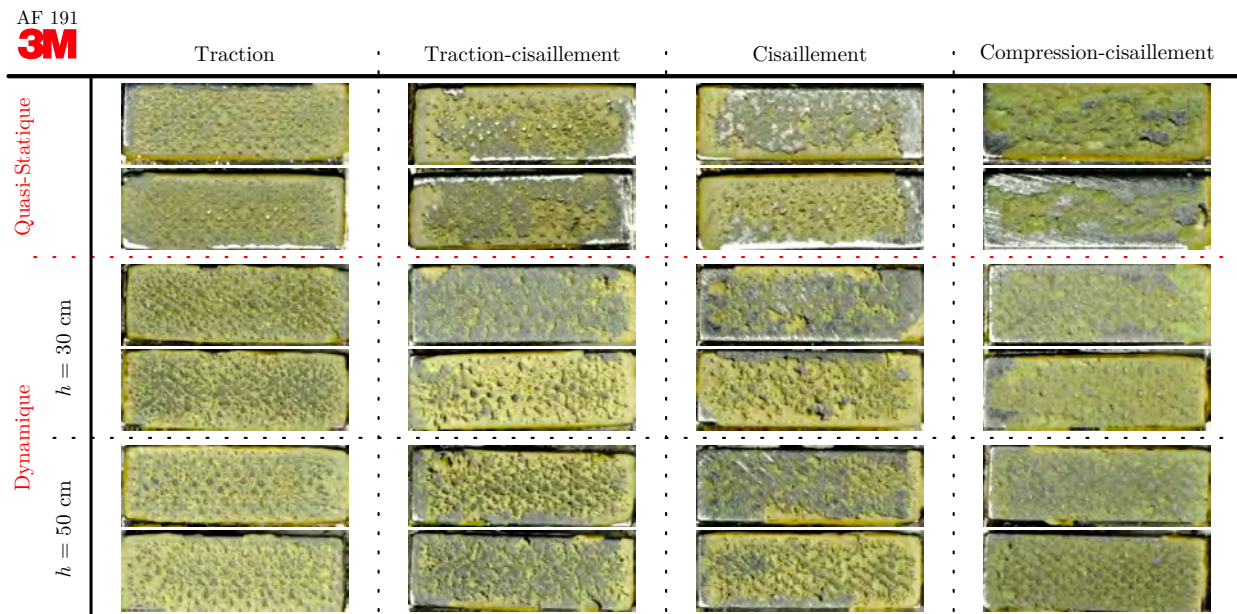


FIGURE 4.17 – Énergies de déformation calculées de l'état initial à $\sigma = \sigma_{max}$ pour la 3M[®] AF 191.

Les faciès de rupture associés aux différents essais réalisés sont présentés sur la figure 4.18. Ces derniers sont principalement cohésifs dans l'adhésif quelles que soit la direction de chargement et la vitesse de déformation. Contrairement aux deux autres adhésifs, les photos montrent des faciès relativement similaires d'un chargement à un autre.


FIGURE 4.18 – Faciès de rupture obtenus avec la 3M[®] AF 191.

Une synthèse des principales observations faites sur le comportement mécanique de la 3M[®] AF 191 est proposée dans le tableau 4.3.

↗ Valeurs plus élevées ↘ Valeurs plus faibles ~ Valeurs similaires									
	Contraintes		Déformations		Modules d'élasticité apparents		Énergies de déformation de l'état initial à $\sigma = \sigma_{max}$		Modes de ruine
	σ_{yy}	σ_{xy}	ε_{yy}	ε_{xy}	En tract./comp.	En cisaillement	E_{xy}	E_{yy}	
AF 191 3M	~	↗	↗	~	~	↗	↗	↗	Cohésif ⇒ Cohésif
	↘ Si $\gamma=45^\circ$	~ Si $\gamma=135^\circ$	↘ Si $\gamma=135^\circ$	↘ Si $\gamma=135^\circ$	↘ Si $\gamma=135^\circ$	↗	↘ Si $\gamma=135^\circ$	↘ Si $\gamma=135^\circ$	

TABLEAU 4.3 – Effets de l'augmentation de la vitesse de déformation sur l'enveloppe de réponse de la 3M[®] AF 191.

En conclusion, l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement mécanique de cet adhésif diffère en fonction de (1) la présence de compression et (2) la composante observée :

- Suivant les composantes normales en traction et traction-cisaillement, l'augmentation de la vitesse de déformation provoque l'augmentation des niveaux de déformation et des énergies de déformations. En revanche, les niveaux de contrainte et les modules élastiques apparents restent constants.
- Suivant les composantes tangentielles en traction-cisaillement et cisaillement, l'augmentation de la vitesse de déformation provoque une hausse des niveaux de contrainte, des énergies de déformations et des modules élastiques. En revanche, les niveaux de déformation restent constants.
- En compression-cisaillement, les modules élastiques augmentent, les niveaux de contrainte stagnent, les niveaux de déformation et les énergies de déformation chutent.

Ces résultats doivent être corroborés par d'autres études. Au moment de la rédaction de ce mémoire, aucun article traitant de la caractérisation dynamique de la 3M® AF 191 n'a été trouvé dans la littérature.

4.1.3 Bilan

Dans cette section, le comportement mécanique quasi-statique et dynamique de trois adhésifs utilisés dans le secteur des transports a été étudié.

Les résultats obtenus lors des différents essais sont répétables. Ils montrent des évolutions différentes de comportement mécanique, d'un adhésif à un autre et d'une configuration de chargement à une autre. Un récapitulatif des principales observations faites est proposé dans le tableau 4.4.

	Contraintes		Déformations		Modules d'élasticité apparents		Énergies de déformation de l'état initial à $\sigma = \sigma_{max}$		Modes de ruine
	σ_{yy}	σ_{xy}	ε_{yy}	ε_{xy}	En tract./comp.	En cisaillement	E_{xy}	E_{yy}	
Araldite 420 A/B HUNTSMAN	↗	↗	↗ Si $\gamma=45^\circ$	~	↗	↗	↗ (Hors essais de comp.-cis.)	↗	Mixte cohésif/adhésif ⇓ Cohésif
Betamate 1496V Dow	↗	↗	↘	↘	↗	↗	~	↘	Cohésif ⇒ Cohésif
AF 191 3M	~ Si $\gamma=45^\circ$	↗ Si $\gamma=135^\circ$	↗ Si $\gamma=135^\circ$	~ Si $\gamma=135^\circ$	~ Si $\gamma=135^\circ$	↗	↗ Si $\gamma=135^\circ$	↗ Si $\gamma=135^\circ$	Cohésif ⇒ Cohésif

TABLEAU 4.4 – Comparaison des effets de l'augmentation de la vitesse de déformation sur la réponse mécanique des adhésifs étudiés.

Le changement de régime quasi-statique/dynamique peut avoir une incidence sur de nombreux paramètres matériaux rendant l'adhésif « plus fragile » (*e.g.*, la BetamateTM1496 V) ou « plus ductile » (*e.g.*, la 3M® AF 191).

Si, parmi les trois colles étudiées, une seule devait être choisie à partir de son comportement quasi-statique en cisaillement, la BetamateTM1496 V serait sûrement sélectionnée car elle est la plus résistante et la plus ductile dans ces conditions. L'étude expérimentale a néanmoins montré que son comportement mécanique devenait fragile avec l'augmentation de la vitesse de déformation. Par conséquent, son utilisation dans un assemblage pouvant être impacté (où de grands déplacements sont mis en jeu) n'est pas la plus adaptée. En revanche, même si l'Araldite[®] 420 A/B est légèrement moins performante que la BetamateTM en quasi-statique, son comportement en dynamique est bien meilleur : elle garde son caractère ductile et augmente ses niveaux de contrainte lui permettant d'absorber plus d'énergie. Par conséquent, l'utilisation de cette colle dans ce type de structure semble plus appropriée.

En conclusion, la variété de réponses mécaniques obtenues à partir des essais de caractérisation montre la pertinence de l'étude des adhésifs en dynamique pour le développement de structures sujettes à des sollicitations d'impact. Cela justifie, en partie, le développement du moyen d'essais.

Il reste aujourd'hui à comprendre pourquoi les colles étudiées montrent des évolutions différentes de comportement mécanique avec l'augmentation de la vitesse de déformation.

4.2 Comparaison avec des essais standards

Jusqu'à présent l'intégralité des données associées aux adhésifs a été obtenue à partir d'essais réalisés sur des éprouvettes Arcan. Cette section est dédiée à la confrontation de ces résultats avec ceux issus d'essais sur éprouvettes TAST. L'objectif est de vérifier si ces deux tests, de nature très différente, permettent d'identifier un comportement mécanique similaire des joints de colle.

4.2.1 Présentation des éprouvettes TAST modifiées

Dans le cas d'éprouvettes TAST normalisées, des montages dédiés sont généralement utilisés pour assurer le positionnement des deux substrats lors de l'opération de collage [da Silva *et al.*, 2012b]. Cette méthode de mise en œuvre est coûteuse en temps et demande l'usinage de pièces supplémentaires rapportées. Malgré ces dispositifs spécifiques, le positionnement précis des substrats n'est pas garanti.

Afin de palier à ces problèmes, des éprouvettes TAST modifiées, présentées sur la figure 4.19a, ont été développées.

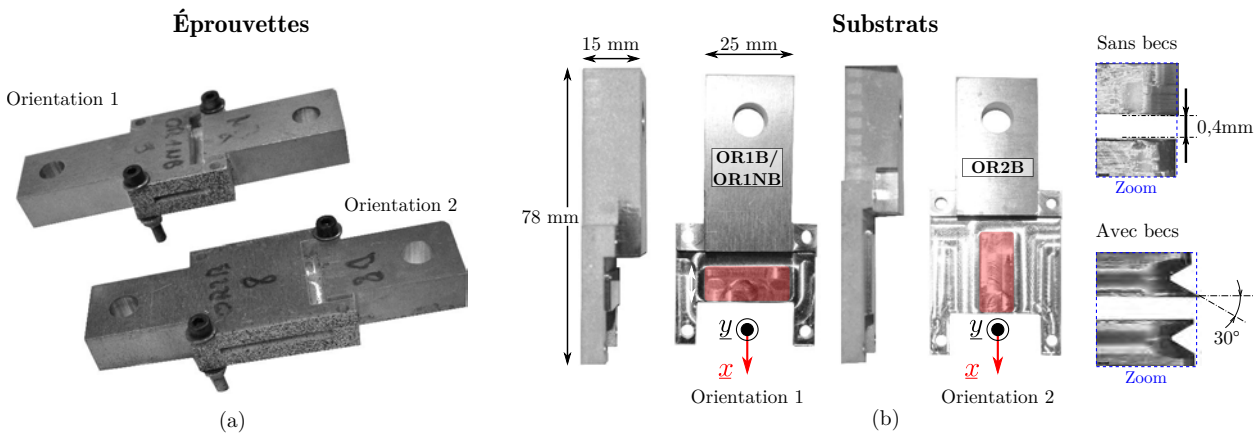


FIGURE 4.19 – (a) Éprouvettes TAST modifiées. (b) Configurations disponibles.

Ces éprouvettes intègrent dans leur géométrie des zones usinées permettant la mise et le maintien en position des substrats *via* l'utilisation de deux vis rectifiées. L'ensemble des opérations d'usinage étant réalisé dans la même phase, le positionnement relatif précis des deux zones de recouvrement permet de maîtriser l'épaisseur du joint de colle avec une tolérance de l'ordre de 10 μm .

Trois géométries différentes d'éprouvette ont été développées :

- Les éprouvettes « OR1B » ont leur zone de recouvrement orthogonale à la direction de chargement (voir « Orientation 1 » sur la figure 4.19b). Elles comportent des becs chanfreinés usinés au niveau des bords libres, formant un angle de 30° avec la zone de recouvrement (voir « Avec becs » sur la figure 4.19b).
- Les éprouvettes « OR1NB » ont leur zone de recouvrement orthogonale à la direction de chargement et comportent des bords droits à leurs extrémités (voir « Sans becs » sur la figure 4.19b).

- Les éprouvettes « OR2B » ont leur zone de recouvrement alignée avec la direction de chargement (voir « Orientation 2 » sur la figure 4.19b). Elles comportent des becs chanfreinés au niveau des bords libres.

Les plans techniques associés à ces trois configurations d'éprouvettes sont présentés en annexe A.

4.2.2 Essais réalisés

Trente-cinq éprouvettes TAST ont été usinées (12 « OR1B », 12 « OR1NB » et 11 « OR1B ») dans des plaques d'aluminium de nuance 7075-T651 (cf. figure 4.20a). La zone de recouvrement mesure 25 mm de long par 10 mm de large et 0,4 mm d'épaisseur.

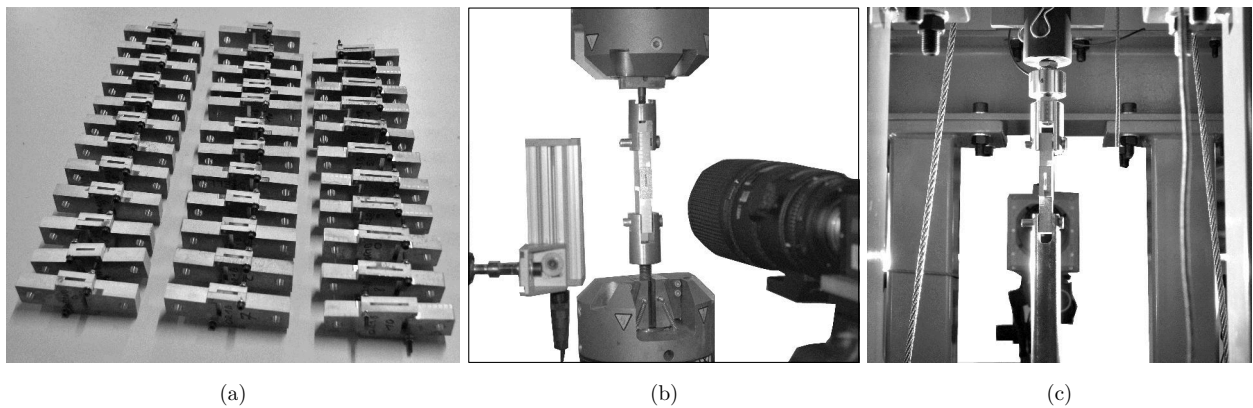


FIGURE 4.20 – (a) Éprouvettes TAST usinées. (b) Dispositif d'essais utilisé en quasi-statique. (c) Dispositif d'essais utilisé en dynamique.

La Dow® Betamate™1496 V est utilisée pour cette étude. Les méthodes de préparation des surfaces et de mise œuvre employées sont les mêmes que pour les éprouvettes Arcan.

Les essais quasi-statiques ont été réalisés entre chapes avec une machine de traction Instron® de capacité 100 kN (cf. figure 4.20b). Le pilotage des essais a été effectué en déplacement avec une vitesse de sollicitation de $0,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. La zone utilisée pour l'extraction des déplacements en quasi-statique mesure 12,5 mm de hauteur par 15 mm de largeur. Elle est filmée à une résolution de 2052 pixels par 2452 pixels. La fréquence d'acquisition des différents signaux est de 1 Hz.

Les essais dynamiques ont été réalisés avec le dispositif de traction dynamique (cf. figure 4.20c). Pour tous les essais, un impacteur de 200 kg a été lâché à une hauteur de 50 cm. La zone utilisée pour l'extraction des déplacements en dynamique mesure 10 mm de hauteur par 17 mm de largeur. Elle est filmée à une résolution de 192 pixels par 320 pixels à 100 kHz. La fréquence d'acquisition du signal d'effort est de 1 MHz.

Un minimum de quatre éprouvettes par série a été testé pour évaluer la répétabilité des résultats.

4.2.3 Résultats et analyses

Les figures 4.21a & b présentent les résultats en contrainte-déformation et en déformation-temps obtenus en quasi-statique. Les courbes tracées sur ces figures montrent une bonne répétabilité des résultats avec, par exemple, des coefficients de variation calculés sur les contraintes maximales et les vitesses de déformation inférieurs à 2 % et 1 %.

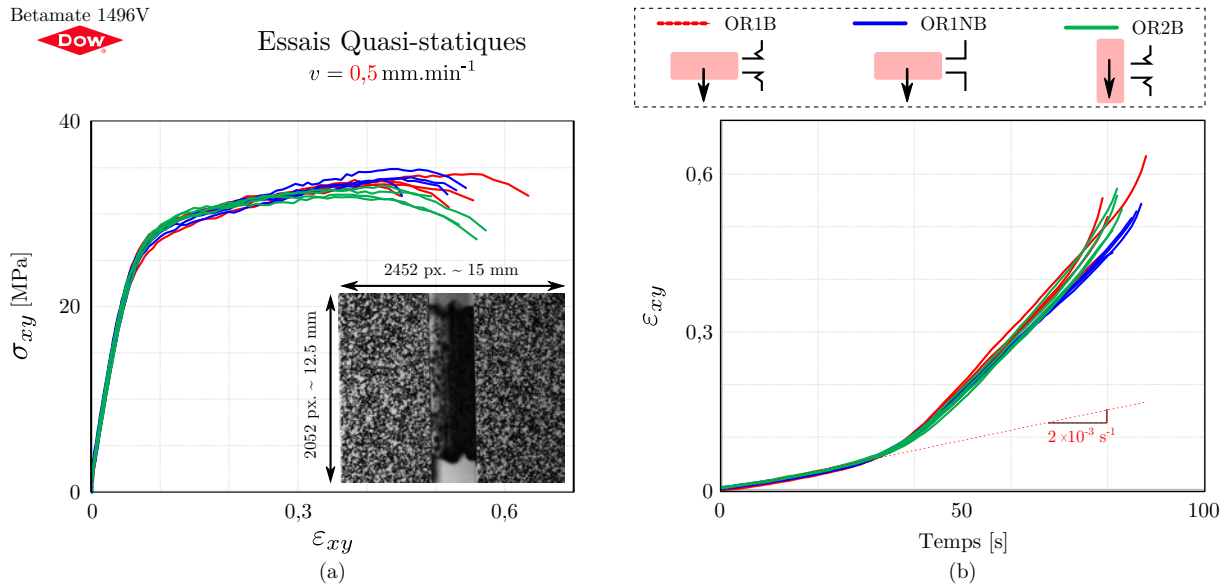


FIGURE 4.21 – Comparaison des résultats quasi-statiques obtenus pour les trois géométries testées. (a) Courbes en contrainte-déformation. (b) Courbes en déformation-temps.

Les vitesses de déformation calculées dans ce régime de sollicitation sont de l'ordre de 10^{-3} s^{-1} . Concernant les comportements mécaniques, les résultats obtenus sont similaires et montrent peu d'influence de l'orientation de la zone de recouvrement ou de la présence de becs sur le comportement mécanique de l'adhésif étudié.

Une comparaison des courbes de réponse extraites en quasi-statique avec l'éprouvette Arcan en configuration de cisaillement et les éprouvettes TAST « OR1B » et « OR1NB » est présentée sur la figure 4.22. Les comportements mécaniques obtenus avec les deux types d'éprouvettes sont similaires sur les niveaux de contrainte et de déformation. Des écarts relatifs d'environ 2 % et 3 % peuvent, par exemple, être mesurés entre les contraintes maximales moyennes des séries « Arcan » & « OR1B » et « Arcan » & « OR1NB ».

Les figures 4.23a & b présentent les courbes en contrainte-déformation et en déformation-temps extraites en dynamique. Les résultats tracés sont répétables (coefficients de variation calculés sur les contraintes maximales et les vitesses de déformation de chaque série inférieurs à 6 % et 7 %).

L'utilisation d'un impacteur de 200 kg lâché d'une hauteur de 50 cm permet de solliciter le joint de colle à des vitesses de déformation calculées de l'ordre de 800 s^{-1} (cf. figure 4.23b). Les résultats tracés la figure 4.23a montrent les mêmes tendances qu'en quasi-statique : il existe une influence non significative de l'orientation de la zone de recouvrement ou de la présence de becs sur le comportement mécanique de l'adhésif étudié.

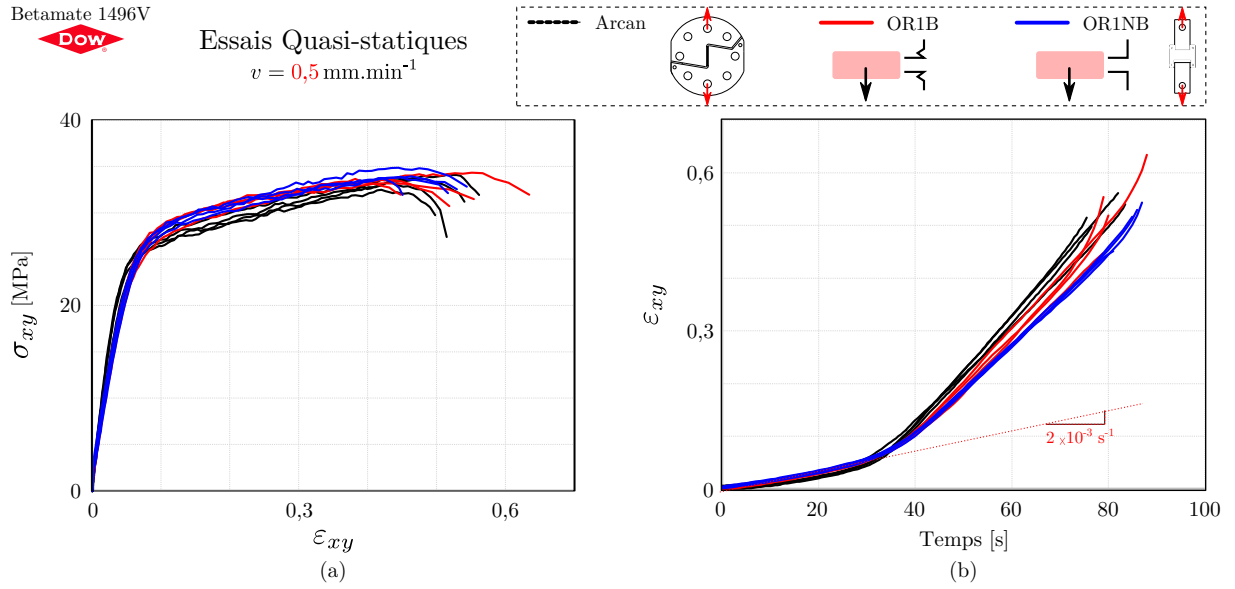


FIGURE 4.22 – Comparaison des résultats quasi-statiques obtenus avec les géométries Arcan et TAST. (a) Courbes en contrainte-déformation. (b) Courbes en déformation-temps.

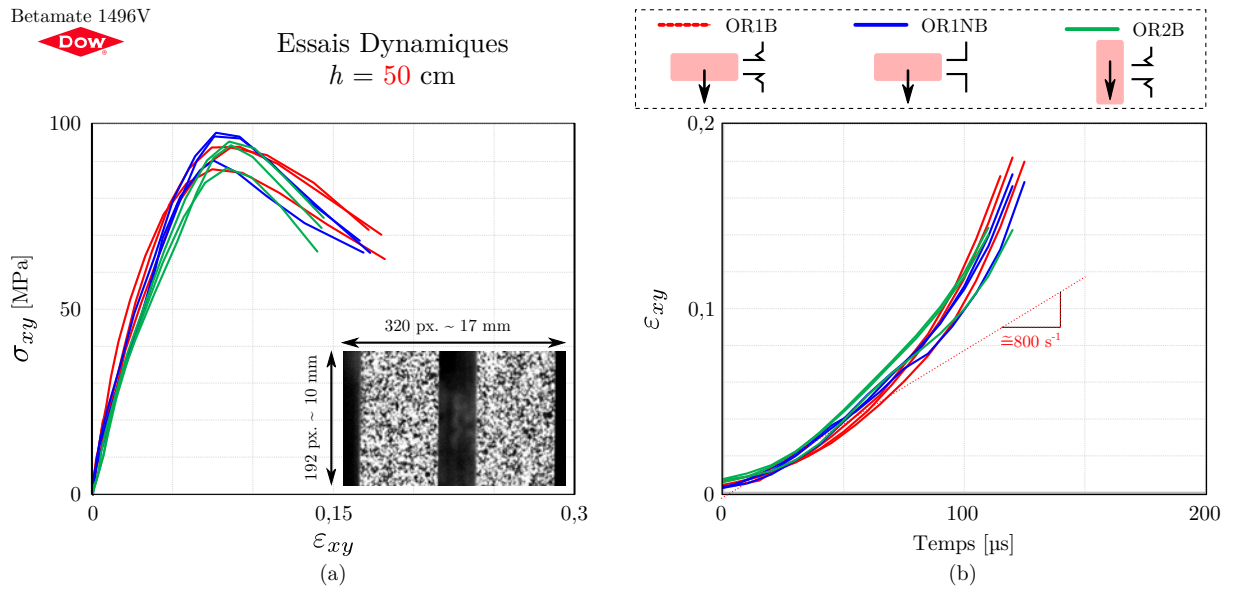


FIGURE 4.23 – Comparaison des résultats dynamiques obtenus pour les trois géométries testées. (a) Courbes en contrainte-déformation. (b) Courbes en déformation-temps.

La figure 4.24 présente une comparaison des résultats dynamiques obtenus avec l'éprouvette Arcan en configuration de cisaillement et les éprouvettes TAST « OR1B » et « OR1NB ».

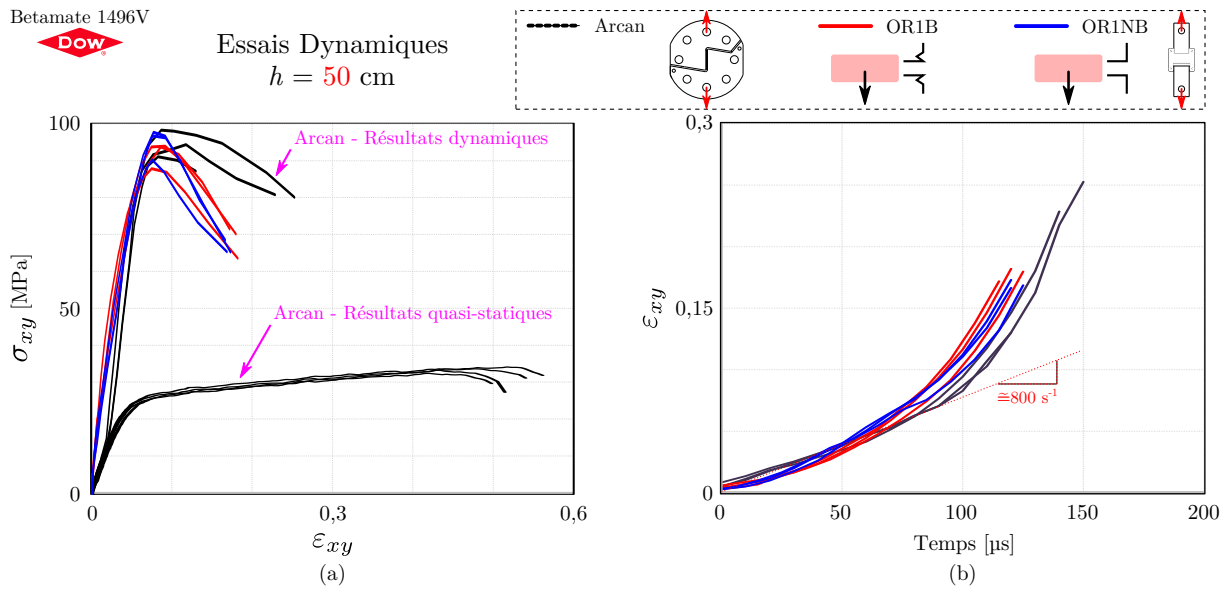


FIGURE 4.24 – Comparaison des résultats dynamiques obtenus avec les géométries Arcan et TAST. (a) Courbes en contrainte-déformation. (b) Courbes en déformation-temps.

Les comportements mécaniques extraits de ces deux types d'éprouvettes sont similaires et montrent la même incidence de l'augmentation de la vitesse de déformation, *i.e.* l'augmentation des niveaux de contrainte et la diminution des niveaux de déformation avec la montée en vitesse de déformation.

4.2.4 Bilan

Dans cette section, le comportement mécanique de la Dow[®] BetamateTM1496 V a été étudié en quasi-statique et dynamique *via* l'utilisation d'éprouvettes de type TAST.

Après avoir vérifié la répétabilité des résultats, il a tout d'abord été démontré que l'orientation de la zone de recouvrement par rapport à la direction de chargement ainsi que la présence de becs avaient une influence non significative. Que ce soit pour les éprouvettes « OR1B », « OR1NB » et « OR2B », les courbes de réponse obtenues sont similaires.

La comparaison des essais TAST et Arcan a été réalisée dans un second temps. Il apparaît que ces deux essais donnent des résultats concordants. Cette étude démontre la capacité de l'essai Arcan à fournir, en cisaillement, des données adaptées à l'étude du comportement mécanique des adhésifs en quasi-statique et en dynamique.

4.3 Conclusions

Dans ce quatrième chapitre, le moyen d'essais développé est mis en œuvre pour réaliser deux études comparatives sur : la caractérisation de trois adhésifs structuraux et la réalisation d'essais standards.

Les adhésifs structuraux choisis pour l'étude de caractérisation diffèrent principalement par leurs fonctions spécifiques (par exemple de fonctionner à des températures élevées ou dans un milieu gras) et leur forme physique (c'est-à-dire mono-composant, en film, etc.). Ces derniers sont principalement utilisés dans des structures aéronautiques et automobiles, sujettes à des sollicitations d'impact durant leur période d'utilisation. Les résultats fournis par les différentes campagnes expérimentales sont répétables et montrent une dépendance prononcée du comportement mécanique des adhésifs étudiés à la vitesse de déformation. Celle-ci se manifeste par des changements de niveaux de contrainte et de déformation qui peuvent évoluer de manière dissemblable d'un adhésif à un autre et d'une configuration de chargement à une autre.

Des éprouvettes TAST modifiées ont été développées et utilisées afin de réaliser la deuxième étude. L'influence de l'orientation de la zone de recouvrement ainsi que la présence de becs à proximité des bords libres a également été investiguée sur cette géométrie d'échantillon. Les résultats obtenus sur les éprouvettes TAST modifiées montrent les mêmes tendances :

- L'orientation de la zone de recouvrement ainsi que la présence de becs au niveaux des bords libres n'ont aucune incidence significative sur le comportement mécanique de l'adhésif étudié.
- Les comportements identifiés avec les éprouvettes Arcan et TAST sont semblables.

Finalement, deux conclusions majeures peuvent être extraites de ces études comparatives :

1. La diversité des réponses mécaniques mise en évidence par les essais quasi-statiques et dynamiques montre la nécessité de prendre en considération le comportement dynamique des adhésifs lors de la conception de structures sujettes à des impacts.
2. Le moyen d'essais développé répond à cette demande et permet d'extraire des données tout aussi pertinentes que celles obtenues avec des géométries d'éprouvettes standards couramment utilisées dans l'industrie.

Ouverture sur la modélisation numérique des adhésifs

Résumé

Ce chapitre est une ouverture sur la modélisation numérique des adhésifs par la méthode des éléments finis.

L'approche développée se base sur l'utilisation d'éléments cohésifs et d'une loi de comportement de type phénoménologique s'inscrivant dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles. L'étude est restreinte au régime quasi-statique. La loi de comportement développée est élastoplastique à écrouissage isotrope avec distinction traction/compression normale et surface de charge elliptique.

L'identification des différents paramètres matériaux est réalisée par méthode directe et inverse à partir de résultats issus d'essais Arcan.

La validation de l'approche numérique mise en œuvre est réalisée sur des essais TAST et simple recouvrement. Dans les deux cas, les prédictions faites par les modèles sont en accord avec les observations expérimentales.

Sommaire

5.1	Contexte de développement du modèle et hypothèses	122
5.2	Modèle de comportement et implémentation	123
5.3	Identification du modèle de comportement sur essais Arcan . .	130
5.3.1	Présentation du modèle éléments finis	130
5.3.2	Identification	132
5.3.3	Validation sur l'essai de traction-cisaillement	136
5.4	Validation du modèle développé sur essais structures	137
5.4.1	Validation sur essai TAST	137
5.4.2	Validation sur essai simple recouvrement	140
5.5	Conclusions	143

5.1 Contexte de développement du modèle et hypothèses

Les travaux présentés dans ce chapitre constituent une ouverture sur la modélisation numérique des adhésifs par la méthode des éléments finis. L'objectif à terme est de pouvoir simuler et prédire, sur la base de données expérimentales issues d'essais Arcan, le comportement mécanique d'assemblages collés sollicités en dynamique rapide.

Dans des conditions d'impact ou de collision, les processus dynamiques mis en jeu engendrent des temps de sollicitation de l'ordre de la centaine de microsecondes. De fait, le développement du modèle proposé est réalisé dans un contexte de simulation en dynamique explicite, adapté à ces conditions [Hiermaier, 2009].

L'étude numérique est réalisée en deux dimensions et reprend l'hypothèse des contraintes planes introduite précédemment. La modélisation de l'adhésif est basée sur l'utilisation d'éléments cohésifs classiquement employés dans la littérature pour modéliser les interfaces et joints de colle dans des modèles complexes à grand nombre de degrés de liberté [Nossek et Marzi, 2009 ; Abaqus, 2012 ; Morin *et al.*, 2013 ; May *et al.*, 2015].

Il existe deux types d'éléments cohésifs : les éléments continus qui connectent les côtés ou les faces de deux éléments solides ou plaques et les éléments discrets qui sont essentiellement des ressorts non linéaires liant les nœuds des éléments à séparer [Abrate *et al.*, 2015]. Ces deux catégories d'éléments utilisent la même approche théorique mais nécessitent des méthodologies de maillage différentes. Dans le cadre du modèle développé, seuls des éléments continus, déjà existants dans Abaqus® et communément employés dans la littérature pour la modélisation des joints collés, sont utilisés [Abaqus, 2012 ; May *et al.*, 2014].

La figure 5.1 illustre l'utilisation d'un élément cohésif et son système de coordonnées local dans un maillage solide en deux dimensions. Le comportement de ce type d'élément est guidé par une loi dite « cohésive » reliant l'état de contrainte $\underline{\sigma} = [\sigma_{yy}, \sigma_{xy}]^T$ dans l'élément au saut de déplacements $\underline{\delta} = [\delta_x, \delta_y]^T$ entre les éléments connectés. Dans le cas d'une modélisation en deux dimensions, le saut de déplacements correspond à un déplacement relatif entre les nœuds inférieurs (notés « 1 » et « 2 » sur la figure 5.1) et supérieurs (notés « 3 » et « 4 » sur la même figure) de l'élément cohésif selon les deux directions $\underline{x}$ et $\underline{y}$ de l'espace. L'état

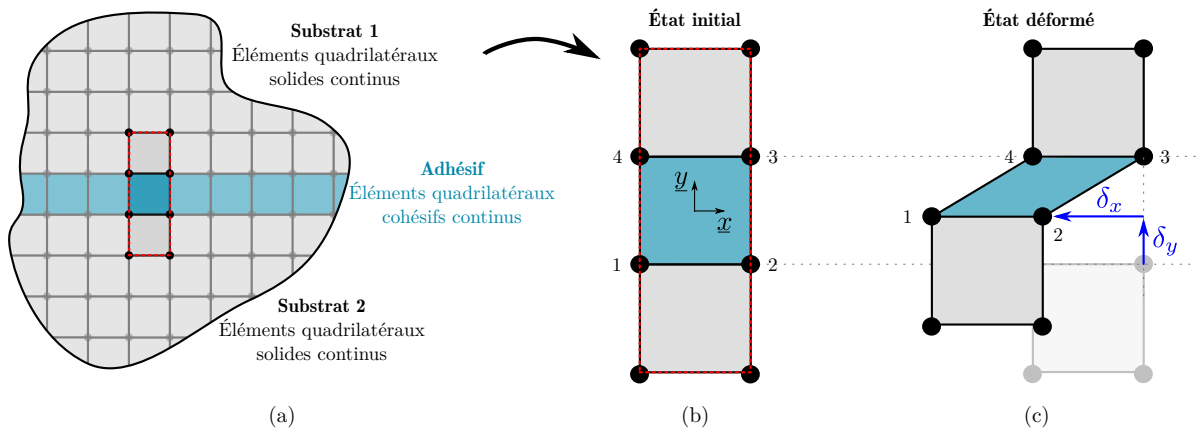


FIGURE 5.1 – Utilisation d'un élément cohésif dans un maillage solide 2D.

de contrainte dans l'élément est donné par une composante normale σ_{yy} et une composante tangentielle σ_{xy} .

À l'origine, les modèles de zones cohésives introduits par Dugdale [Dugdale, 1960] et Barenblatt [Barenblatt, 1962] sont utilisés afin de modéliser une zone de transition entre un matériau sain et un matériau fissuré (par exemple pour la modélisation du délaminage dans les matériaux composites). Dans le cas de la modélisation des joints collés, l'approche originale liée à la modélisation des fissures peut être étendue afin de considérer certains aspects du comportement mécanique de l'adhésif tel que la plasticité, l'endommagement, la dépendance à la vitesse de déformation, etc. [Nossek et Marzi, 2009].

Le modèle de comportement développé est de type phénoménologique et s'inscrit dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles. L'échelle d'étude choisie est celle de l'assemblage collé. Par conséquent, seul le comportement mécanique macroscopique équivalent de l'adhésif est considéré. Pour cette ouverture, l'étude numérique est restreinte au régime quasi-statique afin d'évaluer la pertinence de la stratégie mise en œuvre.

Le modèle développé est intégré au code de calcul par éléments finis Abaqus® *via* la procédure de résolution dynamique/explicite [Abaqus, 2012]. La loi de comportement est programmée suivant une formulation corotationnelle en repère local objectif dans une sous-routine VU-MAT en langage Fortran.

5.2 Modèle de comportement et implémentation

Les résultats obtenus sur la caractérisation de l'Adhésif Dow® Betamate™1496 V sont arbitrairement choisis pour le développement de ce premier modèle. Le comportement mécanique de cette colle sous chargement quasi-statique cyclique (un essai) et monotone (trois essais) de traction et cisaillement est présenté sur la figure 5.2.

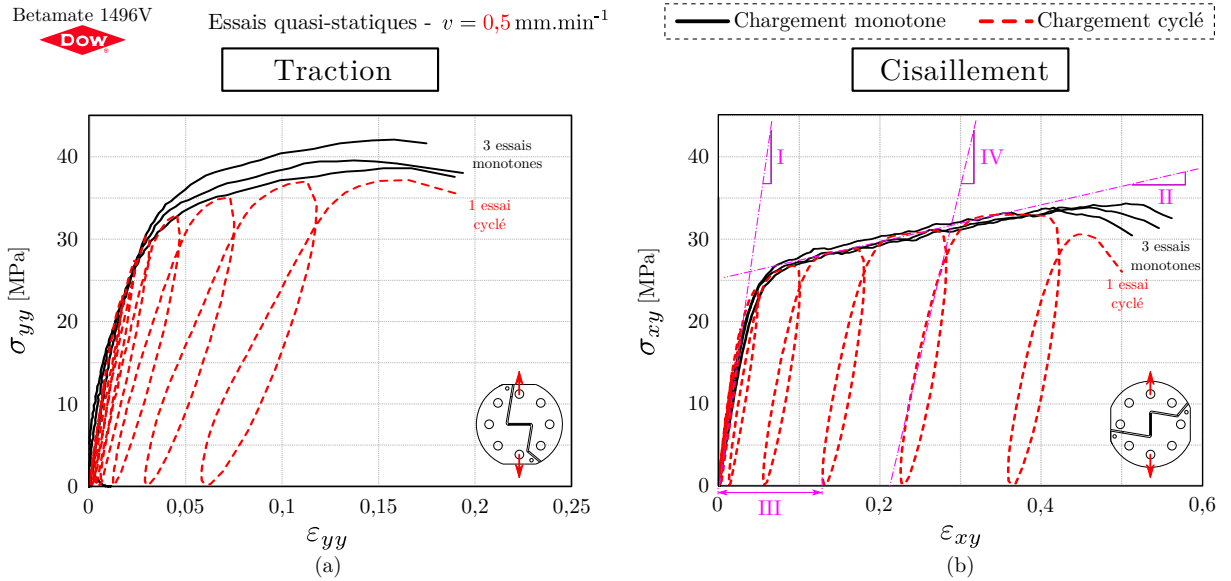


FIGURE 5.2 – Comportement mécanique de la Dow® Betamate™1496 V sous chargement quasi-statique monotone et cyclique. (a) En traction. (b) En cisaillement.

Les résultats obtenus sous chargements cycliques montrent la présence d'une zone élastique jusqu'à une contrainte d'environ 20 MPa pour les deux orientations de sollicitation (cf. « I » sur la figure 5.2b). Au dessus de cette valeur, la rigidité apparente chute en même temps que se produit un écoulement rigidifiant de la matière (« II »). Celui-ci se traduit par la présence de déformations irréversibles (« III ») et d'une chute du module d'élasticité relativement à la rigidité initiale (« IV »). Les résultats montrent également des seuils d'écoulement et des évolutions de la perte de rigidité différents en traction et cisaillement. Afin de simuler le comportement de cet adhésif, deux stratégies peuvent être envisagées concernant le développement de la loi de comportement. La première consiste à essayer de représenter au plus près, l'ensemble des phénomènes observés (perte de raideur *via* l'endommagement, écoulement et déformations plastiques *via* la plasticité, dépendance à la vitesse de déformation *via* la viscosité, etc.). La seconde consiste à se restreindre à reproduire l'enveloppe de réponse de l'adhésif. Elle est adaptée aux situations de crash pour lesquelles les chargements sont généralement monotones. Les développements proposés s'inscrivent dans cette deuxième stratégie.

L'ensemble des éléments cités jusqu'à présent a guidé le choix de la stratégie de modélisation vers le développement d'un modèle élastoplastique ayant pour particularité d'être à écrouissage isotrope avec distinction traction/compression normale et surface de charge elliptique.

Méthode de l'état local

Le modèle développé s'inspire des travaux de thèse de R. Créac'hcadec [Créac'hcadec, 2008]. Il se base sur la méthode de l'état local présentée notamment dans [Germain, 1973 ; Lemaitre et Chaboche, 1994]. Cette méthode postule que « l'état thermodynamique d'un milieu matériel en un point et à un instant donné est complètement défini par la connaissance des valeurs à cet instant d'un certain nombre de variables ne dépendant que du point considéré ». Ces variables sont appelées « d'état » ou « thermodynamiques » et permettent de décrire de manière plus ou moins fine les phénomènes physiques. Celles-ci se scindent en variables observables et internes.

Les variables observables sont imposées par le formalisme de la mécanique et de la thermodynamique des milieux continus (*i.e.* des lois de conservation et entropie). Dans notre cas d'étude, celles-ci correspondent aux déformations totales normale $\varepsilon_{t\sigma}$ et tangentielle $\varepsilon_{t\tau}$.

Les variables internes, non directement mesurables, sont associées aux phénomènes dissipatifs tel que la plasticité, l'endommagement, la rupture etc. Dans le modèle développé, celles-ci sont les déformations plastiques normale $\varepsilon_{p\sigma}$ et tangentielle $\varepsilon_{p\tau}$ (pour modéliser un écoulement à charge constante) et la déformation plastique cumulée p .

Sous l'hypothèse des petites déformations et de la partition additive des déformations, les déformations totales se décomposent en une partie élastique réversible et une partie plastique irréversible, telles que :

$$\varepsilon_{t\sigma} = \varepsilon_{e\sigma} + \varepsilon_{p\sigma} \quad \text{et} \quad \varepsilon_{t\tau} = \varepsilon_{e\tau} + \varepsilon_{p\tau} \quad (5.1)$$

où $\varepsilon_{e\sigma}$ et $\varepsilon_{e\tau}$ sont respectivement les déformations élastiques normale et tangentielle.

Dans le cadre de la modélisation proposée, les déformations sont calculées à partir des sauts de déplacements *via* les relations suivantes :

$$\varepsilon_{t\sigma} = \frac{\Delta u_n}{h} \quad \text{et} \quad \varepsilon_{t\tau} = \frac{\Delta u_t}{2h} \quad (5.2)$$

où Δu_n correspond au saut de déplacement normal, Δu_t au saut de déplacement tangentiel et h à l'épaisseur du joint de colle.

Chacune des variables internes présentée est associée à sa duale qui correspond à une force thermodynamique. Ainsi, les déformations plastiques $\varepsilon_{p\sigma}$ et $\varepsilon_{p\tau}$ sont respectivement associées aux contraintes normale σ et tangentielle τ . De même, la déformation plastique cumulée p admet pour duale la contrainte d'écrouissage isotrope R .

Finalement, l'ensemble des variables utilisées pour modéliser le comportement mécanique de l'adhésif considéré est rassemblé dans le tableau 5.1.

Variables de modélisation		
Variables observables	Variables internes	Forces thermodynamiques associées (variables duales)
$\varepsilon_{t\sigma}$ et $\varepsilon_{t\tau}$	$\varepsilon_{p\sigma}$, $\varepsilon_{p\tau}$ et p	σ , τ et R

TABLEAU 5.1 – Variables de modélisation du comportement mécanique de l'adhésif.

Choix d'un potentiel énergie libre

Les variables d'état étant définies, le potentiel thermodynamique énergie libre spécifique d'Helmholtz $\psi(\varepsilon_{e\sigma}, \varepsilon_{e\tau}, p)$ est introduit. Il correspond à une énergie massique. Afin de prendre en considération le phénomène assimilable à un écoulement plastique non linéaire, celui-ci est choisi sous la forme suivante :

$$\rho\psi(\varepsilon_{e\sigma}, \varepsilon_{e\tau}, p) = \frac{1}{2} [K_\sigma(\varepsilon_{e\sigma})^2 + 2K_\tau(\varepsilon_{e\tau})^2] + \frac{A}{n+1}p^{n+1} \quad (5.3)$$

avec :

- ρ , la masse volumique du matériau considéré ;
- K_σ & K_τ , les modules d'élasticité normal et de cisaillement ;
- A & n , le module d'écrouissage isotrope et la puissance de la loi isotrope. Tous deux sont associés à un écrouissage isotrope non linéaire.

Par dérivation du potentiel énergie libre, les lois d'état suivantes sont obtenues :

$$\begin{cases} \sigma &= \rho \partial_{\varepsilon_{e\sigma}} \psi &= K_\sigma \varepsilon_{e\sigma} &= K_\sigma (\varepsilon_{t\sigma} - \varepsilon_{p\sigma}) \\ \tau &= \rho \partial_{\varepsilon_{e\tau}} \psi &= 2K_\tau \varepsilon_{e\tau} &= 2K_\tau (\varepsilon_{t\tau} - \varepsilon_{p\tau}) \\ R &= \rho \partial_p \psi &= Ap^n \end{cases} \quad (5.4)$$

où $\partial_{\varepsilon_{e\sigma}} \psi$ correspond à la dérivée partielle de ψ par rapport à $\varepsilon_{e\sigma}$.

Elles permettent de relier les contraintes σ , τ & R à leurs duales respectives ε_σ , ε_τ & p .

Lois d'évolution

Afin de construire les lois d'évolution, il est nécessaire de définir un domaine élastique et un potentiel de dissipation.

Le domaine élastique est spécifié par une surface de charge ou surface d'écoulement dans l'espace des contraintes. Elle est fonction des forces thermodynamiques et est choisie sous la forme suivante [Créac'hcadec, 2008] :

$$f(\sigma, \tau, R) = \sqrt{\left(\frac{\langle\sigma\rangle_+}{a_+}\right)^2 + \left(\frac{\langle\sigma\rangle_-}{a_-}\right)^2} + \tau^2 - \sigma^0 - R \quad (5.5)$$

avec :

- $\langle\sigma\rangle_+$, la partie positive de σ telle que, $\langle\sigma\rangle_+ = \sigma$ si $\sigma \geq 0$, 0 sinon ;
- $\langle\sigma\rangle_-$, la partie négative de σ telle que, $\langle\sigma\rangle_- = \sigma$ si $\sigma \leq 0$, 0 sinon ;
- σ^0 , le seuil d'écoulement initial ;
- a_+ et a_- , des constantes associées au ratio d'ellipse de la surface de charge en traction et compression.

Pour définir les lois complémentaires relatives aux processus dissipatifs, un potentiel de dissipation est introduit. Il est fonction des forces thermodynamiques et permet de fournir les lois d'évolution des variables internes. Pour la plasticité, l'emploi de ce potentiel peut conduire à deux schémas appelés « plasticité associée » et « plasticité non associée » [Lemaitre et Chaboche, 1994]. Dans un contexte associé, le potentiel de dissipation est basé sur la définition de la surface de charge. Dans un contexte non associé, la direction de l'écoulement et l'intensité d'écrouissage sont régies par une fonction différente de la surface d'écoulement. Les travaux présentés ici se placent dans un formalisme associé.

La dissipation mécanique intrinsèque volumique s'écrit sous la forme :

$$\phi(\sigma, \varepsilon_{p\sigma}, \tau, \varepsilon_{p\tau}, R, p) = \sigma \dot{\varepsilon}_{p\sigma} + \tau \dot{\varepsilon}_{p\tau} - R \dot{p} \quad (5.6)$$

Elle prend en considération les différents phénomènes dissipatifs à savoir :

- $\sigma \dot{\varepsilon}_{p\sigma}$ et $\tau \dot{\varepsilon}_{p\tau}$, associés à la puissance volumique dissipée par écoulement plastique ;
- $R \dot{p}$, la puissance stockée à long terme sous forme d'écrouissage plastique.

Le principe de Hill [Hill, 1958] postule que, dans un processus irréversible, parmi l'ensemble des chemins d'états possibles, celui qui est observé maximise la dissipation. Par conséquent, il est possible de définir le potentiel thermodynamique de dissipation Φ par pénalisation de l'opposée de la dissipation intrinsèque ϕ :

$$\Phi = \mathcal{L}(-\phi) \quad (5.7)$$

À partir des équations (5.6) et (5.7), il est possible d'écrire :

$$\Phi = -\sigma \dot{\varepsilon}_{p\sigma} - \tau \dot{\varepsilon}_{p\tau} - R \dot{p} + \dot{\lambda}_p f \quad (5.8)$$

où $\dot{\lambda}_p$ correspond au multiplicateur de plasticité, qui est un multiplicateur de Lagrange.

Les conditions d'existence d'un minimum pour Φ aboutissent aux conditions de Karush, Kuhn et Tucker [Karush, 1939 ; Kuhn et Tucker, 1951] :

$$\dot{\lambda}_p \geq 0 \quad f \leq 0 \quad \dot{\lambda}_p f = 0 \quad (5.9)$$

et aux lois d'évolutions :

$$\begin{cases} \partial_\sigma \Phi = 0 & \Leftrightarrow \dot{\varepsilon}_{p\sigma} = \dot{\lambda}_p \partial_\sigma f \\ \partial_\tau \Phi = 0 & \Leftrightarrow \dot{\varepsilon}_{p\tau} = \dot{\lambda}_p \partial_\tau f \\ \partial_R \Phi = 0 & \Leftrightarrow \dot{p} = -\dot{\lambda}_p \partial_R f \end{cases} \quad (5.10)$$

De fait,

- si $f \leq 0$ et $\lambda_p = 0$, aucun processus ne se produit ;
- si $f \geq 0$, il y a dissipation d'énergie et λ_p est recalculé afin d'obtenir $f = 0$.

La détermination du multiplicateur de Lagrange λ_p est réalisée par linéarisation de la condition de consistance qui postule que, au cours d'un phénomène irréversible, la vitesse d'évolution de la surface d'écoulement est nulle :

$$\dot{f} = 0 \quad (5.11)$$

ou encore :

$$f(\sigma + \Delta\sigma, \tau + \Delta\tau, R + \Delta R) = f(\sigma, \tau, R) + \Delta t \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma} \dot{\sigma} + \frac{\partial f}{\partial \tau} \dot{\tau} + \frac{\partial f}{\partial R} \dot{R} \right) = 0 \quad (5.12)$$

Or, d'après la relation (5.10) :

$$\begin{cases} \dot{\sigma} &= \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon_{p\sigma}} \dot{\varepsilon}_{p\sigma} &= \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon_{p\sigma}} \frac{\partial f}{\partial \sigma} \dot{\lambda}_p \\ \dot{\tau} &= \frac{\partial \tau}{\partial \varepsilon_{p\tau}} \dot{\varepsilon}_{p\tau} &= \frac{\partial \tau}{\partial \varepsilon_{p\tau}} \frac{\partial f}{\partial \tau} \dot{\lambda}_p \\ \dot{R} &= \frac{\partial R}{\partial p} \dot{p} &= -\frac{\partial R}{\partial p} \frac{\partial f}{\partial R} \dot{\lambda}_p \end{cases} \quad (5.13)$$

Les expressions (5.12) et (5.13) peuvent s'écrire sous forme incrémentale avec $\Delta\sigma = \dot{\sigma}\Delta t$, $\Delta\tau = \dot{\tau}\Delta t$ et $\Delta R = \dot{R}\Delta t$:

$$f(\sigma^{k+1}, \tau^{k+1}, R^{k+1}) = f + \frac{\partial f}{\partial \sigma} \Delta\sigma + \frac{\partial f}{\partial \tau} \Delta\tau + \frac{\partial f}{\partial R} \Delta R = 0 \quad (5.14)$$

$$\begin{cases} \Delta\sigma &= \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon_{p\sigma}} \Delta\varepsilon_{p\sigma} &= \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon_{p\sigma}} \frac{\partial f}{\partial \sigma} \Delta\lambda_p \\ \Delta\tau &= \frac{\partial \tau}{\partial \varepsilon_{p\tau}} \Delta\varepsilon_{p\tau} &= \frac{\partial \tau}{\partial \varepsilon_{p\tau}} \frac{\partial f}{\partial \tau} \Delta\lambda_p \\ \Delta R &= \frac{\partial R}{\partial p} \Delta p &= -\frac{\partial R}{\partial p} \frac{\partial f}{\partial R} \Delta\lambda_p \end{cases} \quad (5.15)$$

Au final, le multiplicateur de plasticité est calculé avec l'expression suivante :

$$\Delta\lambda_p = \frac{f}{\partial_R f \partial_p R \partial_R f - \partial_\sigma f \partial_{\varepsilon_{p\sigma}} \sigma \partial_\sigma f - \partial_\tau f \partial_{\varepsilon_{p\tau}} \tau \partial_\tau f} \quad (5.16)$$

Le multiplicateur de plasticité est utilisé pour actualiser les variables internes de l'espace des déformations puis les forces thermodynamiques de l'espace des contraintes

Algorithme d'intégration

La méthode d'intégration numérique de la loi de comportement utilisée, dite de retour radial [Ortiz et Simo, 1986 ; Ortiz et Popov, 1985], est basée sur la linéarisation de la condition de consistance et s'effectue en deux étapes présentées sur l'algorithme 1 :

1. Dans un premier temps, une prédiction élastique est réalisée : l'intégralité de l'incrément de déformation est considéré comme étant associé à des phénomènes réversibles. Le critère d'élasticité f est par conséquent calculé à partir des niveaux de contrainte évalués avec un incrément de déformation considéré comme réversible.
2. Si $f > 0$, alors il y a présence de processus irréversible et il est nécessaire de réaliser une correction plastique afin de ramener le matériau à un état thermodynamique admissible.

À l'incrément de calcul i , sont connus :

- L'état thermodynamique du matériau : $\varepsilon_{e\sigma}^i, \varepsilon_{e\tau}^i, \varepsilon_{p\sigma}^i, \varepsilon_{p\tau}^i, p^i, \sigma^i, \tau^i$ et R^i ;
- L'état de déformation total : $\varepsilon_{t\sigma}^i$ et $\varepsilon_{t\tau}^i$.

Passage à l'incrément de calcul $i + 1$:

- Incréments de déformation donnés par le solveur éléments finis : $\Delta\varepsilon_{t\sigma}^{i+1}$ et $\Delta\varepsilon_{t\tau}^{i+1}$.

Prédiction élastique : (k =indice d'itération)

- Calcul des variables internes à l'instant t^{i+1} :

$$\begin{cases} \varepsilon_{e\sigma}^{i+1,k} = \varepsilon_{e\sigma}^i + \Delta\varepsilon_{t\sigma}^{i+1} & ; & \varepsilon_{e\tau}^{i+1,k} = \varepsilon_{e\tau}^i + \Delta\varepsilon_{t\tau}^{i+1} \\ \varepsilon_{p\sigma}^{i+1,k} = \varepsilon_{p\sigma}^i & ; & \varepsilon_{p\tau}^{i+1,k} = \varepsilon_{p\tau}^i \\ p^{i+1,k} = p^i \end{cases}$$

- Calcul des forces thermodynamiques à l'instant t^{i+1} (équation (5.4)) :

$$\begin{cases} \sigma^{i+1,k} = K_{\sigma}\varepsilon_{e\sigma}^{i+1,k} & ; & \tau^{i+1,k} = 2K_{\tau}\varepsilon_{e\tau}^{i+1,k} \\ R^{i+1,k} = A(p^{i+1,k})^n \end{cases}$$

Critère d'élasticité :

- Calcul du critère d'élasticité $f^{i+1,k}$ (équation (5.5)).

Si ($f^{i+1,k} \leq 0$) Alors

| Aucun processus irréversible ne se produit.

Sinon

Correction plastique :

Tant que ($\frac{|f^{i+1,k}|}{\sigma_0} > \text{résidu à convergence fixé}$) faire

- Calcul des termes de dérivées partielles ;
- Calcul du multiplicateur de plasticité $\Delta\lambda_p^{i+1,k}$ (équation (5.16)).
- Actualisation des variables internes :

$$\begin{cases} \varepsilon_{e\sigma}^{i+1,k+1} = \varepsilon_{e\sigma}^{i+1,k} - \Delta\lambda_p^{i+1,k} \partial_{\sigma} f^{i+1,k} & ; & \varepsilon_{e\tau}^{i+1,k+1} = \varepsilon_{e\tau}^{i+1,k} - \Delta\lambda_p^{i+1,k} \partial_{\tau} f^{i+1,k} \\ \varepsilon_{p\sigma}^{i+1,k+1} = \varepsilon_{p\sigma}^{i+1,k} + \Delta\lambda_p^{i+1,k} \partial_{\sigma} f^{i+1,k} & ; & \varepsilon_{p\tau}^{i+1,k+1} = \varepsilon_{p\tau}^{i+1,k} + \Delta\lambda_p^{i+1,k} \partial_{\tau} f^{i+1,k} \\ p^{i+1,k+1} = p^{i+1,k} - \Delta\lambda_p^{i+1,k} \partial_R f^{i+1,k} \end{cases}$$
- Actualisation des forces thermodynamiques :

$$\begin{cases} \sigma^{i+1,k+1} = \sigma^{i+1,k} + \Delta\lambda_p^{i+1,k} \partial_{\sigma} f^{i+1,k} \partial_{\varepsilon_{p\sigma}} \sigma^{i+1,k} \\ \tau^{i+1,k+1} = \tau^{i+1,k} + \Delta\lambda_p^{i+1,k} \partial_{\tau} f^{i+1,k} \partial_{\varepsilon_{p\tau}} \tau^{i+1,k} \\ R^{i+1,k+1} = R^{i+1,k} - \Delta\lambda_p^{i+1,k} \partial_R f^{i+1,k} \partial_p R^{i+1,k} \end{cases}$$
- $k \leftarrow k + 1$;
- Calcul du critère d'élasticité $f^{i+1,k}$ (équation (5.5))

Fin Tant que

Fin Si

Algorithme 1 – Algorithme prédicteur correcteur à retour radial Ortiz & Simo [Ortiz et Simo, 1986 ; Ortiz et Popov, 1985]

5.3 Identification du modèle de comportement sur essais Arcan

L'identification des paramètres du modèle de comportement a été réalisée à partir des courbes expérimentales par méthode directe et inverse [Anghileri *et al.*, 2005 ; Créac'hcadec, 2008].

La méthode directe consiste à déterminer les valeurs des paramètres matériaux du joint de colle accessibles explicitement à partir des résultats expérimentaux.

La méthode inverse est une démarche itérative consistant à déterminer les valeurs des paramètres matériaux non accessibles directement par minimisation de l'écart entre la réponse expérimentale mesurée et la réponse issue d'un modèle analytique [Alfredsson, 2003] ou numérique [Öchsner et Gegner, 2001]. Dans l'objectif de simplifier la démarche par automatisation du processus, le modèle peut être couplé à un algorithme d'optimisation afin de minimiser une fonction coût associée à l'écart entre les données expérimentales et calculées. Dans notre cas d'étude, un modèle éléments finis 2D développé avec une hypothèse de contraintes planes est utilisé pour l'identification des paramètres par méthode inverse. Par contre, aucun algorithme d'optimisation n'a été utilisé à cette étape principalement pour des questions de durée de mise en œuvre.

5.3.1 Présentation du modèle éléments finis

Le modèle éléments finis développé pour l'identification inverse est présenté sur la figure 5.3.

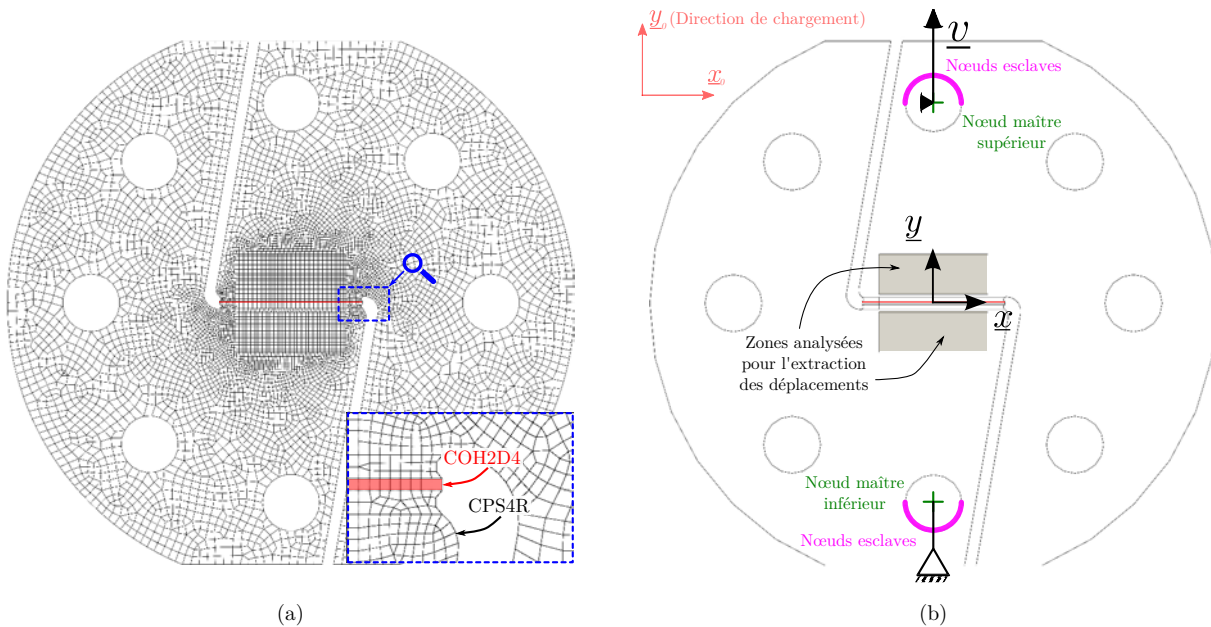


FIGURE 5.3 – Description du modèle éléments finis associé à l'éprouvette Arcan. (a) Maillage. (b) Conditions aux limites.

La géométrie modélisée est fidèle à celle de l'éprouvette Arcan optimisée pour la dynamique utilisée lors des essais expérimentaux. L'adhésif est maillé avec des éléments cohésifs 2D quadrilatéraux à quatre nœuds COH2D4 [Abaqus, 2012] (cf. figure 5.3a). Une seule rangée de

soixante-quatre éléments est utilisée dans l'épaisseur du joint. Les substrats sont maillés avec des éléments solides 2D quadrilatéraux à quatre nœuds et intégration réduite CPS4R [Abaqus, 2012] (cf. figure 5.3a).

Deux zones rectangulaires ont été définies sur les adhérents afin de dépouiller l'essai numérique de manière similaire à l'expérimental (cf. figure 5.3b). Un script PythonTM utilisant l'interface de programmation applicative d'Abaqus[®] a été développé à cet effet. Il permet d'extraire, de manière automatisée, les champs de déplacements associés aux mouvements relatifs des deux substrats de ces zones. Cette étape est similaire à ce qui est réalisé expérimentalement par corrélation d'images. Par conséquent, les algorithmes développés pour l'extraction des déplacements de corps rigides et des déformations moyennes ε_{yy} et ε_{xy} sont réutilisés pour le dépouillement des essais numériques.

La loi de comportement utilisée pour les substrats est élastoplastique et associée au comportement mécanique de l'alliage d'aluminium 7075-T651 composant l'éprouvette. Celle-ci est implémentée de manière tabulée dans Abaqus[®].

Les conditions aux limites sont appliquées sur des nœuds maîtres créés au centre des deux alésages utilisés et définis par leur orientation par rapport à la direction de chargement. Ces nœuds sont reliés *via* une relation de corps rigide à des nœuds esclaves des deux demi-trous chargés (cf. figure 5.3b). Chaque configuration de chargement admet un nœud maître inférieur pour lequel seule la rotation autour de $\underline{z}$ est libre, et un nœud maître supérieur pour lequel la rotation autour de $\underline{z}$ et la translation suivant la direction $\underline{y}_0$ sont libres.

Étant donné le contexte de développement en dynamique explicite et la restriction de l'étude au régime quasi-statique, il a été nécessaire de réaliser une étude d'influence permettant de déterminer la valeur de la vitesse de chargement à imposer. L'objectif de cette démarche a été de déterminer le chargement le plus rapide qui permet d'obtenir, en dynamique explicite, une réponse mécanique similaire à celle qui peut être acquise *via* un calcul de type « standard » en implicite, c'est-à-dire sans effets inertiels.

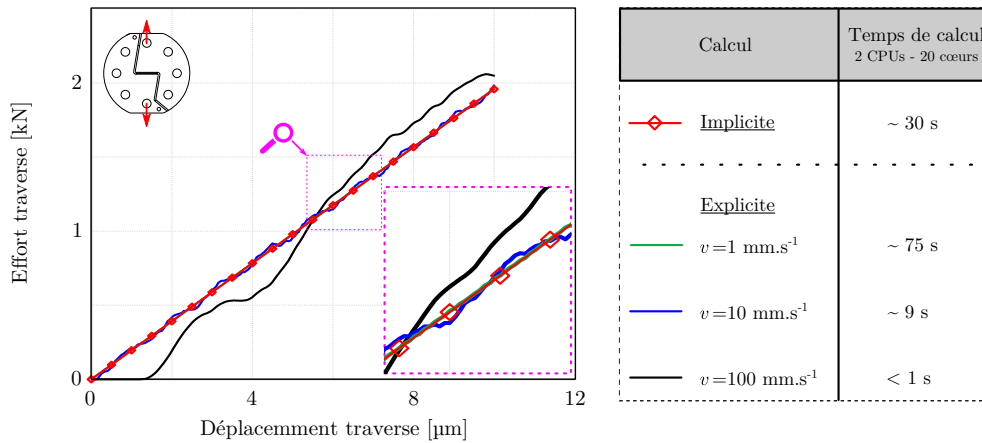


FIGURE 5.4 – Influence de la vitesse de sollicitation imposée sur la réponse mécanique du modèle.

L'analyse a été réalisée sur le modèle en configuration de traction et pour trois vitesses de chargement de 1, 10 et 100 mm.s⁻¹. Les résultats en effort cellule (extrait au nœud maître

inférieur) - déplacement traverse (extrait au nœud maître supérieur) issus de cette étude sont présentés sur la figure 5.4. Ils montrent peu d'influence de la vitesse de chargement sur la réponse mécanique de l'éprouvette pour des valeurs inférieures ou égales à 10 mm.s^{-1} . Cette amplitude a , par conséquent, a été choisie pour le pilotage des différents essais numériques.

5.3.2 Identification

L'identification des paramètres du modèle de comportement est réalisée à partir des courbes expérimentales issues des différents essais Arcan quasi-statiques réalisés sur la BetamateTM1496 V. En pratique, celle-ci peut être décomposée en trois phases : la première consiste à identifier les paramètres associés au comportement en cisaillement de l'adhésif et les deux autres à son comportement en traction puis compression-cisaillement.

En cisaillement

L'identification du modèle de comportement en cisaillement porte sur les paramètres A , n , σ^0 et K_τ :

1. K_τ et σ^0 sont directement obtenus à partir des résultats des essais. K_τ correspond au coefficient directeur de la courbe de réponse de l'adhésif en cisaillement sur sa partie élastique. σ^0 correspond à la contrainte à partir de laquelle la présence de déformations irréversibles est observée.
2. A et n sont déterminés *via* une méthode de recherche itérative. Le module d'écrouissage isotrope A influence principalement la hauteur du plateau de contrainte. La valeur de la puissance de la loi d'écrouissage n permet d'effondrer de manière plus ou moins prononcée la courbe de réponse.

Les autres paramètres du modèle (en particulier a_+ et a_-) ont des valeurs fixées arbitrairement permettant de ne pas perturber cette phase de l'identification.

Les quatre paramètres identifiés par le biais de ces deux étapes sont répertoriés dans le tableau 5.2 suivant :

Paramètres identifiés en cisaillement $\gamma = 90^\circ$			
Module d'écrouissage isotrope A [MPa]	Puissance de la loi d'écrouissage isotrope n [—]	Contrainte seuil de plasticité σ^0 [MPa]	Module d'élasticité tangentiel K_τ [MPa]
22	0,2	14	360

TABEAU 5.2 – Paramètres identifiés en cisaillement.

La figure 5.5 présente un comparatif des courbes de réponse en contrainte-déformation tangentielle obtenues expérimentalement et numériquement à partir d'essais Arcan en configuration de cisaillement. En comparaison avec l'expérimental, les résultats numériques obtenus présentent un écart relatif maximal inférieur à 4 % en contrainte validant la première phase de l'identification.

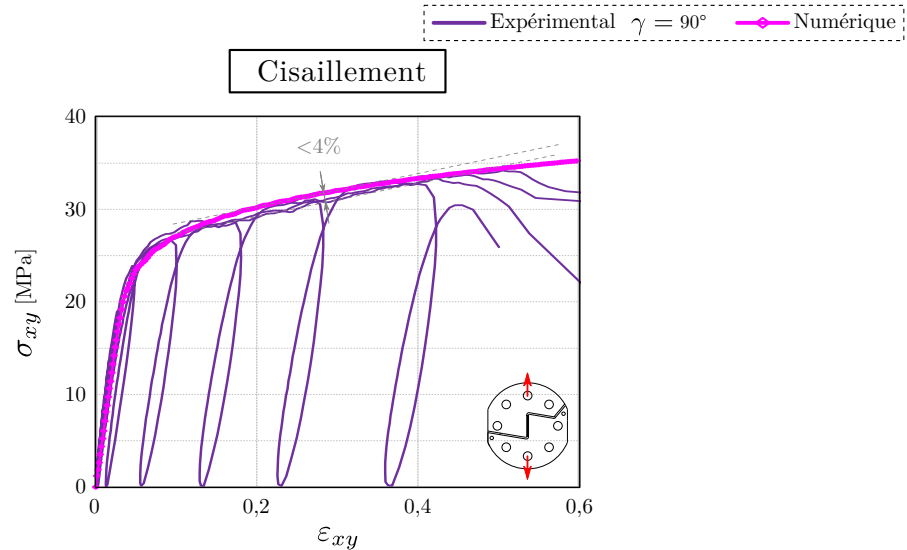


FIGURE 5.5 – Comparaison des réponses mécaniques expérimentales et numériques obtenues sur un essai Arcan en configuration de cisaillement.

En traction

L'identification du modèle en traction porte sur les paramètres K_σ et a_+ :

1. K_σ est extrait des résultats expérimentaux. Il correspond au coefficient directeur de la courbe de réponse de l'adhésif en traction sur sa partie élastique.
2. a_+ est déterminé *via* une méthode de recherche itérative. Ce paramètre permet de modifier le ratio d'ellipse de surface de charge en traction. L'ajustement de sa valeur permet d'influer sur la hauteur du plateau de contrainte en traction.

Les deux paramètres identifiés par le biais de ces deux étapes sont répertoriés dans le tableau 5.3 suivant :

Paramètres identifiés en traction $\gamma = 0^\circ$	
Module d'élasticité normal	Ratio d'ellipse de surface de charge en traction
K_σ	a_+
[MPa]	[–]
2230	1,45

TABLEAU 5.3 – Paramètres identifiés en traction.

La figure 5.6 présente un comparatif des courbes de réponse en contrainte-déformation normale obtenues expérimentalement et numériquement à partir d'essais Arcan en configuration de traction. Un écart relatif maximal inférieur à 8 % est mesuré entre les résultats expérimentaux et numériques sur la plage de réponse utile de l'adhésif. Ces derniers résultats valident la deuxième phase de l'identification.

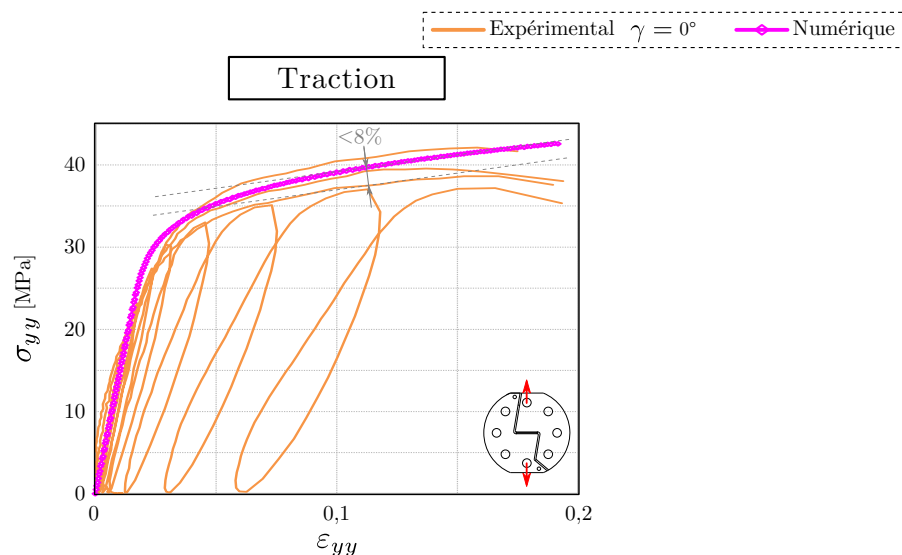


FIGURE 5.6 – Comparaison des réponses mécaniques expérimentales et numérique obtenues sur un essai Arcan en configuration de traction.

En compression-cisaillement

La dernière phase de l'identification porte sur la détermination du paramètre a_- correspondant au ratio d'ellipse en compression. Ne disposant pas d'essais de compression simple, celui-ci est identifié sur les résultats en compression-cisaillement *via* une méthode de recherche directe itérative. De manière similaire à a_+ , la modification de ce terme permet d'ajuster la hauteur du plateau de contrainte en compression.

Le paramètre identifié permettant de se rapprocher au plus de l'expérimental est répertorié dans le tableau 5.4 suivant :

Paramètre identifié en compression-cisaillement	
$\gamma = 135^\circ$	
Ratio d'ellipse de surface de charge en compression	
a_-	
$[-]$	
30	

TABEAU 5.4 – Paramètre identifié en compression-cisaillement.

La figure 5.7 présente un comparatif des courbes de réponse en contrainte-déformation normale et tangentielle obtenues expérimentalement et numériquement à partir d'essais Arcan en configuration de compression-cisaillement.

Expérimentalement, les résultats normaux monotones et cyclé montrent des écarts non-négligeables sur les niveaux des déformations normales ε_{yy} . Par exemple, le module élastique longitudinal moyen calculé à partir des résultats des essais monotones est d'environ 740 MPa alors qu'il est d'environ 1190 MPa pour l'essai cyclé. À ce jour, aucune explication ne permet de justifier avec certitude cet écart. Néanmoins, il est important de préciser que les éprou-

vettes utilisées suivant les deux types de chargement n'ont pas été collées, ni testées le même jour.

L'identification du paramètre a_- a été réalisée à partir de l'enveloppe de la courbe cyclée. De fait, cette dernière est utilisée pour réaliser la comparaison modèle/expérience.

Quelle que soit la composante, les résultats numériques et expérimentaux sont relativement similaires sur la partie élastique. En dessous de 6 % de déformation normale ε_{yy} , le modèle de comportement permet d'obtenir une évolution correcte de l'écrouissage. En cisaillement, la réponse numérique en contrainte est plus faible d'environ 5 % que l'expérimentale jusqu'à une déformation tangentielle ε_{xy} d'environ 25 %. Dans l'état, le modèle actuel ne permet pas de représenter la reprise de contrainte au dessus de ces deux dernières valeurs de déformation.

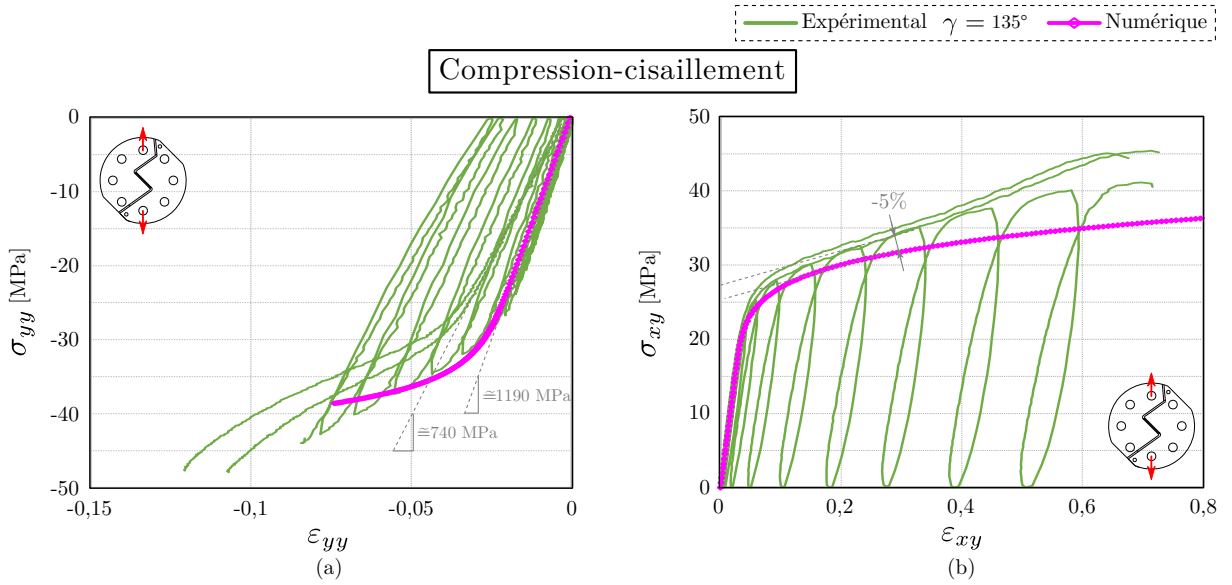


FIGURE 5.7 – Comparaison des réponses mécaniques expérimentales et numérique obtenues sur un essai Arcan en configuration de compression-cisaillement.

Au vu des résultats obtenus en compression-cisaillement, il apparaît nécessaire de réaliser, en perspective, une étude expérimentale et numérique plus approfondie. Celle-ci devra permettre de comprendre les différents phénomènes mis en jeu en compression et compression-cisaillement (effet de confinement, fermeture de bulles d'air, etc.) et leurs conséquences sur la réponse mécanique globale (écrouissage différent en traction et compression, reprise de contrainte, etc.).

5.3.3 Validation sur l'essai de traction-cisaillement

Une première validation du modèle identifié peut être réalisée à partir des résultats issus d'essais Arcan en configuration de traction-cisaillement.

L'ensemble des paramètres matériau de la BetamateTM1496 V identifié est résumé dans le tableau 5.5 suivant :

Récapitulatif des paramètres identifiés						
A [MPa]	n [—]	σ^0 [MPa]	K_τ [MPa]	K_σ [MPa]	a_+ [—]	a_- [—]
18,2	0,2	14	360	2230	1,45	30

TABLEAU 5.5 – Récapitulatif des paramètres identifiés sur essais Arcan.

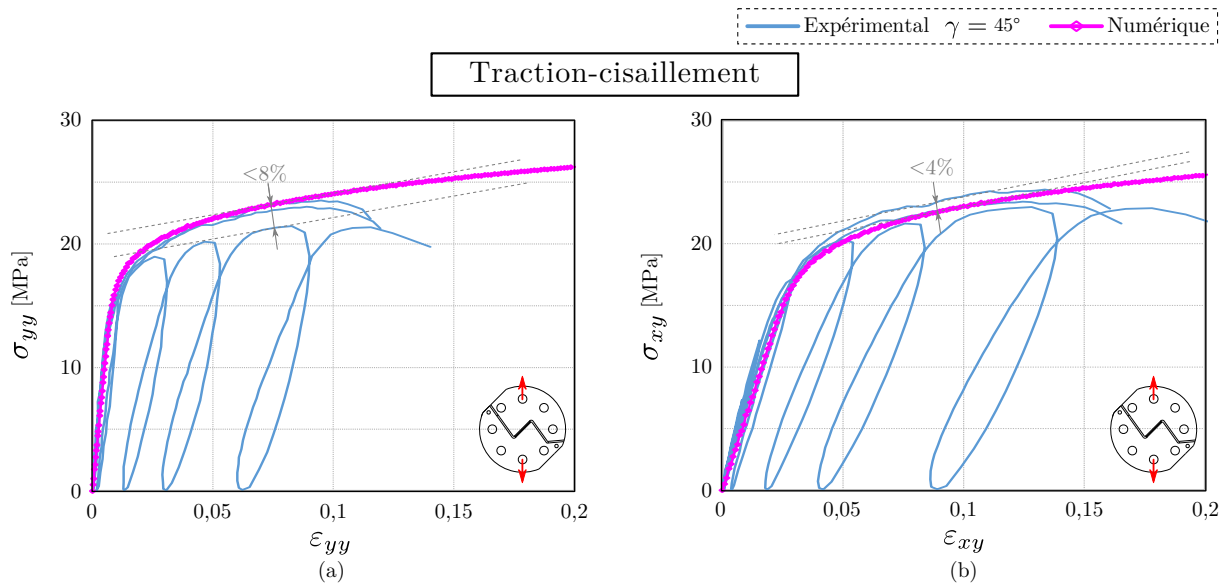


FIGURE 5.8 – Comparaison des réponses mécaniques expérimentales et numérique obtenues sur un essai Arcan en configuration de traction-cisaillement.

Les courbes de réponse en contrainte-déformation numérique et expérimentales obtenues en traction-cisaillement, sont tracées sur la figure 5.8. Des écarts-relatifs maximaux inférieurs à 8 % sur la composante normale et 4 % sur la composante tangentielle peuvent être mesurés sur les niveaux des contraintes entre les courbes numériques et expérimentales. Ces résultats montrent une corrélation essais/calculs satisfaisante et valident le modèle de comportement identifié sur l'essai Arcan en configuration de traction-cisaillement.

5.4 Validation du modèle développé sur essais structures

Dans cette section, les essais structures TAST et simple recouvrement, fréquemment employés dans l'industrie, sont utilisés afin d'évaluer la stratégie de modélisation proposée. Ces deux études numériques sont réalisées dans un contexte de dynamique explicite avec une hypothèse de contraintes planes.

5.4.1 Validation sur essai TAST

Présentation du modèle éléments finis

Le modèle éléments finis 2D développé pour la validation sur essai TAST est présenté sur la figure 5.9.

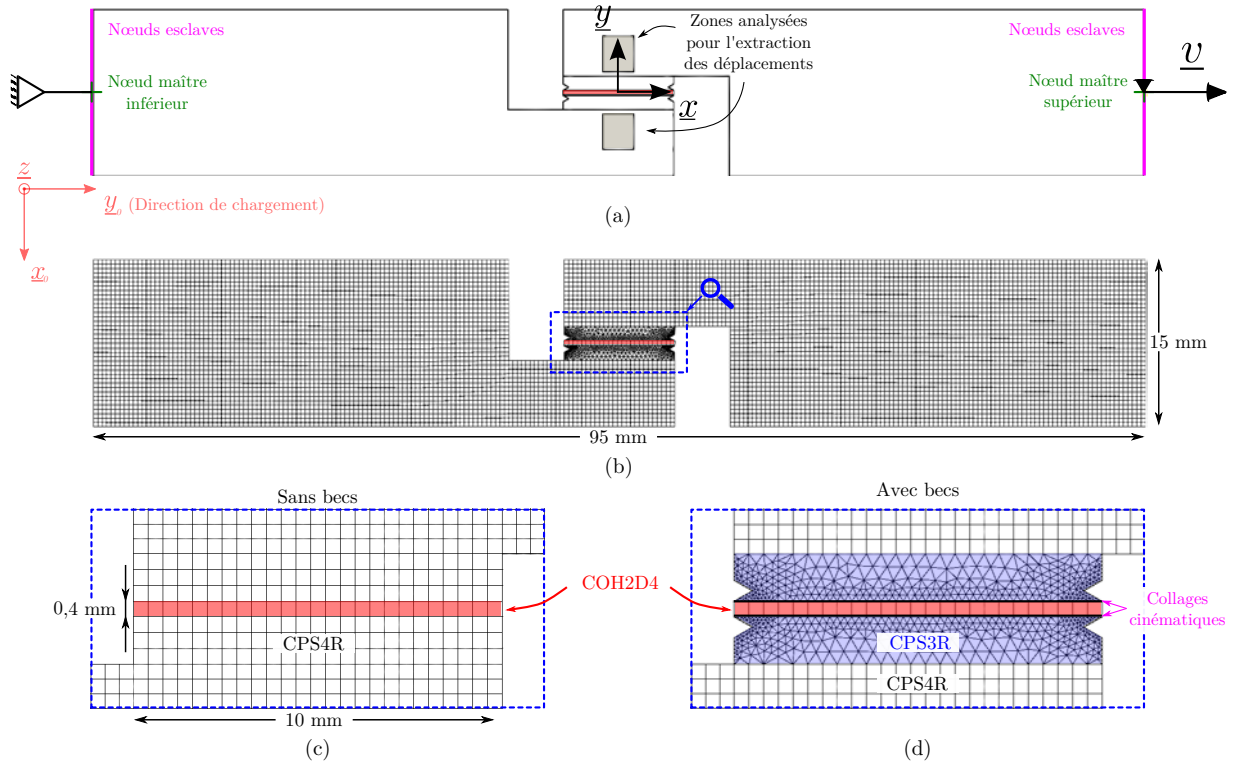


FIGURE 5.9 – Description du modèle éléments finis associé à l'éprouvette TAST. (a) Conditions aux limites. (b) Maillage. (c-d) Zoom sur la zone de recouvrement.

La géométrie globale du modèle est fidèle à celle de l'éprouvette présentée dans le chapitre 4. Deux géométries locales ont été étudiées au niveau des bords libres de la zone de recouvrement : la première avec des bords chanfreinés et la seconde avec des bords droits. Afin de simplifier l'étude, les deux alésages servant à solliciter l'éprouvette n'ont pas été modélisés.

Les conditions aux limites sont appliquées sur des nœuds maîtres (cf. figure 5.9a). Ces derniers sont reliés *via* une relation de corps rigide à des nœuds esclaves présents sur les arêtes des deux extrémités chargées de l'éprouvette. Le nœud maître inférieur peut seulement tourner autour de l'axe $\underline{z}$. Le nœuds maître supérieur peut à la fois tourner autour de $\underline{z}$

et traduire suivant l'axe y_0 correspondant à la direction de sollicitation. L'essai numérique est piloté avec une vitesse imposée de 10 mm.s^{-1} appliquée au nœud maître supérieur.

Deux zones rectangulaires ont été définies sur les substrats afin de dépouiller l'essai numérique de manière similaire à l'essai expérimental. Plusieurs positionnements ainsi que tailles de zones ont été testés. Les résultats issus de cette analyse n'ont montré aucune influence notable de ces paramètres sur les réponses mécaniques extraites.

La loi de comportement utilisée pour les substrats est élastoplastique et associée au comportement mécanique de l'alliage d'aluminium 7075-T651 composant l'éprouvette. Celle-ci est implémentée de manière tabulée dans Abaqus®.

L'adhésif est maillé avec une seule rangée d'éléments COH2D4 de taille unitaire $0,4 \text{ mm}$ par $0,4 \text{ mm}$ dans l'épaisseur (cf. figures 5.9b-d). Les substrats sont maillés avec des éléments CPS4R de même dimension dans le cas où l'éprouvette sans becs est étudiée (cf. figure 5.9c). Des éléments triangulaires à trois nœuds et intégration réduite CPS3R [Abaqus, 2012] sont utilisés localement lorsque l'éprouvette comporte des becs (cf. figure 5.9d). Afin de permettre la flexion des becs, certaines zones ont été maillées plus finement et un collage cinématique a été défini entre les substrats et l'adhésif. Le collage cinématique utilisé est de type *tie* et se base sur une relation de maître à esclave entre les différentes surfaces liées [Abaqus, 2012].

Résultats

La figure 5.10 présente la distribution de la contrainte équivalente de von Mises σ_{eq}^{vM} dans l'éprouvette TAST. La déformée est extraite à un effort imposé de 8 kN correspondant à une contrainte moyenne σ_{xy} d'environ 32 MPa dans l'adhésif.

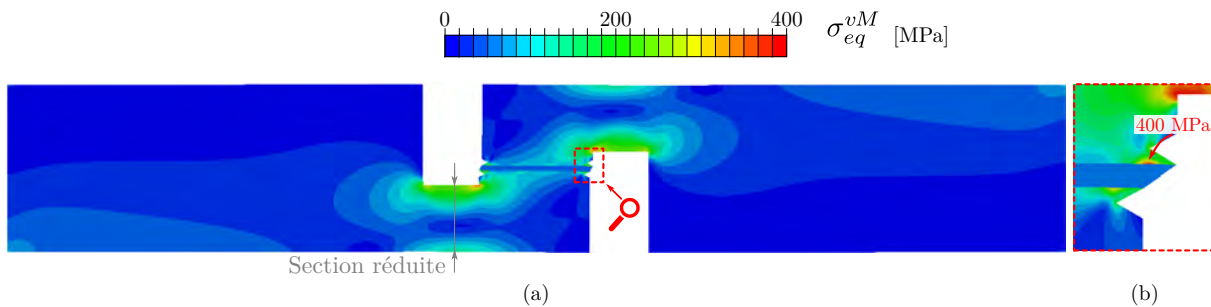


FIGURE 5.10 – (a) Distribution de la contrainte équivalente de von Mises σ_{eq}^{vM} dans l'éprouvette TAST obtenue pour un effort imposé de 8 kN . (b) Zoom sur les becs.

Les résultats montrent la présence de concentrations de contraintes dans les sections réduites des substrats (cf. figure 5.10a). Elles induisent une légère flexion des adhérents générant des contraintes normales σ_{yy} de l'ordre de 3 MPa dans l'adhésif, justifiant l'aspect « structure » de l'essai.

Dans le cas où l'éprouvette comporte des becs, il est intéressant de remarquer que la contrainte maximale est localisée à l'interface adhésif/substrat comme le montre la figure 5.10b. Cette dernière est la conséquence de la flexion des becs au cours de l'essai.

La figure 5.11 présente un comparatif des courbes de réponse en contrainte-déformation tangentielle obtenues expérimentalement et numériquement à partir des essais TAST.

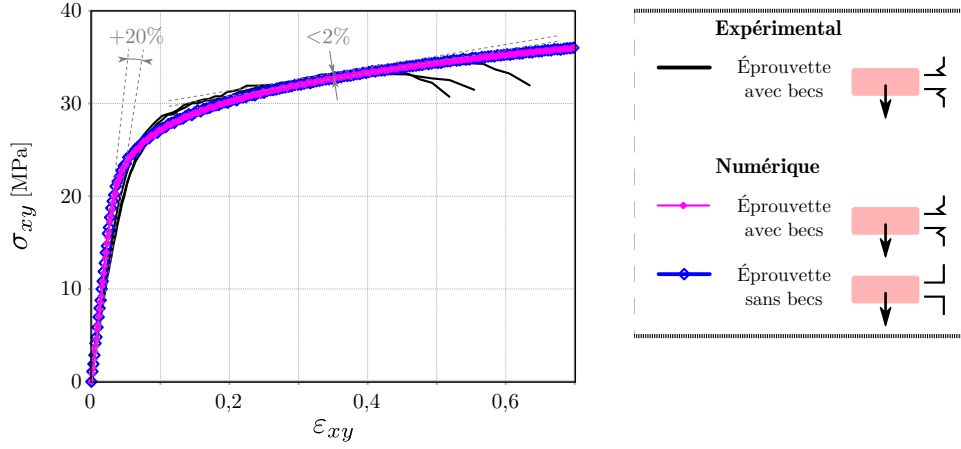


FIGURE 5.11 – Comparaison des réponses mécaniques expérimentales et numériques obtenues sur un essai TAST.

Les résultats numériques ne montrent aucune incidence notable de la présence de becs sur la réponse mécanique de l'adhésif. Ce qui est en adéquation avec les observations expérimentales. La comparaison essais/calcul montre une corrélation satisfaisante des résultats numériques avec ceux issus des essais expérimentaux. Par exemple, un écart relatif maximal inférieur à 2 % est mesuré en contrainte entre les courbes expérimentales et numériques sur l'écoulement plastique. Toutefois, un écart sur le module de cisaillement mesuré peut être remarqué : celui-ci est environ 20 % plus élevé sur la réponse numérique en comparaison avec les courbes expérimentales (cf. figure 5.11).

L'évolution de la déformation ε_{xy} au cours du temps est tracée sur la figure 5.12.

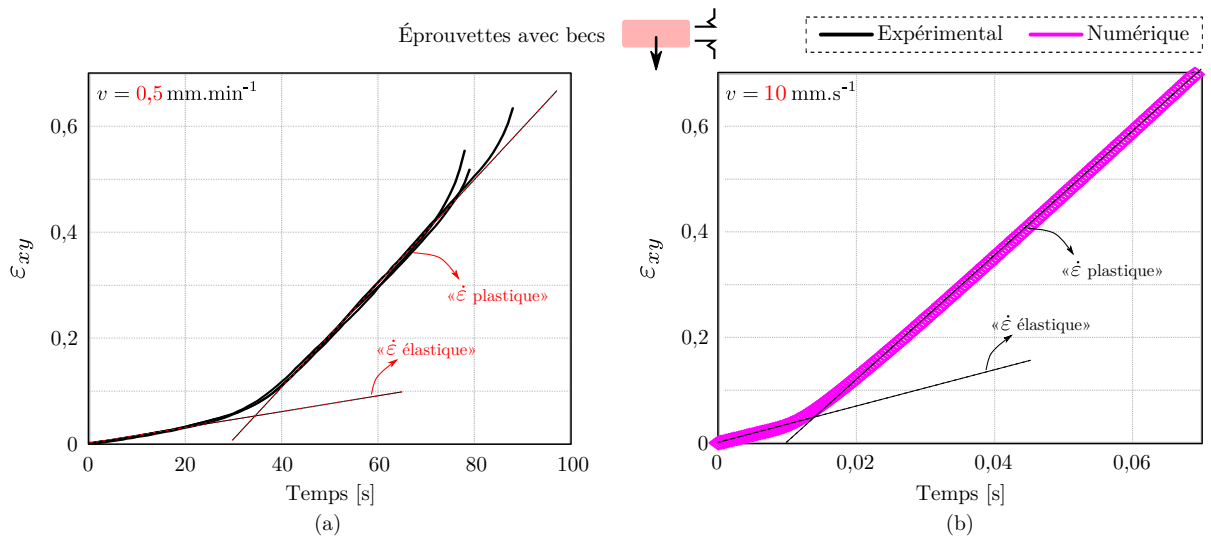


FIGURE 5.12 – Évolution de la déformation ε_{xy} en fonction du temps obtenu à partir de l'éprouvette TAST avec becs. (a) Résultats expérimentaux. (b) Résultat numérique.

Les résultats numérique et expérimentaux sont issus de l'éprouvette TAST avec becs. Ils sont tracés sur deux graphiques distincts en raison de la différence des vitesses de sollicitation imposées. Ils montrent, néanmoins, des tendances similaires : le résultat numérique présente, en adéquation avec les résultats expérimentaux, une évolution bilinéaire de la déformation au cours du temps. Celle-ci est associée au comportement mécanique élastoplastique de l'adhésif.

5.4.2 Validation sur essai simple recouvrement

Présentation du modèle éléments finis

Le modèle éléments finis 2D développé pour la validation sur essai simple recouvrement est présenté sur la figure 5.13.

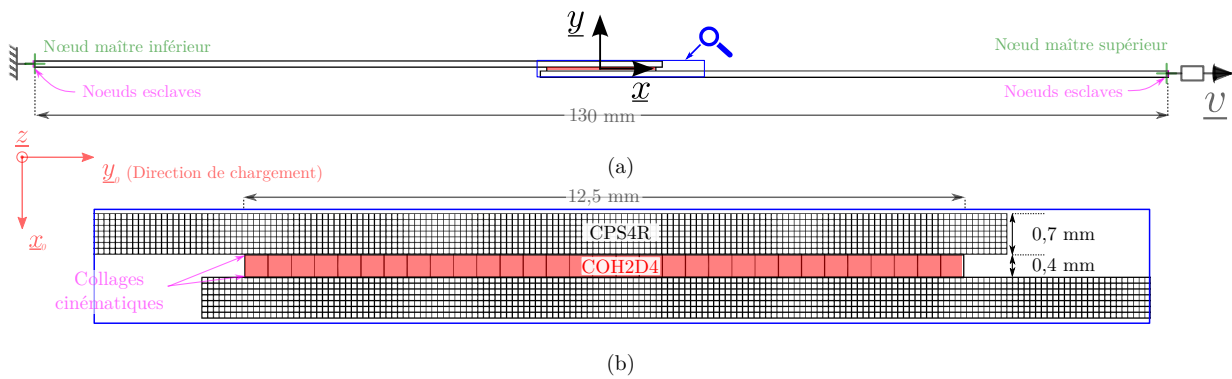


FIGURE 5.13 – Description du modèle éléments finis associé à l'éprouvette simple recouvrement. (a) Conditions aux limites. (b) Maillage.

Les dimensions de l'éprouvette modélisée sont fixées par des standards utilisés par Arcelor-Mittal (disponibles en annexe A). La zone de recouvrement mesure 12,5 mm de long par 25 mm de large et 0,4 mm d'épaisseur. Les substrats ont une épaisseur de 0,7 mm.

Les conditions aux limites sont appliquées sur des nœuds maîtres (cf. figure 5.13a). Ces derniers sont reliés *via* une relation de corps rigide à des nœuds esclaves présents sur les arêtes des deux extrémités chargées de l'éprouvette. Expérimentalement, les éprouvettes ont été serrées dans les mors d'une machine de traction. Par conséquent, le nœud maître inférieur est encasté et le nœud maître supérieur peut uniquement translater suivant l'axe y_0 correspondant à la direction de sollicitation. L'essai numérique est piloté avec une vitesse imposée de 100 mm.s^{-1} appliquée au nœud maître supérieur.

Le modèle est maillé avec des éléments quadrilatéraux COH2D4 dans l'adhésif et CPS4R dans les substrats (cf. figure 5.13b). Une seule rangée de trente-et-un éléments est utilisée dans l'épaisseur de l'adhésif. Étant donné que les substrats fléchissent durant l'essai, ces derniers ont été maillés plus finement avec des éléments de 0,1 mm par 0,1 mm et un collage cinématique a été réalisé entre l'adhésif et les adhérents. Le collage cinématique est de type *tie* et se base sur une relation de maître à esclave entre les différentes surfaces liées.

Les substrats sont en acier DX54 dont la loi de comportement est tracée sur la figure 5.14 (ressource interne ArcelorMittal, n° d'étude MT0047, suivant la norme NF ISO 6892-1).

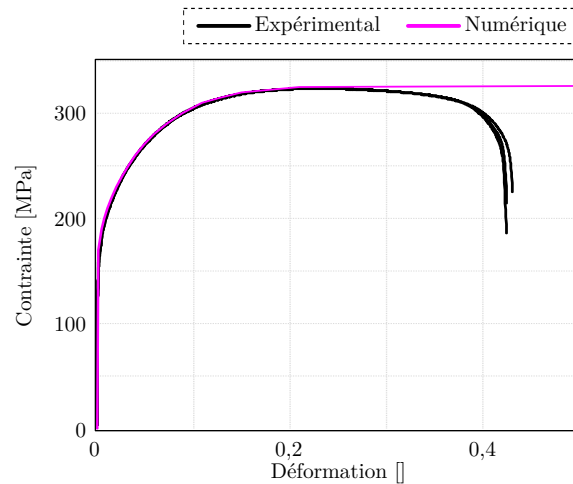


FIGURE 5.14 – Comportement mécanique de l’acier DX54 composant les substrats.

Son implémentation dans Abaqus® a été réalisé *via* une loi élastoplastique tabulée identifiée sur les résultats expérimentaux.

Résultats

La figure 5.15 présente un comparatif des courbes de réponse en effort cellule (extrait au nœud maître inférieur) - déplacement traverse (extrait au nœud maître supérieur) obtenues expérimentalement et numériquement à partir des essais simple recouvrement.

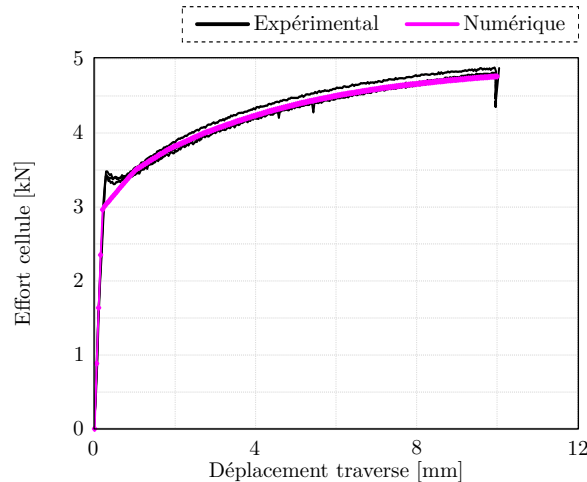


FIGURE 5.15 – Comparaison des réponses mécaniques expérimentales et numériques obtenues sur un essai simple recouvrement.

Bien que les paramètres matériaux de l’adhésif aient été identifiés à partir de substrats en aluminium et que l’essai simple recouvrement modélisé utilise des substrats en acier, la courbe de réponse extraite du calcul numérique se superpose aux résultats expérimentaux.

Une comparaison expérimentale et numérique du déroulement d’un essai simple recouvrement est présentée sur la figure 5.16. Celle-ci montre l’évolution de l’état de contrainte

ainsi que la déformée de l'éprouvette à plusieurs niveaux d'effort. Un marqueur jaune a été positionné sur un motif caractéristique du mouchetis afin d'observer le déplacement de la zone de recouvrement sur les images issues des essais expérimentaux.

À l'état initial, les deux substrats sont parallèles et orientés verticalement. L'adhésif est principalement sollicité en cisaillement pour un effort imposé inférieur à 1 kN. Par la suite, les deux substrats fléchissent de manière progressive aux niveaux des extrémités de la zone de recouvrement jusqu'à un effort de 2,8 kN. Cette cinématique de déformation permet d'annuler le moment généré par le désaxage initial des substrats. Néanmoins, elle a pour conséquence de modifier la nature du chargement de l'adhésif créant du pelage aux extrémités de la zone de recouvrement. Une fois les substrats « alignés », les différents éléments de l'éprouvette se déforment de manière élastique puis plastique générant de grands déplacements, jusqu'à la rupture de l'adhésif obtenue à un effort de 4,7 kN.

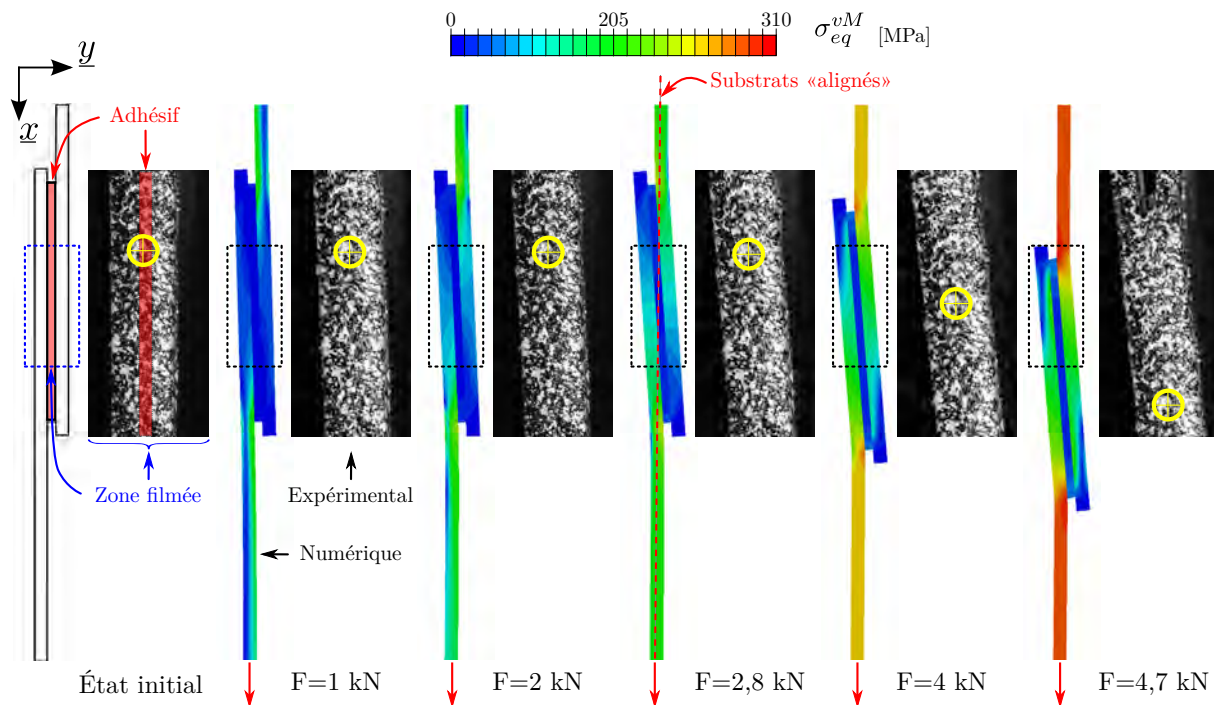


FIGURE 5.16 – Comparaison essai/calcul du déroulement d'un essai simple recouvrement.

L'ensemble des étapes décrites montre la complexité de cet essai : la réponse mécanique globale mesurée est la conséquence de plusieurs phénomènes associés à la déformation de l'adhésif et des substrats. La comparaison essai/calcul présentée sur la figure 5.16 montre clairement que le modèle développé permet de capter ces subtilités associées à cet essai structure.

5.5 Conclusions

Dans ce dernier chapitre, une ouverture sur la modélisation numérique des adhésifs par la méthode des éléments finis est présentée. L'objectif de cette démarche est de pouvoir à terme simuler et prédire le comportement mécanique de structures collées grande échelle en dynamique rapide.

Le développement du modèle proposé est réalisé dans un contexte de simulation en dynamique explicite avec une hypothèse de contraintes planes. Ce travail se limite, dans un premier temps, à l'étude du comportement de la BetamateTM1496 V en quasi-statique. La modélisation de l'adhésif est réalisée par l'intermédiaire d'éléments cohésifs.

Le modèle de comportement est de type phénoménologique et s'inscrit dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles. Son développement se base sur la méthode de l'état local et représente un comportement élastoplastique à écrouissage isotrope avec distinction traction/compression normale et surface de charge elliptique. L'intégration de la loi de comportement développée a été réalisée *via* un algorithme prédicteur correcteur à retour radial Ortiz & Simo. Celui-ci a été programmé en Fortran dans une sous-routine VUMAT suivant une formulation corotationnelle en repère local objectif.

L'identification des paramètres du modèle de comportement a été réalisée à partir des essais Arcan en configuration de cisaillement, traction et compression-cisaillement par méthode inverse.

Pour cela, un modèle éléments finis spécifique a été développé et intégré au code de calcul Abaqus[®]. Celui-ci permet de dépouiller les essais numériques de manière identique aux essais expérimentaux.

Enfin, une méthode de recherche directe itérative a été utilisée afin de minimiser l'erreur entre les résultats expérimentaux et numériques.

La validation du modèle a été réalisée par la confrontation des résultats expérimentaux et numériques issus des essais quasi-statiques Arcan en traction-cisaillement, TAST et simple recouvrement. Dans tous les cas, le modèle a démontré sa capacité à reproduire la réponse mécanique en force-déplacement mesurée expérimentalement ainsi que la cinématique de chargement de l'adhésif.

Il reste aujourd'hui à améliorer la modélisation du comportement de l'adhésif en compression, à introduire la prise en compte des effets vitesses et à prédire la rupture.

Conclusions générales & perspectives

Les travaux de thèse ont porté sur le développement d'une démarche expérimentale permettant de caractériser le comportement mécanique d'adhésifs sous sollicitations dynamiques combinées.

Étude préliminaire

Une étude bibliographique a d'abord été réalisée pour positionner le problème de recherche. Un état de l'art des principales méthodes expérimentales existantes a permis d'identifier une géométrie d'éprouvette ainsi qu'un dispositif de sollicitation pouvant être adapté à la caractérisation des adhésifs sous sollicitations dynamiques combinées. L'éprouvette Arcan TCS est dédiée à l'extraction d'enveloppe de réponse quasi-complète d'adhésifs en quasi-statique. Sa conception lui permet de générer des distributions quasi-uniformes des contraintes dans le joint de colle. Les dispositifs à poids tombant sont simples à mettre en œuvre, modulables et permettent de générer des vitesses de déformation d'intérêts pour la caractérisation liée au secteur du transport. Ces deux éléments ont, par conséquent, été choisis pour réaliser une première étude préliminaire à la fois numérique et expérimentale. L'influence de la hauteur de chute et de la masse de l'impacteur sur le comportement dynamique de l'essai a été étudiée. Trois conclusions majeures sont ressorties de cette analyse :

1. Les résultats expérimentaux obtenus sont pertinents et montrent une dépendance marquée du comportement de l'adhésif testé à la vitesse de déformation pour l'ensemble des sollicitations (traction, traction-cisaillement, cisaillement et compression-cisaillement).
2. Une masse importante est essentielle afin de produire un chargement stable et uniforme de l'adhésif au cours de l'essai.
3. L'éprouvette et le dispositif de sollicitation utilisés ne sont pas dimensionnés pour les niveaux de chargement souhaités. Le développement d'un moyen d'essais adapté s'avère nécessaire.

Développement d'une démarche expérimentale

Le développement d'un moyen d'essais a porté sur deux aspects : l'extension de l'éprouvette Arcan TCS à la sollicitation dynamique et la conception d'un dispositif de traction à hautes vitesses de sollicitation.

Un travail numérique d'optimisation a d'abord été réalisé sur la géométrie originale ainsi que sur le matériau des substrats. L'éprouvette définie est dimensionnée pour des niveaux d'effort inférieurs à 30 kN.

La conception du dispositif de traction dynamique repose sur les travaux de Beevers & Ellis et des moyens d'essais à barres d'Hopkinson à collision utilisés en traction directe. Le

montage est prévu pour être positionné sous une tour de chute existante. Son développement est basé autour d'une contrainte principale : assurer la monotonie du chargement de l'éprouvette jusqu'à la rupture de l'échantillon. L'utilisation d'un impacteur lourd et d'une barre permettant de transmettre les efforts issus de l'impact à l'éprouvette sont prévus à cet effet. Le dimensionnement de la barre a été réalisé par la méthode des éléments finis sur l'étude d'un système masse/ressorts équivalent. Finalement, le dispositif développé permet de solliciter l'éprouvette avec des vitesses de sollicitation allant de 1 m.s^{-1} à $5,5 \text{ m.s}^{-1}$ et des énergies comprises entre $5 \times 10^1 \text{ J}$ et $5 \times 10^3 \text{ J}$.

Les moyens expérimentaux développés ont été mis en œuvre pour la réalisation de plusieurs campagnes. Une méthode d'extraction des données en « contrainte moyenne équivalente »-« déformation moyenne » a été développée pour analyser les essais.

Dans un premier temps, ces essais ont servi à valider les différents choix de conception. Le même adhésif que celui étudié dans l'étude prospective a servi à coller des éprouvettes Arcan TCS et Arcan optimisée. Différentes hauteurs de chute et masses d'impacteur ont été testées. Dans un second temps, le moyen développé a été mis en œuvre pour la caractérisation de trois adhésifs structuraux utilisés dans les secteurs aéronautique et automobile. L'enveloppe de réponse des trois colles a été extraite pour deux vitesses de déformation et quatre directions de chargement.

Enfin, des essais sur éprouvettes TAST ont été réalisés avec le dispositif de traction dynamique. Pour cette campagne, des éprouvettes spécifiques ont été conçues avec différentes orientations de la zone de recouvrement et différentes géométries au niveau des bords libres de la zone collée.

De ces campagnes expérimentales, quatre conclusions principales ont été tirées :

1. Dans l'état, le moyen d'essais développé permet de caractériser de manière fiable et répétable le comportement dynamique des adhésifs à des vitesses de déformation comprises entre $4 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ et 10^3 s^{-1} (obtenues avec des hauteurs de chute comprises entre 20 cm à 60 cm). Pour des hauteurs de chute plus faibles, le guidage insuffisant du poids tombant rend l'essai aléatoire.
2. Dans cette plage de hauteur de chute, un impacteur de 100 kg est suffisant pour assurer la monotonie du chargement.
3. La diversité des réponses mécaniques extraites des différents essais quasi-statiques et dynamiques montre la nécessité de prendre en considération le comportement dynamique des adhésifs lors de la conception de structures sujettes à des impacts.
4. Les données extraites avec l'éprouvette Arcan optimisée sont tout aussi pertinentes que celles obtenues avec des géométries d'éprouvettes standards utilisées dans l'industrie.

Ouverture sur la modélisation des adhésifs

En parallèle des travaux expérimentaux, une ouverture sur la modélisation numérique des adhésifs a été réalisée. La stratégie de modélisation se base sur l'utilisation d'éléments cohésifs et d'une loi de comportement développée suivant la méthode de l'état local. Cette première étude numérique a été restreinte au régime quasi-statique.

Le modèle développé est de type élastoplastique à écrouissage isotrope avec distinction traction/compression normale et surface de charge elliptique. L'identification des différents paramètres matériaux a été réalisée par méthode directe et inverse à partir de résultats issus d'essais sur éprouvettes Arcan.

La stratégie de modélisation et la loi de comportement identifiée ont ensuite été employées pour modéliser des essais orientés « structure » de type TAST et simple recouvrement.

La validation du modèle a été réalisée par la confrontation des résultats expérimentaux et numériques. Dans tous les cas, les prédictions faites par les simulations numériques concernant la réponse mécanique de la structure ainsi que sa cinématique de chargement sont en adéquations avec les résultats expérimentaux.

Perspectives de recherche

Les prolongements de ces travaux de thèse sont multiples.

Un première perspective concerne le moyen expérimental et l'extension de sa plage d'essais effective.

Afin de pouvoir solliciter un adhésif à des vitesses de déformation de l'ordre de 10^1 s^{-1} , il est nécessaire de travailler sur la cinématique d'impact en vue d'améliorer le contact impacteur/butée. Plusieurs stratégies sont à étudiées :

1. La première consiste en l'amélioration du guidage de la masse tombante.
2. La seconde consiste à travailler sur la géométrie de l'impacteur afin de transiter d'un contact plan vers un contact ponctuel.
3. La troisième consiste à changer l'acier constituant la partie impactante du poids tombant par une matière plus malléable telle que du laiton ou du plomb comme le suggère Adams dans [da Silva *et al.*, 2012a] pour des essais sous machines pendulaires.
4. La quatrième consiste à modifier la géométrie de l'échantillon (par exemple, les dimensions de la zone de recouvrement) afin d'obtenir la rupture de l'adhésif avant la reprise d'effort.

Pour tester un adhésif avec des vitesses de déformation supérieures à 10^3 s^{-1} , la solution la plus naturelle est d'augmenter la hauteur de chute du poids tombant. L'utilisation d'un dispositif d'accélération de l'impacteur ou un travail sur la raideur de la barre de traction sont également des solutions à étudier pour y arriver.

Une autre ouverture porte sur la méthode de dépouillement des essais, notamment de l'extraction des déformations moyennes. En effet, les déplacements de corps rigides calculés résultent à la fois de la déformation du joint de colle mais également de celle des becs situés entre les deux zones utilisées pour la corrélation d'images numériques. Il serait intéressant de chiffrer la proportion de la déformation totale calculée issue de la déformation des becs. La démarche à adopter peut être expérimentale *via* l'utilisation d'une éprouvette monobloc et/ou numérique *via* l'utilisation d'un modèle éléments finis développé à cet effet.

Les essais de caractérisations réalisés durant la thèse portent sur l'identification du comportement de l'adhésif suivant plusieurs sollicitations précises. Notamment pour le développement de lois de comportement, il est aujourd'hui important de s'attarder sur l'examen des phénomènes mis en jeu lors de ces essais et leurs rôles dans le comportement macroscopique équivalent de l'adhésif. Cette démarche devra permettre, par exemple, de comprendre la reprise de contrainte observée en compression-cisaillement. À cet effet, des essais arrêtés à différents niveaux de charge pourront être réalisés pour identifier le moment de la ruine de

l'adhésif.

La modélisation numérique proposée dans le manuscrit se limite au régime quasi-statique. Le développement d'une loi de comportement plus avancée constitue le prolongement naturel des travaux effectués. Sur la base des résultats issus des essais cyclés, l'endommagement devra tout d'abord être introduit dans le modèle. Ensuite et sur la base des essais dynamiques, les effets vitesse devront être modélisés *via* l'utilisation d'une formulation élastoviscoplastique. La validité du modèle devra être discutée à chaque étape du développement.

Une perspective à plus long terme concerne le dialogue physico-chimie des surfaces et interfaces/sciences des polymères/mécanique pour le développement de formulations colle /substrats/traitement de surface, dédiés au crash. Il sera d'abord nécessaire d'étudier des structures collées existantes afin d'identifier le ou les types de comportements souhaités lors d'impact. Cette étude permettra de retenir plusieurs configurations d'éprouvette qu'il sera nécessaire de tester en dynamique.

Enfin, la problématique des assemblages multi-matériaux devra être traitée. L'intégralité des essais réalisés durant la thèse concerne le collage de substrats métalliques. L'étude de l'extension de l'éprouvette Arcan pour tester des substrats de nature différente (composite/composite ou mixte composite/métallique) s'avère essentielle, notamment pour le secteur aéronautique (par exemple pour la modélisation de la pale d'hélicoptère).

Valorisation des travaux

Les travaux de thèse présentés ont fait l'objet de plusieurs productions scientifiques.

- Deux articles de revues internationales avec comités de lecture :

- [1] VALÈS, B., MARGUET, S., R. CRÉAC'HCADEC, R., SOHIER, L., FERRERO, J.-F. et NAVARRO, P. (2017). Experimental & numerical study of the Tensile/Compression-Shear Arcan test under dynamic loading. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 78 :135-147. [\[DOI\]](#)
- [2] VALÈS, B., MARGUET, S., R. CRÉAC'HCADEC, R., SOHIER, L., FERRERO, J.-F. et NAVARRO, P. (2016). Numerical study of the local behaviour of adhesive bonds under dynamic loading. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30(12) :1319-1339. [\[DOI\]](#)

- Deux communications avec actes dans des congrès internationaux :

- [3] VALÈS, B., MARGUET, S., R. CRÉAC'HCADEC, R., SOHIER, L., FERRERO, J.-F. et NAVARRO, P. (2016). Numerical & Experimental Study of a Modified Arcan Device in Dynamic : Application to Bonded Joints. *Proceedings of Euradh 2016, the 11th European Adhesion Conference and Adhesion '16, the 13th International Conference on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives*. Glasgow, United Kingdom.
- [4] VALÈS, B., MARGUET, S., R. CRÉAC'HCADEC, R., SOHIER, L., FERRERO, J.-F. et NAVARRO, P. (2015). Numerical Study of an Arcan Tensile Compression Shear Test in Dynamic : Application to Bonded Joints. *Proceedings of Complas XIII, the 13th International Conference on Computational Plasticity*. Barcelone, Spain.

Bibliographie

- [3M, 2009] 3M (2009). *3M Scotch-Weld® Structural Adhesive Film AF 191, Technical Datasheet*. 3M Aerospace and Aircraft Maintenance Division. Cité page 98
- [Abaqus, 2012] ABAQUS (2012). *Abaqus 6.12 Documentation*. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA. 10 citations pages 49, 58, 59, 63, 80, 122, 123, 130, 131, et 138
- [Abrate et al., 2015] ABRATE, S., FERRERO, J.-F. et NAVARRO, P. (2015). Cohesive zone models and impact damage predictions for composite structures. *Meccanica*, 50(10):2587–2620. Cité page 122
- [Adams, 1991] ADAMS, R. D. (1991). Testing of Adhesives - Useful or Not. In ALLEN, K. W., éditeur : *Adhesion 15*, pages 1–18. Springer Netherlands. Cité page 22
- [Adams, 2005] ADAMS, R. D., éditeur (2005). *Adhesive Bonding : Science, Technology and Applications*. Elsevier. 3 citations pages xix, 18, et 34
- [Adams et al., 1997] ADAMS, R. D., COMYN, J. et WAKE, W. C. (1997). *Structural Adhesive Joints in Engineering*. Springer Science & Business Media. Cité page 6
- [Adams et Coppendale, 1977] ADAMS, R. D. et COPPENDALE, J. (1977). The elastic moduli of structural adhesives. In ALLEN, K. W., éditeur : *Adhesion 1*, pages 1–17. London. 3 citations pages xiv, 22, et 23
- [Adams et al., 1978] ADAMS, R. D., COPPENDALE, J. et PEPPIATT, N. A. (1978). Stress analysis of axisymmetric butt joints loaded in torsion and tension. *Journal of strain analysis*, 13(1). Cité page 22
- [Adams et Harris, 1996] ADAMS, R. D. et HARRIS, J. A. (1996). A critical assessment of the block impact test for measuring the impact strength of adhesive bonds. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 16(2):61–71. 3 citations pages xiv, 28, et 29
- [Adamvalli et Parameswaran, 2008] ADAMVALLI, M. et PARAMESWARAN, V. (2008). Dynamic strength of adhesive single lap joints at high temperature. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28(6):321–327. Cité page 36
- [Afendi et al., 2011] AFENDI, M., TERAMOTO, T. et BAKRI, H. B. (2011). Strength prediction of epoxy adhesively bonded scarf joints of dissimilar adherends. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31(6):402–411. Cité page 23
- [Al-Zubaidy et al., 2013] AL-ZUBAIDY, H., ZHAO, X.-L. et AL-MAHAIDI, R. (2013). Mechanical characterisation of the dynamic tensile properties of CFRP sheet and adhesive at medium strain rates. *Composite Structures*, 96:153–164. 4 citations pages xvii, 32, 103, et 104
- [Al-Zubaidy et al., 2011] AL-ZUBAIDY, H., ZHAO, X.-L. et AL-MIHAIDI, R. (2011). Mechanical Behaviour of Normal Modulus Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) and Epoxy under Impact Tensile Loads. *Procedia Engineering*, 10:2453–2458. Cité page 103

- [Alfredsson, 2003] ALFREDSSON, K. S. (2003). On the determination of constitutive properties of adhesive layers loaded in shear – an inverse solution. *International Journal of Fracture*, 123(1-2):49–62. Cité page 130
- [Allman, 1977] ALLMAN, D. J. (1977). A theory for the elastic stresses in adhesive bonded lap joints. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, (7):415–436. Cité page 18
- [Althof et Neumann, 1974] ALTHOF, W. et NEUMANN, G. (1974). Verfahren zur ermittlung von schubspannungs-gleitungs-diagrammen von konstruktionsklebstoffen. *Mater.-Prüf.*, pages 387–388. 2 citations pages 19 et 22
- [Anghileri et al., 2005] ANGHILERI, M., CHIRWA, E. C., LANZI, L. et MENTUCCIA, F. (2005). An inverse approach to identify the constitutive model parameters for crashworthiness modelling of composite structures. *Composite Structures*, 68(1):65–74. Cité page 130
- [Arcan et al., 1987] ARCAN, L., ARCAN, M. et DANIEL, L. (1987). Sem fractography of pure and mixed mode interlaminar fracture in graphite/epoxy composites. *ASTM Special Technical Publication*, 948:41–67. 2 citations pages 2 et 24
- [Arcan et al., 1978] ARCAN, M., HASHIN, Z. et VOLOSHIN, A. (1978). A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials. *Experimental Mechanics*, 18(4):141–146. Cité page 16
- [Arnaud et al., 2014] ARNAUD, N., CRÉAC’HCADEC, R. et COGNARD, J.-Y. (2014). A tension/compression-torsion test suited to analyze the mechanical behaviour of adhesives under non-proportional loadings. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 53:3–14. Cité page 23
- [Arnaud et al., 2013] ARNAUD, N., CRÉAC’HCADEC, R., COGNARD, J.-Y. et DAVIES, P. (2013). Analyse de l’effet du vieillissement en milieu humide sur le comportement mécanique d’adhésifs en assemblages sous sollicitations multi-axiales. In *21^e Congrès Français de Mécanique*. 2 citations pages xiii et 10
- [ASM International Comitee, 1990] ASM INTERNATIONAL COMITEE (1990). *Engineered Materials Handbook : Adhesives and sealants*. ASM International. Cité page 9
- [ASTM D1002, 2010] ASTM D1002 (2010). *Standard Test Method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal)*. American Society for Testing and Materials. 2 citations pages xiii et 17
- [ASTM D2095, 2015] ASTM D2095 (2015). *Standard Test Method for Tensile Strength of Adhesives by Means of Bar and Rod Specimens*. American Society for Testing and Materials. 3 citations pages xiv, 22, et 23
- [ASTM D256, 2010] ASTM D256 (2010). *Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics*. American Society for Testing and Materials. Cité page 28
- [ASTM D3165, 2014] ASTM D3165 (2014). *Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading of Single-Lap-Joint Laminated Assemblies*. American Society for Testing and Materials. 3 citations pages xiii, 18, et 19
- [ASTM D3528, 2016] ASTM D3528 (2016). *Standard Test Method for Strength Properties of Double Lap Shear Adhesive Joints by Tension Loading*. American Society for Testing and Materials. 3 citations pages xiii, 18, et 19

- [ASTM D3983, 2011] ASTM D3983 (2011). *Standard Test Method for Measuring Strength and Shear Modulus of Nonrigid Adhesives by the Thick-Adherend Tensile-Lap Specimen*. American Society for Testing and Materials. Cité page 19
- [ASTM D5379, 2012] ASTM D5379 (2012). *Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*. American Society for Testing and Materials. 3 citations pages xiii, 15, et 16
- [ASTM D5656, 2010] ASTM D5656 (2010). *Standard Test Method for Thick-Adherend Metal Lap-Shear Joints for Determination of the Stress-Strain Behavior of Adhesives in Shear by Tension Loading*. American Society for Testing and Materials. Cité page 19
- [ASTM D575, 2012] ASTM D575 (2012). *Standard Test Method for Rubber Properties in Compression*. American Society for Testing and Materials. Cité page 14
- [ASTM D638, 2014] ASTM D638 (2014). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. American Society for Testing and Materials. Cité page 32
- [ASTM D695, 2015] ASTM D695 (2015). *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*. American Society for Testing and Materials. 3 citations pages xiii, 14, et 15
- [ASTM D897, 2016] ASTM D897 (2016). *Standard Test Method for Tensile Properties of Adhesive Bonds*. American Society for Testing and Materials. Cité page 22
- [ASTM D950, 2011] ASTM D950 (2011). *Standard Test Method for Impact Strength of Adhesive Bonds*. American Society for Testing and Materials. 3 citations pages xiv, 28, et 29
- [ASTM E229, 1997] ASTM E229 (1997). *Standard Test Method for Shear Strength and Shear Modulus of Structural Adhesives*. American Society for Testing and Materials. 3 citations pages xiv, 22, et 23
- [ASTM E23, 2016] ASTM E23 (2016). *Standard Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. American Society for Testing and Materials. 2 citations pages xiv et 28
- [Aubry, 2013] AUBRY, J. (2013). *Étude expérimentale et numérique d'impacts sur structures : application aux pales d'hélicoptères*. Thèse de doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier. 3 citations pages xiii, 1, et 45
- [Badulescu et al., 2012] BADULESCU, C., COGNARD, J.-Y., CRÉAC'HCADEC, R. et VEDRINE, P. (2012). Analysis of the low temperature-dependent behaviour of a ductile adhesive under monotonic tensile/compression-shear loads. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 36:56–64. 2 citations pages xiii et 10
- [Banks-Sills et Arcan, 1983] BANKS-SILLS, L. et ARCAN, M. (1983). An edge-cracked Mode II fracture specimen. *Experimental Mechanics*, 23(3):257–261. Cité page 16
- [Barenblatt, 1962] BARENBLATT, G. I. (1962). The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture. *Advances in Applied Mechanics*, 7:55–129. Cité page 123
- [Beever et Ellis, 1984] BEEVERS, A. et ELLIS, M. D. (1984). Impact behaviour of bonded mild steel lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 4(1):13–16. 5 citations pages xiv, 38, 39, 72, et 94
- [Béguelin, 1996] BÉGUELIN, P. (1996). *Approche expérimentale du comportement mécanique des polymères en sollicitation rapide*. Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne. Cité page 31

- [Belingardi *et al.*, 2002] BELINGARDI, G., GOGGIO, L. et TARDITI, A. (2002). Investigating the effect of spew and chamfer size on the stresses in metal/plastics adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 22(4):273–282. Cité page 18
- [Bikerman, 1961] BIKERMAN, J. J. (1961). The science of adhesives joints. *Academic, London*. Cité page 11
- [Bikerman, 1967] BIKERMAN, J. J. (1967). Causes of poor adhesion : weak boundary layers. *Industrial & Engineering Chemistry*, 59(9):40–44. Cité page 8
- [Borsutzki *et al.*, 2003] BORSUTZKI, M., CORNETTE, D., KURIYAMA, Y., UENISHI, A., YAN, B. et OPBROEK, E. (2003). *Recommended practice for dynamic tensile testing for sheet steels*. International Iron and Steel Institute : High Strain Rate Experts Group. Cité page 31
- [Bruneaux, 2004] BRUNEAUX, M.-A. (2004). *Durabilité des assemblages collés : modélisation mécanique et physico-chimique*. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées. Cité page 11
- [Buchan et Rae, 1946] BUCHAN, S. et RAE, W. D. (1946). Chemical nature of the rubber to glass bond. *Transactions of the Institution of the Rubber*, 20(205-216). Cité page 11
- [Chaignaud, 2015] CHAIGNAUD, S. (2015). Problématiques et enjeux des préparations de surface avant collage. In *JADH 2015 - 18^e Journées d'Étude sur l'Adhésion*. Cité page 11
- [Chen *et al.*, 2011] CHEN, Z., ADAMS, R. D. et da SILVA, L. F. M. (2011). Fracture toughness of bulk adhesives in mode I and mode III and curing effect. *International Journal of Fracture*, 167:221–234. Cité page 14
- [Cognard, 2000] COGNARD, J. (2000). *Science et technologie du collage*. PPUR presses polytechniques. 3 citations pages 6, 9, et 22
- [Cognard *et al.*, 2010a] COGNARD, J.-Y., CRÉAC'HCADEC, R., MAURICE, J., DAVIES, P., PELEAU, M. et da SILVA, L. F. M. (2010a). Analysis of the Influence of Hydrostatic Stress on the Behaviour of an Adhesive in a Bonded Assembly. *Journal Of Adhesion Science And Technology*, 24(11-12):1977–1994. 2 citations pages xiii et 10
- [Cognard *et al.*, 2008] COGNARD, J.-Y., CRÉAC'HCADEC, R., SOHIER, L. et DAVIES, P. (2008). Analysis of the nonlinear behavior of adhesives in bonded assemblies - Comparison of TAST and Arcan tests. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28(8):393–404. 6 citations pages xiii, xiv, 19, 20, 21, et 24
- [Cognard *et al.*, 2010b] COGNARD, J.-Y., CRÉAC'HCADEC, R., SOHIER, L. et LEGUILLON, D. (2010b). Influence of adhesive thickness on the behaviour of bonded assemblies under shear loadings using a modified TAST fixture. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30(5):257–266. 6 citations pages xiii, xiv, 19, 20, 21, et 22
- [Cognard *et al.*, 2005] COGNARD, J.-Y., DAVIES, P., GINESTE, B. et SOHIER, L. (2005). Development of an improved adhesive test method for composite assembly design. *Composite Science and Technology*, 65:359–368. 5 citations pages xiv, 2, 24, 25, et 32
- [Cognard *et al.*, 2006] COGNARD, J.-Y., DAVIES, P., SOHIER, L. et CRÉAC'HCADEC, R. (2006). A study of the non-linear behaviour of adhesively-bonded composite assemblies. *Composite Structures*, 76:34–46. 2 citations pages 24 et 48
- [Cognard, 2005] COGNARD, P. (2005). *Handbook of Adhesives and Sealants : Basic Concepts and High Tech Bonding*. Elsevier. 3 citations pages xiii, 9, et 10
- [Cooper et Sawyer, 1979] COOPER, P. A. et SAWYER, J. W. (1979). A critical examination of stresses in an elastic single lap joint. *NASA Tech. pap.* 1507. Cité page 17

- [Créac'hcadec, 2008] CRÉAC'HCADEC, R. (2008). *Analyse et modélisation du comportement non linéaire d'assemblages collés pour application marine*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale. 6 citations pages [xiii](#), [10](#), [15](#), [124](#), [126](#), et [130](#)
- [Créac'hcadec, 2014] CRÉAC'HCADEC, R. (2014). *Éprouvette de mesure de traction, de compression et/ou de cisaillement*. Brevet français N°14 56493. Cité page [26](#)
- [Créac'hcadec et al., 2015] CRÉAC'HCADEC, R., SOHIER, L., CELLARD, C. et GINESTE, B. (2015). A stress concentration-free bonded arcan tensile compression shear test specimen for the evaluation of adhesive mechanical response. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 61:81–92. 9 citations pages [xiv](#), [2](#), [25](#), [26](#), [40](#), [44](#), [52](#), [58](#), et [66](#)
- [da Silva et al., 2012a] da SILVA, L. F. M., ADAMS, R. D., BLACKMAN, B. R. K., GOGGIO, L., PERONI, M., SATO, C., DILGER, K., FRAUENHOFER, M. et KRELING, S. (2012a). Higher Rate and Impact Tests. In da SILVA, L. F. M., DILLARD, D. A., BLACKMAN, B. et ADAMS, R. D., éditeurs : *Testing Adhesive Joints*, pages 273–317. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 3 citations pages [2](#), [37](#), et [147](#)
- [da Silva et al., 2012b] da SILVA, L. F. M., DILLARD, D. A., BLACKMAN, B. et ADAMS, R. D. (2012b). *Testing Adhesive Joints : Best Practices*. John Wiley & Sons. 9 citations pages [xiii](#), [xiv](#), [14](#), [15](#), [16](#), [20](#), [21](#), [34](#), et [114](#)
- [da Silva et al., 2011] da SILVA, L. F. M., ÖCHSNER, A. et ADAMS, R. D., éditeurs (2011). *Handbook of Adhesion Technology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 7 citations pages [xiii](#), [xiv](#), [7](#), [13](#), [15](#), [23](#), et [34](#)
- [Darque-Ceretti et Monasse, 2008] DARQUE-CERETTI, E. et MONASSE, B. (2008). Assemblage des Matériaux par Collage. *Techniques de l'ingénieur*. Cité page [9](#)
- [Davies et al., 2009] DAVIES, P., SOHIER, L., COGNARD, J.-Y., BOURMAUD, A., CHOQUEUSE, D., RINNERT, E. et CRÉAC'HCADEC, R. (2009). Influence of adhesive bond line thickness on joint strength. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(7):724–736. Cité page [24](#)
- [Dean et Duncan, 1998] DEAN, G. et DUNCAN, B. (1998). *A guide to the Preparation and Testing of Bulk Specimens of Adhesives*. NPL Measurement Good Practice Guide N0 17, National Physical Laboratory. 2 citations pages [xiii](#) et [15](#)
- [Deletombe et al., 2015] DELETOMBE, E., FABIS, J., PORTEMONT, G., LANGRAND, B. et BERTHE, J. (2015). Essais de caractérisation dynamique des matériaux aux vitesses moyennes de déformation. In *MecaMat Aussois 2015*, France. Cité page [31](#)
- [Deryagin, 1934] DERYAGIN, B. V. (1934). Analysis of friction and adhesion, IV. the theory of the adhesion of small particles. *Kolloid Z*, 69(2):155–164. Cité page [11](#)
- [Dow, 2016] DOW (2016). *Dow™ Technical Datasheet - Betamate® 1496V*. Dow™ Automotive. Cité page [98](#)
- [Dufour et al., 2016] DUFOUR, L., BOUREL, B., LAURO, F., HAUGOU, G. et LECONTE, N. (2016). A viscoelastic-viscoplastic model with non associative plasticity for the modelling of bonded joints at high strain rates. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 70:304–314. 2 citations pages [xiv](#) et [32](#)
- [Dufour et al., 2015a] DUFOUR, L., BOUREL, B., LAURO, F., HAUGOU, G., LECONTE, N. et CARRERE, N. (2015a). Failure stress criterion for adhesively bonded joint at different strain rates by using dynamic arcan test device. *DYMAT 2015 - 11th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading*, 94:5. Cité page [32](#)

- [Dufour *et al.*, 2015b] DUFOUR, L., BOUREL, B., LAURO, F., HAUGOU, G., LECONTE, N. et CARRERE, N. (2015b). A new arcan test device for dynamic loadings of adhesively bonded joints. *AB 2015 - The 3rd International Conference on Structural Adhesive Bonding*.
Cité page 32
- [Dugdale, 1960] DUGDALE, D. S. (1960). Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8(2):100–104.
Cité page 123
- [El-Hajjar et Haj-Ali, 2004] EL-HAJJAR, R. et HAJ-ALI, R. (2004). In-plane shear testing of thick-section pultruded FRP composites using a modified Arcan fixture. *Composites Part B : Engineering*, 35(5):421–428.
2 citations pages xiii et 15
- [Field *et al.*, 2004] FIELD, J. E., WALLEY, S. M., PROUD, W. G., GOLDREIN, H. T. et SIVIOUR, C. R. (2004). Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies. *International Journal of Impact Engineering*, 30(7):725–775.
2 citations pages xix et 27
- [Gali *et al.*, 1981] GALI, S., DOLEV, G. et ISHAI, O. (1981). An effective stress/strain concept in the mechanical characterization of structural adhesive bonding. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1(3):135–140.
Cité page 14
- [Galliot, 2007] GALLIOT, C. (2007). *Comportement statique et dynamique d’assemblages collés de composites stratifiés*. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne.
2 citations pages 38 et 39
- [Galliot *et al.*, 2012] GALLIOT, C., ROUSSEAU, J. et VERCHERY, G. (2012). Drop weight tensile impact testing of adhesively bonded carbon/epoxy laminate joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 35:68–75.
3 citations pages xiv, 38, et 39
- [Gerlach *et al.*, 2008] GERLACH, R., SIVIOUR, C. R., PETRINIC, N. et WIEGAND, J. (2008). Experimental characterisation and constitutive modelling of RTM-6 resin under impact loading. *Polymer*, 49(11):2728–2737.
Cité page 101
- [Germain, 1973] GERMAIN, P. (1973). *Cours de mécanique des milieux continus*. Masson.
Cité page 124
- [Gineste, 1993] GINESTE, B. (1993). *Assemblages de structures en matériaux composites par stratification d’un élément de liaison : caractérisation de l’endommagement*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Nantes.
2 citations pages xiv et 24
- [Goglio, 2011] GOGLIO, L. (2011). Impact Tests. In da SILVA, L. F. M., ÖCHSNER, A. et ADAMS, R. D., éditeurs : *Handbook of Adhesion Technology*, pages 503–532. Springer Berlin Heidelberg.
2 citations pages 2 et 27
- [Goglio *et al.*, 2008] GOGLIO, L., PERONI, L., PERONI, M. et ROSSETTO, M. (2008). High strain-rate compression and tension behaviour of an epoxy bi-component adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28(7):329–339.
2 citations pages xiv et 36
- [Goglio et Rossetto, 2008] GOGLIO, L. et ROSSETTO, M. (2008). Impact rupture of structural adhesive joints under different stress combinations. *International Journal of Impact Engineering*, 35(7):635–643.
Cité page 31
- [Goland et Reissner, 1944] GOLAND, M. et REISSNER, E. (1944). The stresses in cemented joints. *Journal of Applied Mechanics*, 11(A17-A27).
Cité page 18
- [Gómez-del Río *et al.*, 2005a] GÓMEZ-DEL RÍO, T., BARBERO, E., ZAERA, R. et NAVARRO, C. (2005a). Dynamic tensile behaviour at low temperature of CFRP using a split Hopkinson pressure bar. *Composites Science and Technology*, 65(1):61–71.
Cité page 36

- [Gómez-del Río *et al.*, 2005b] GÓMEZ-DEL RÍO, T., ZAERA, R., BARBERO, E. et NAVARRO, C. (2005b). Damage in CFRPs due to low velocity impact at low temperature. *Composites Part B : Engineering*, 36(1):41–50. 2 citations pages 38 et 39
- [Good, 1976] GOOD, R. J. (1976). On the definition of adhesion. *Journal of Adhesion*, 8(1):1–9. Cité page 11
- [Grabovac et Morris, 1991] GRABOVAC, I. et MORRIS, C. E. M. (1991). The application of the Iosipescu shear test to structural adhesives. *Journal of Applied Polymer Science*, 43(11):2033–2042. Cité page 16
- [Graff, 2012] GRAFF, K. F. (2012). *Wave Motion in Elastic Solids*. Courier Corporation. Cité page 75
- [Hamouda et Hashmi, 1998] HAMOUDA, A. M. S. et HASHMI, M. S. J. (1998). Testing of composite materials at high rates of strain : advances and challenges. *Journal of Materials Processing Technology*, 77(1–3):327–336. 2 citations pages xix et 27
- [Harris et Adams, 1984] HARRIS, J. A. et ADAMS, R. A. (1984). Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 4(2):65–78. 3 citations pages xiii, 17, et 18
- [Harris et Adams, 1985] HARRIS, J. A. et ADAMS, R. D. (1985). An assessment of the impact performance of bonded joints for use in high energy absorbing structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*, 199:121–131. 2 citations pages xiv et 30
- [He *et al.*, 2010] HE, D., SAWA, T., IWAMOTO, T. et HIRAYAMA, Y. (2010). Stress analysis and strength evaluation of scarf adhesive joints subjected to static tensile loadings. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30(6):387–392. Cité page 23
- [Hiermaier, 2009] HIERMAIER, S., éditeur (2009). *Predictive Modeling of Dynamic Processes : A Tribute to Professor Klaus Thoma*. Springer, Dordrecht ; New York, 2009 édition édition. Cité page 122
- [Hildebrand, 1994] HILDEBRAND, M. (1994). The strength of adhesive bonbed joints between fibre-reinforced plastics and metal. different concepts and their strength behavior. *ASPOO, Technical Research Centre of Finland*. 2 citations pages xix et 18
- [Hill, 1958] HILL, R. (1958). A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 6(3):236–249. Cité page 126
- [Hill, 2004] HILL, S. (2004). *Standardization of high strain rate test techniques for automotive plastics project*. UDRI : Structural Test, Group, UDR-TR-2004-00016. Cité page 31
- [Hopkinson, 1914] HOPKINSON, B. (1914). A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, 213:437–456. Cité page 34
- [Huntsman, 2000] HUNTSMAN (2000). *HuntsmanTM Structural Adhesive - Araldite[®] 420 A/B - Two component epoxy adhesive*, Publication No. A 161 d GB. Huntsman Aerospace Adhesives. 2 citations pages 44 et 98
- [Huntsman, 2009] HUNTSMAN (2009). *HuntsmanTM Structural Adhesive - Araldite[®] 420 A/B*. Huntsman Advanced Materials. 4 citations pages 44, 87, 98, et 104
- [Iosipescu, 1967] IOSIPESCU, N. (1967). New accurate procedure for single shear testing of metals. *Journal of Materials.*, 2(3):537–566. Cité page 16

- [ISO 11003-2, 2001] ISO 11003-2 (2001). *Adhesives - Determination of shear behaviour of structural adhesives - Part 2 : Tensile test method using thick adherends*. International Organization for Standardization. 4 citations pages [xiii](#), [19](#), [20](#), et [22](#)
- [ISO 4587, 2003] ISO 4587 (2003). *Adhésifs - Détermination de la résistance au cisaillement d'assemblages collés rigide sur rigide à recouvrement simple*. International Organization for Standardization. Cité page [17](#)
- [ISO 527-2, 2012] ISO 527-2 (2012). *Determination of tensile properties of plastics*. International Organization for Standardization. 4 citations pages [xiii](#), [14](#), [15](#), et [87](#)
- [ISO 604, 2004] ISO 604 (2004). *Plastics - Determination of compressive Properties*. International Organization for Standardization. Cité page [14](#)
- [ISO 6721, 2011] ISO 6721 (2011). *Plastics - Determination of dynamic mechanical properties*. International Organization for Standardization. Cité page [87](#)
- [ISO 6892-1, 2009] ISO 6892-1 (2009). *Metallic materials - Tensile testing - Part 1 : Method of test at room temperature*. International Organization for Standardization. Cité page [63](#)
- [ISO 6922, 1987] ISO 6922 (1987). *Adhésifs - Détermination de la résistance en traction des joints à bout*. International Organization for Standardization. Cité page [22](#)
- [ISO 6953, 1998] ISO 6953 (1998). *Adhesives - Test method for shear impact strength of adhesive bonds*. International Organization for Standardization. Cité page [28](#)
- [ISO 7743, 2011] ISO 7743 (2011). *Coutchouc vulcanisé ou thermoplastique - Détermination des propriétés de contrainte/déformation en compression*. International Organization for Standardization. Cité page [14](#)
- [Jeandreau, 2006] JEANDREAU, J.-P. (2006). *Guide du collage*. Centre techniques des industries mécaniques, Senlis ; Paris. Cité page [6](#)
- [Karush, 1939] KARUSH, W. (1939). Minima of functions of several variables with inequalities as side conditions. Mémoire de D.E.A., Department of Mathematics, University of Chicago, Chicago, IL, USA. Cité page [127](#)
- [Kinloch, 1987] KINLOCH, A. J. (1987). *Adhesion and Adhesives : science and technology*. Chapman & Hall, London. 5 citations pages [xiii](#), [6](#), [9](#), [11](#), et [13](#)
- [Kinloch, 1997] KINLOCH, A. J. (1997). Adhesives in engineering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G : Journal of Aerospace Engineering*, 211(5):307–335. 2 citations pages [xiii](#) et [7](#)
- [Kolsky, 1949] KOLSKY, H. (1949). An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 62:676–700. 2 citations pages [34](#) et [35](#)
- [Kuhn et Tucker, 1951] KUHN, H. et TUCKER, A. (1951). In proceedings of the second berkeley symposium on mathematical studies and probability. pages 481–492, Berkeley, California. University of California Press. Cité page [127](#)
- [Lang et Mallick, 1998] LANG, T. P. et MALLICK, P. K. (1998). Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 18(3):167–177. Cité page [18](#)
- [Leadley et Watts, 1997] LEADLEY, S. R. et WATTS, J. F. (1997). The use of monochromated xps to evaluate acid-base interactions at the PMMA/Oxidised metal interface. *Journal of Adhesion*, 60:175–196. Cité page [11](#)

- [Lemaitre et Chaboche, 1994] LEMAITRE, J. et CHABOCHE, J.-L. (1994). *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge University Press. 2 citations pages 124 et 126
- [Loctite, 1995] LOCTITE (1995). *Worldwide Design Handbook, 2nd edition*. Germany. 3 citations pages xiii, 7, et 13
- [Mac Bain et Hopkins, 1925] MAC BAIN, J. W. et HOPKINS, D. G. (1925). On adhesives and adhesive action. *Journal of Physical Chemistry*, 29(2):188–204. Cité page 11
- [Mahnken, 2005] MAHNKEN, R. (2005). Simulation of strength difference for adhesive materials in finite deformation elasto-plasticity. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 194(39–41):4097–4114. 3 citations pages xiv, 23, et 24
- [May et al., 2015] MAY, M., HESEBECK, O., MARZI, S., BÖHME, W., LIENHARD, J., KILCHERT, S., BREDE, M. et HIERMAIER, S. (2015). Rate dependent behavior of crash-optimized adhesives – Experimental characterization, model development, and simulation. *Engineering Fracture Mechanics*, 133(Supplement C):112–137. 4 citations pages xvii, 107, 108, et 122
- [May et al., 2014] MAY, M., VOSS, H. et HIERMAIER, S. (2014). Predictive modeling of damage and failure in adhesively bonded metallic joints using cohesive interface elements. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 49:7–17. Cité page 122
- [Morin et al., 2013] MORIN, D., BOUREL, B., BENNANI, B., LAURO, F. et LESUEUR, D. (2013). A new cohesive element for structural bonding modelling under dynamic loading. *International Journal of Impact Engineering*, 53:94–105. Cité page 122
- [Morin et al., 2010] MORIN, D., HAUGOU, G., BENNANI, B. et LAURO, F. (2010). Identification of a new failure criterion for toughened epoxy adhesive. *Engineering Fracture Mechanics*, 77(17):3481–3500. Cité page 107
- [Morin et al., 2011] MORIN, D., HAUGOU, G., BENNANI, B. et LAURO, F. (2011). Experimental Characterization of a Toughened Epoxy Adhesive under a Large Range of Strain Rates. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25(13):1581–1602. Cité page 107
- [Nossek et Marzi, 2009] NOSSEK, M. et MARZI, S. (2009). Cohesive Zone Modeling for Adhesives. In *Predictive Modeling of Dynamic Processes*, pages 89–105. Springer, Boston, MA. 2 citations pages 122 et 123
- [Öchsner et Gegner, 2001] ÖCHSNER, A. et GEGNER, J. (2001). Application of the finite element method in the tensile-shear test of adhesive technology. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 21(4):349–353. Cité page 130
- [Ortiz et Popov, 1985] ORTIZ, M. et POPOV, E. P. (1985). Accuracy and stability of integration algorithms for elastoplastic constitutive relations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 21(9):1561–1576. 2 citations pages 128 et 129
- [Ortiz et Simo, 1986] ORTIZ, M. et SIMO, J. C. (1986). An analysis of a new class of integration algorithms for elastoplastic constitutive relations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 23(3):353–366. 2 citations pages 128 et 129
- [Packham, 2005] PACKHAM, D. E. (2005). *Handbook of Adhesion, Second Edition*. John Wiley & Sons. Cité page 11
- [Pang et al., 1995] PANG, S.-S., YANG, C. et ZHAO, Y. (1995). Impact response of single-lap composite joints. *Composites Engineering*, 5(8):1011–1027. 2 citations pages xiv et 38
- [Papon, 2015] PAPON, E. (2015). La chimie et la mise en œuvre des adhésifs. In *JADH 2015 - 18^e Journées d’Étude sur l’Adhésion*. Cité page 9

- [Penado, 2000] PENADO, F. E. (2000). Analysis of singular regions in bonded joints. *International Journal of Fracture*, 105(1):1–25. Cité page 18
- [Sato, 2005] SATO, C. (2005). 8 - Impact behaviour of adhesively bonded joints. In ADAMS, R. D., éditeur : *Adhesive Bonding*, Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, pages 164–188. Woodhead Publishing. Cité page 2
- [Sato, 2008] SATO, C. (2008). Impact. In da SILVA, L. F. M. et ÖCHSNER, A., éditeurs : *Modeling of Adhesively Bonded Joints*, pages 279–303. Springer Berlin Heidelberg. Cité page 34
- [Sato, 2011] SATO, C. (2011). Design for Impact Loads. In da SILVA, L. F. M., ÖCHSNER, A. et ADAMS, R. D., éditeurs : *Handbook of Adhesion Technology*, pages 743–763. Springer Berlin Heidelberg. 2 citations pages xix et 27
- [Sato et Ikegami, 1999] SATO, C. et IKEGAMI, K. (1999). Strength of Adhesively-Bonded Butt Joints of Tubes Subjected to Combined High-Rate Loads. *The Journal of Adhesion*, 70(1-2):57–73. 2 citations pages xiv et 37
- [Sato et al., 1996] SATOH, T., MIYAZAKI, Y., SUZUKAWA, Y. et NAKAZATO, K. (1996). On the development of structural adhesive technology for the automotive body in Japan. *JSAE Review*, 17(2):165–178. 3 citations pages xiv, 30, et 31
- [Sawa et al., 2003] SAWA, T., SUZUKI, Y. et KIDO, S. (2003). Stress analysis and strength estimation of butt adhesive joints of dissimilar hollow cylinders under impact tensile loadings. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 17(7):943–965. Cité page 39
- [Schiel et al., 2015] SCHIEL, M., KRELING, S., UNGER, C., FISCHER, F. et DILGER, K. (2015). Behavior of adhesively bonded coated steel for automotive applications under impact loads. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 56:32 – 40. Special Issue on Impact Phenomena of Adhesively Bonded Joints. 3 citations pages xiv, 32, et 33
- [Schlimmer et al., 2002] SCHLIMMER, M., BREDE, M., BORNEMANN, J., HAHN, O., HAN-DING, C., HENNEMANN, O.-D., HESEBECK, O. et JENDRNY, J. (2002). Methodenentwicklung zur berechnung und auslegung geklebter stahlbauteile für den fahrzeugbau. In HEISE, F., éditeur : *Methodenentwicklung zur Berechnung und Auslegung geklebter Stahlbauteile für den Fahrzeugbau*, Düsseldorf. Cité page 23
- [Sharpe et Schonhorn, 1964] SHARPE, L. H. et SCHONHORN, H. (1964). Surface Energetics, Adhesion, and Adhesive Joints. In *Contact Angle, Wettability, and Adhesion*, volume 43 de *Advances in Chemistry*, pages 189–201. American Chemical Society. Cité page 11
- [Sierakowski et Chaturvedi, 1997] SIERAKOWSKI, R. L. et CHATURVEDI, S. K. (1997). *Dynamic loading and characterization of fiber-reinforced composites*. Wiley. 2 citations pages xiv et 28
- [Vaidya et al., 2006] VAIDYA, U. K., GAUTAM, A. R. S., HOSUR, M. et DUTTA, P. (2006). Experimental–numerical studies of transverse impact response of adhesively bonded lap joints in composite structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26(3): 184–198. Cité page 38
- [van Straalen et al., 1998] van STRAALLEN, I. J., WARDENIER, J., VOGESANG, L. B. et SOETENS, F. (1998). Structural adhesive bonded joints in engineering – drafting design rules. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 18(1):41 – 49. 2 citations pages xiii et 9
- [Volkersen, 1938] VOLKERSEN, O. (1938). Die nietkrafteerteilung in zubeansprunchten nietverbindungen mit onstanten loshonquerschiniten. *Luftfahrtforschung*, 15:41–47. Cité page 18

- [Voyutskii, 1963] VOYUTSKII, S. S. (1963). Autohesion and adhesion of high polymers. *New-York : Wiley Interscience*.
Cité page 11
- [Xiao, 2008] XIAO, X. (2008). Dynamic tensile testing of plastic materials. *Polymer Testing*, 27(2):164–178.
2 citations pages xiv et 31
- [Yokoyama et Nakai, 2015] YOKOYAMA, T. et NAKAI, K. (2015). Determination of the impact tensile strength of structural adhesive butt joints with a modified split Hopkinson pressure bar. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 56:13–23.
2 citations pages 35 et 36
- [Zablocka et al., 2012] ZABLOCKA, M., SALACIŃSKI, M., SYNASZKO, P. et KLYSZ, S. (2012). The effect of cure cycle time on the properties of epoxy-bonded joints. *Fatigue of Aircraft Structures*, 1:157–161.
Cité page 8

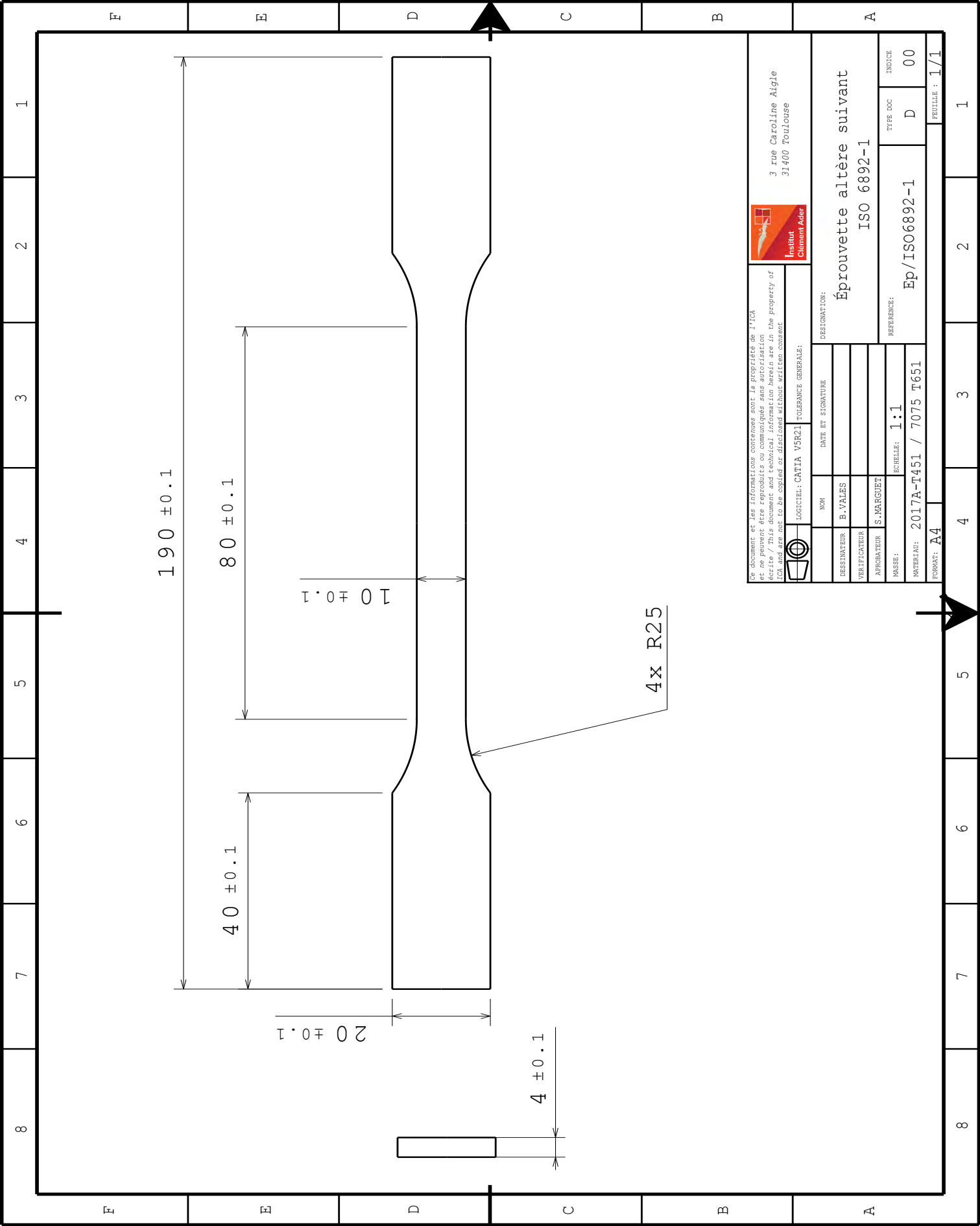
A Plans des éprouvettes

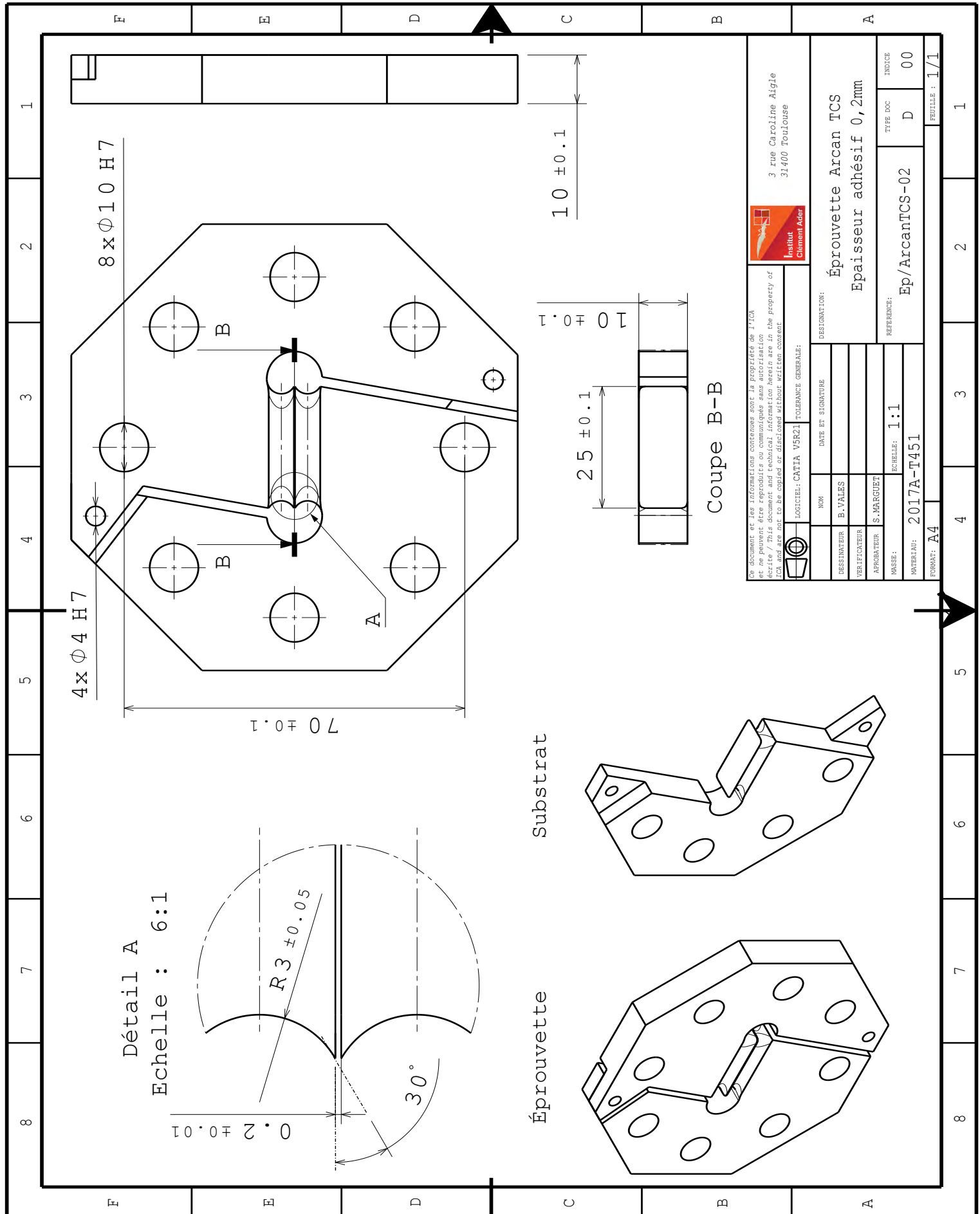
Résumé

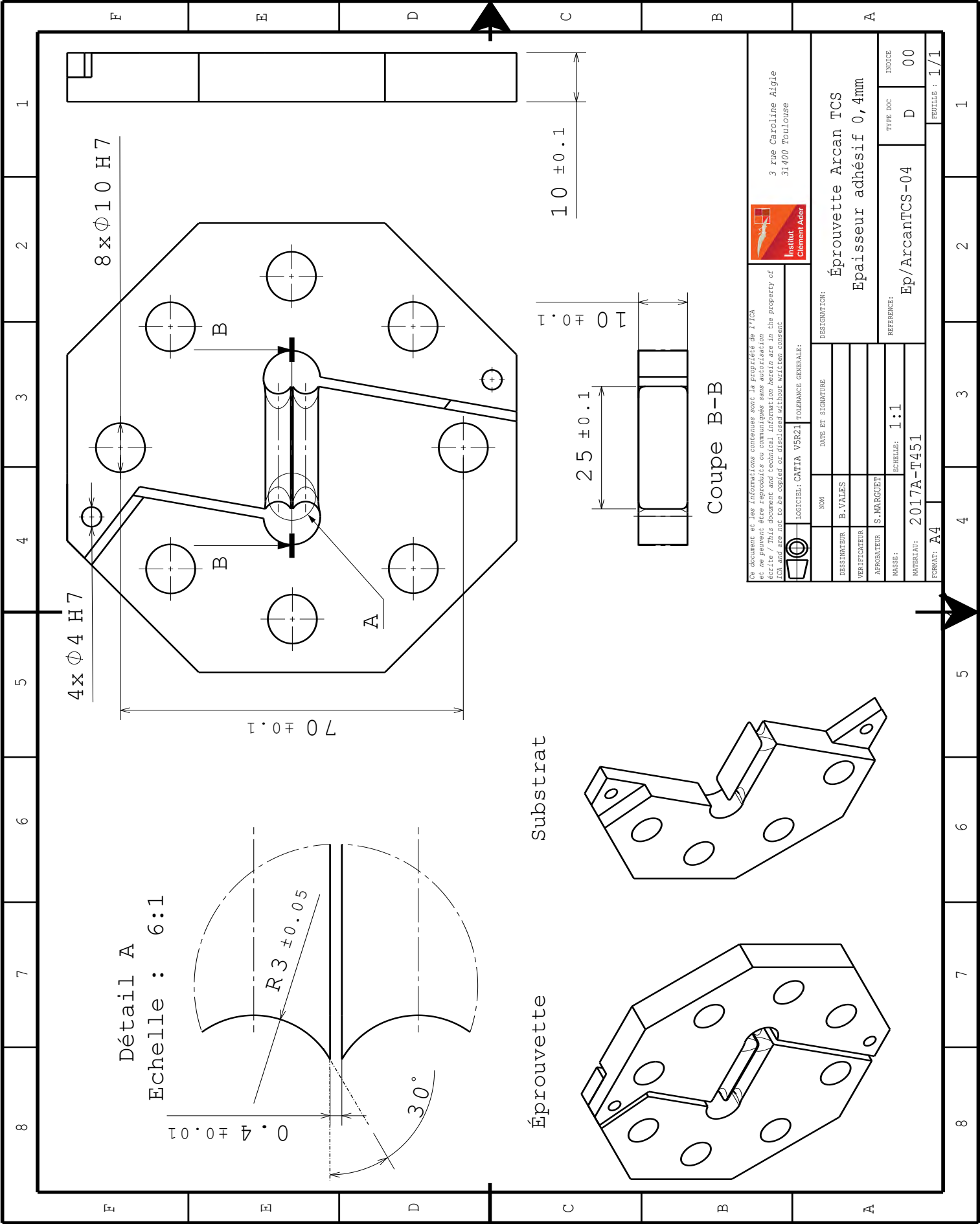
Les mises en plan des éprouvettes étudiées dans ce mémoire sont présentées dans cette annexe. Les dessins sont à l'échelle 1 : 1. Seules les principales dimensions définissant les enveloppes ainsi que les surfaces utiles sont précisées.

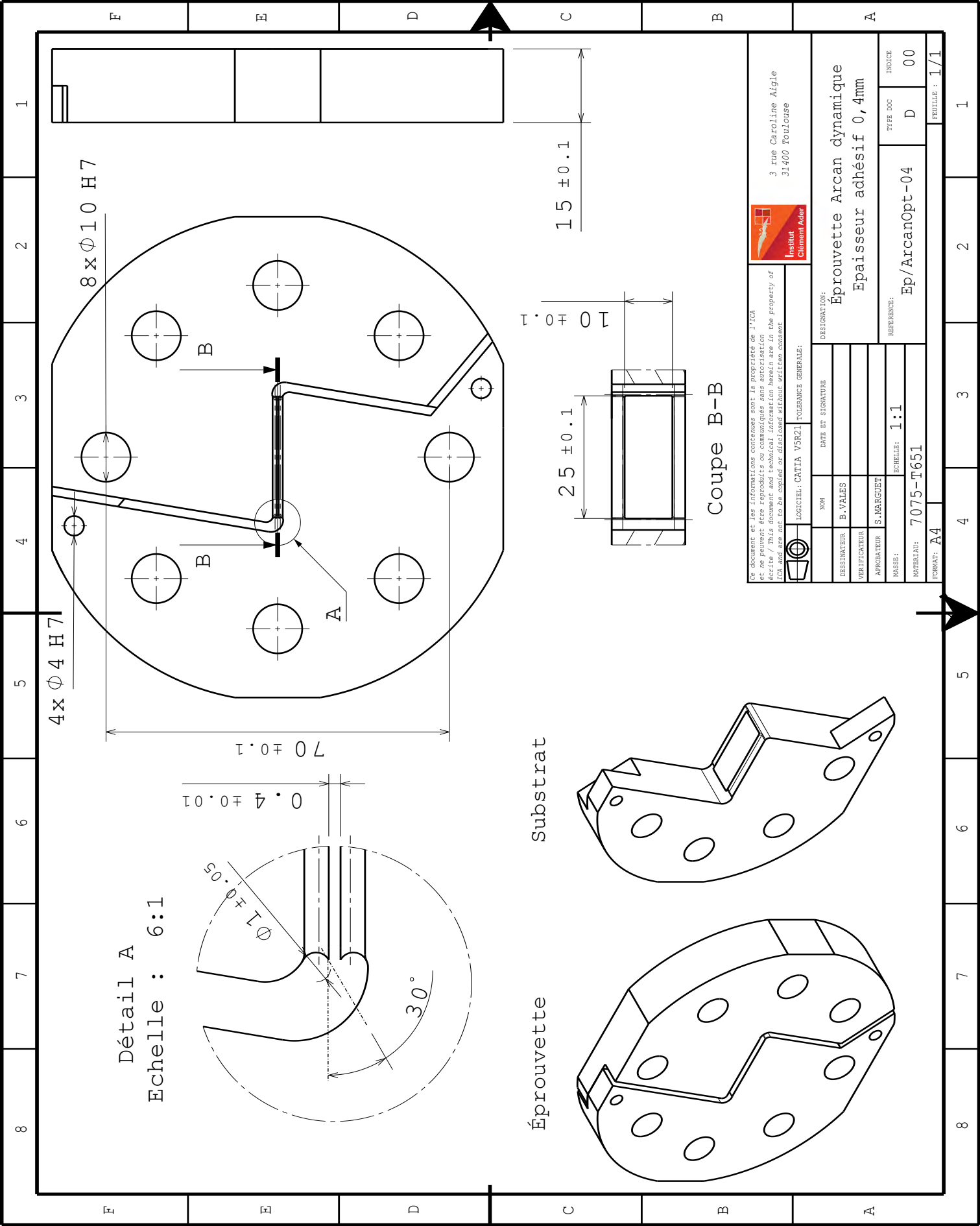
Sommaire

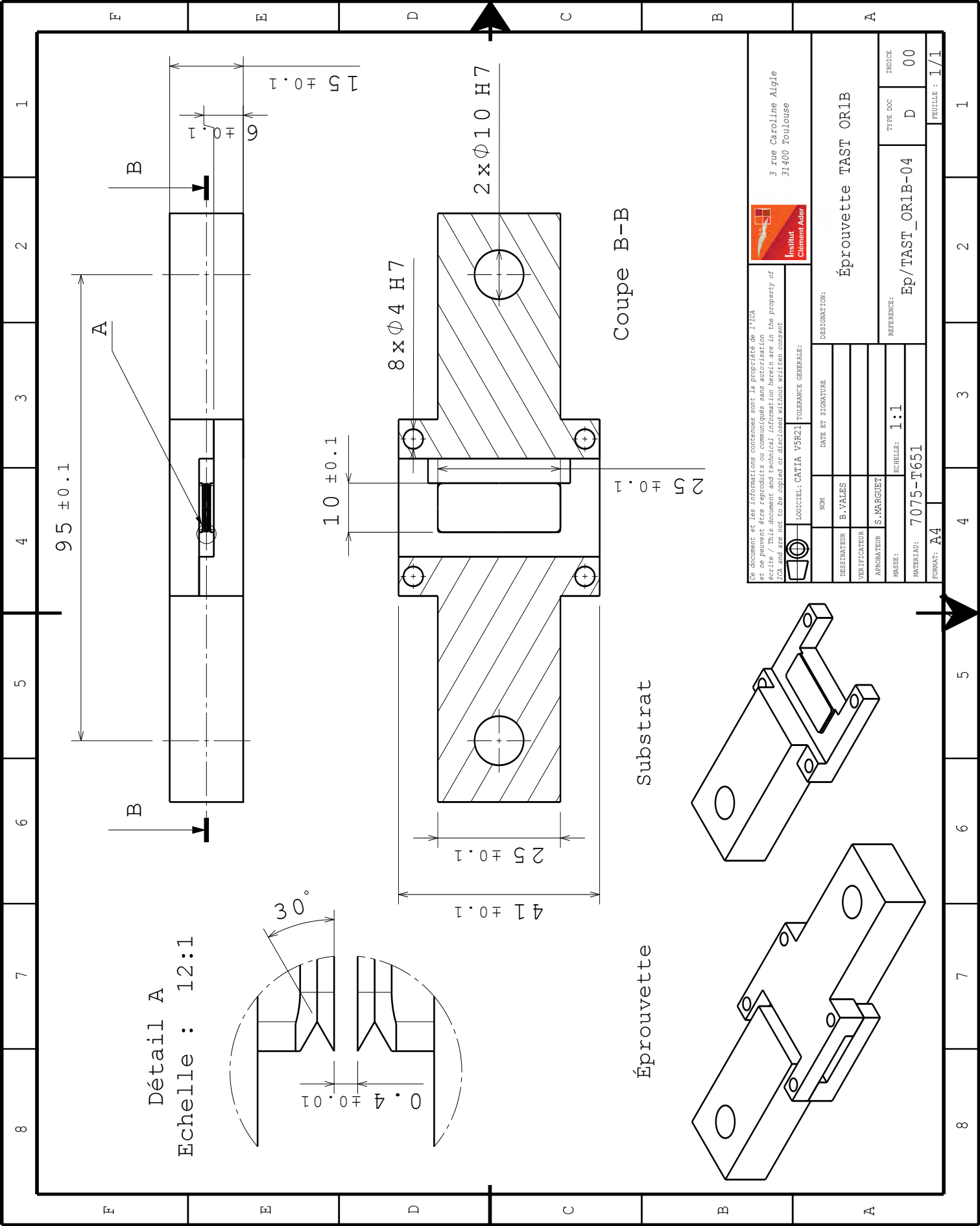
A.1	Éprouvette altère ISO 6892-1	162
A.2	Éprouvette Arcan TCS - $e = 0,2$ mm	163
A.3	Éprouvette Arcan TCS - $e = 0,4$ mm	164
A.4	Éprouvette Arcan étendue à la dynamique	165
A.5	Éprouvette TAST « OR1B »	166
A.6	Éprouvette TAST « OR1NB »	167
A.7	Éprouvette TAST « OR2B »	168
A.8	Éprouvette à simple recouvrement	169

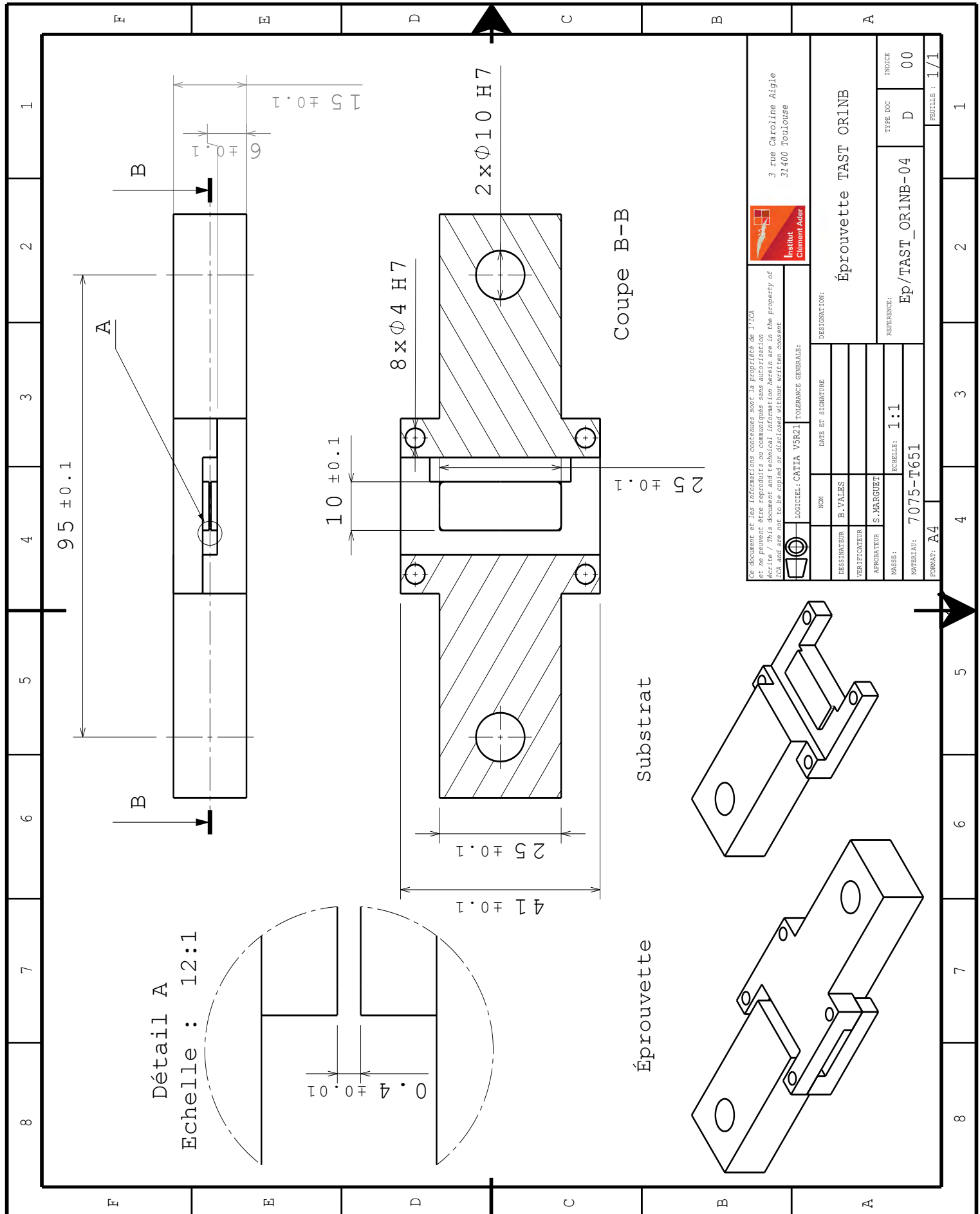


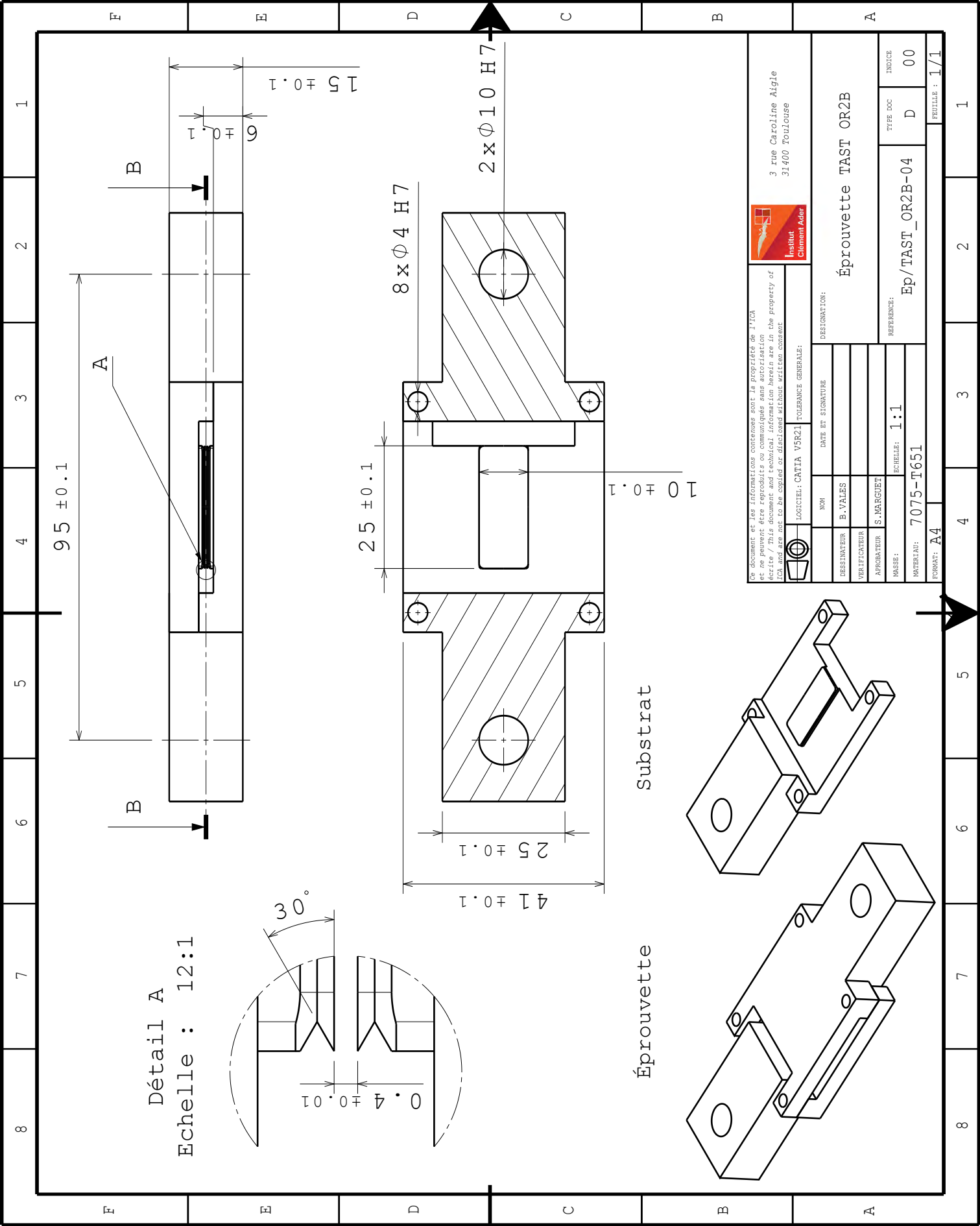












B

Éprouvette Arcan modifiée

Résumé

Des résultats complémentaires concernant le dimensionnement de l'éprouvette modifiée sont présentés dans cette annexe.

Sommaire

B.1 Comparaison des modèles éléments finis 2D(CP) et 3D	172
B.2 Tenue mécanique	173

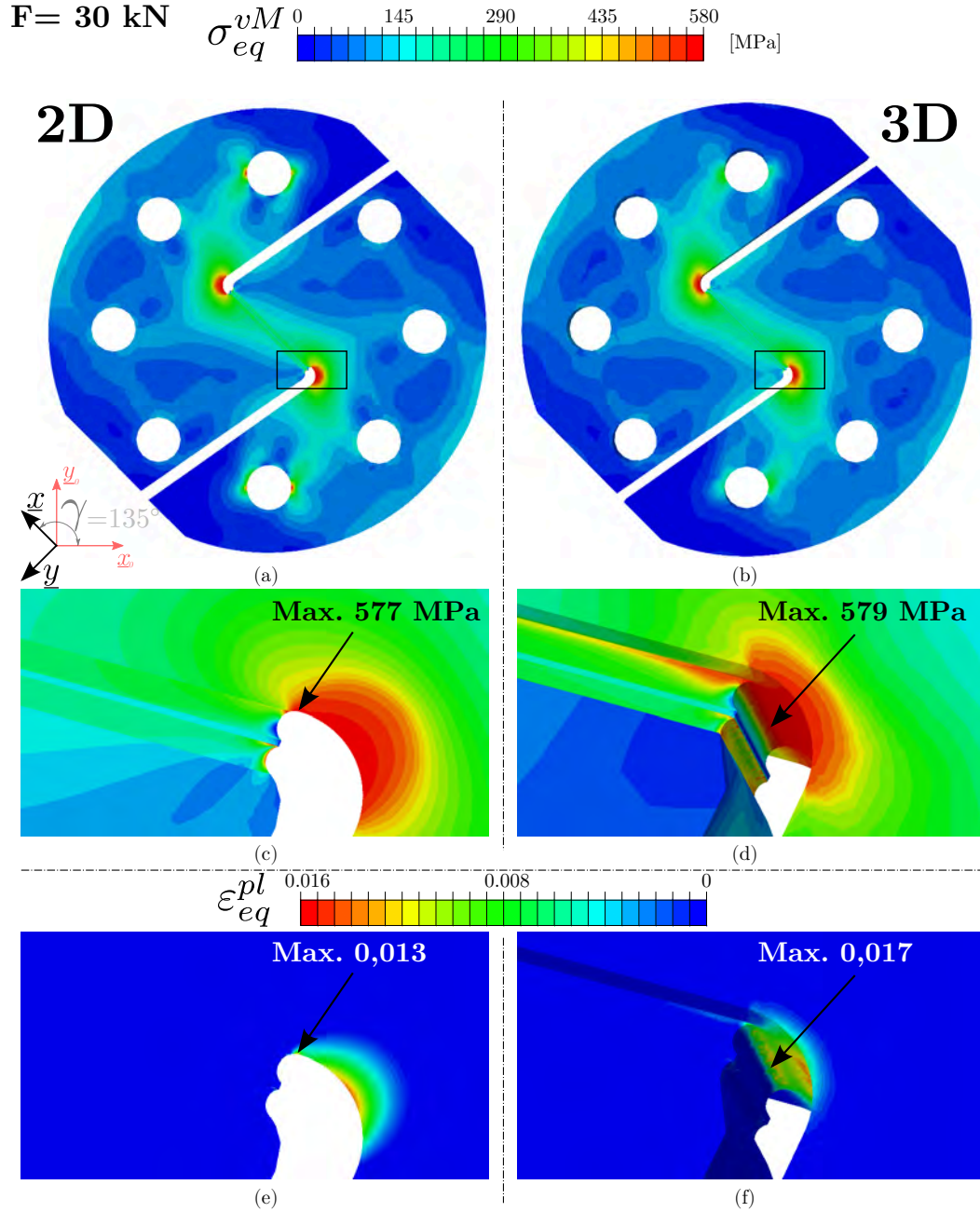


FIGURE B.1 – Comparaison des résultats obtenus *via* des modèles éléments finis 2D(CP) et 3D.

Un modèle éléments finis 2D-contraintes planes a été utilisé pour le dimensionnement de l'éprouvette Arcan modifiée. Une version volumique composée d'éléments tétraédriques C3D4 et C3D10 a été développée en parallèle afin de vérifier la pertinence des résultats obtenus avec le modèle 2D(CP). À titre comparatif, entre le modèle 2D et 3D, le nombre de degrés de liberté passe de 325208 à 2610330 et les temps de résolution d'environ 4 min à 50 min pour des calculs lancés sur deux processeurs et vingt cœurs.

Une comparaison des résultats 2D/3D obtenus pour une éprouvette Arcan en configuration de compression-cisaillement est présentée ci-dessus. Les distributions tracées sont extraites pour un effort imposé de 30 kN. Ces deux modèles donnent des résultats similaires. Par exemple, un écart relatif inférieur à 1 % est relevé entre les contraintes maximales calculées.

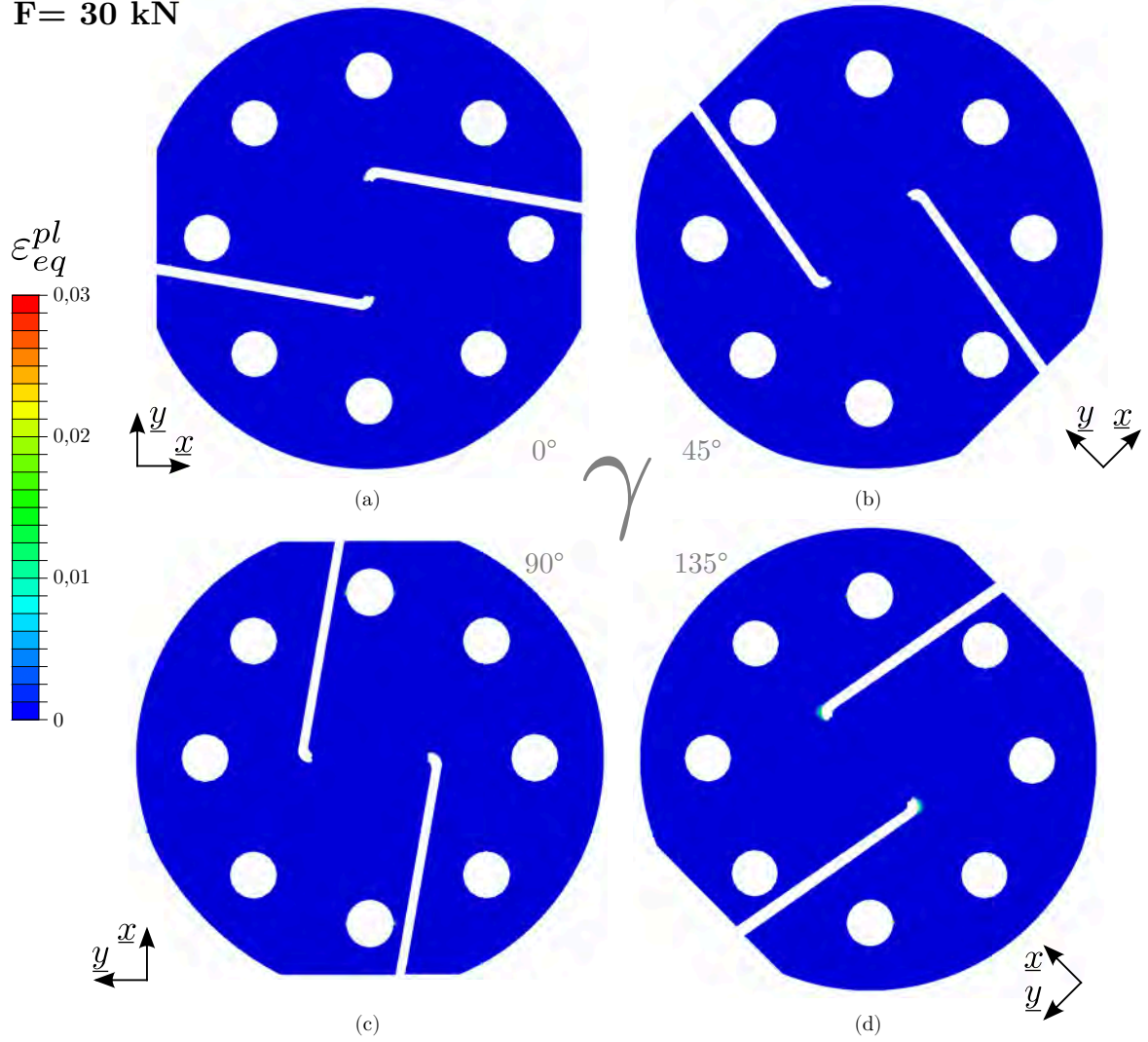
F= 30 kN

FIGURE B.2 – Distributions de la déformation plastique équivalente ε_{eq}^{pl} dans l'éprouvette Arcan modifiée pour la dynamique (obtenues pour un chargement de 30 kN).

Les distributions de la déformation plastique équivalente dans l'éprouvette Arcan modifiée pour la dynamique sont présentées sur la figure ci-dessus. Elles sont obtenues pour un chargement de 30 kN.

Quelle que soit la configuration, les résultats issus des simulations montrent que l'éprouvette optimisée respecte le cahier des charges, *i.e.* $\varepsilon_{eq}^{pl} < 2\%$.

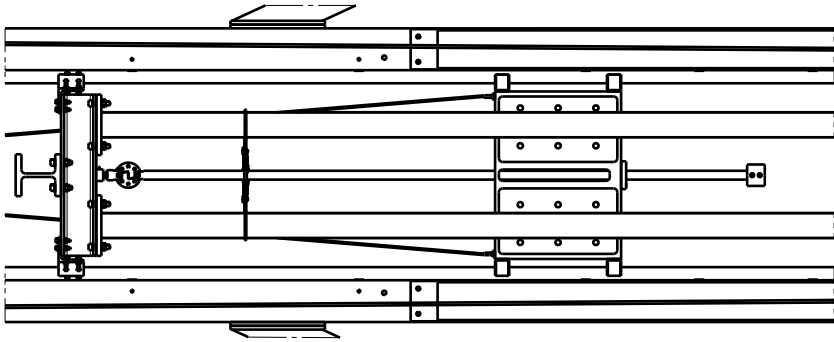
Plans du montage dynamique

Résumé

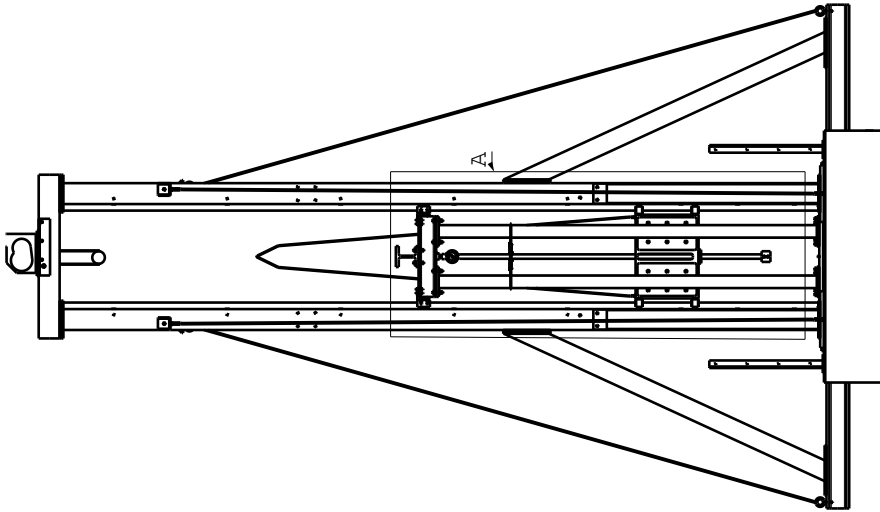
Les mises en plan du montage de traction dynamique sont présentées dans cette annexe.
Les différents éléments du montage sont repérés dans la nomenclature.

Sommaire

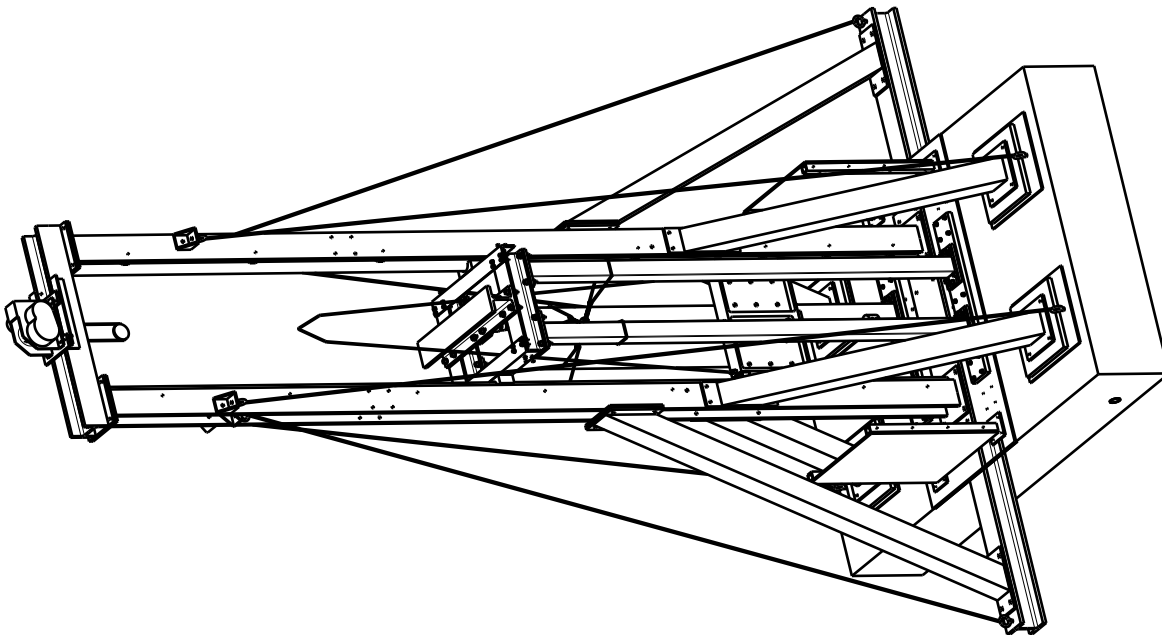
C.1 Montage de traction dynamique sous tour de chute	176
C.2 Assemblage du montage de traction dynamique	177
C.3 Nomenclature	178
C.4 Références	179



Détail A
Echelle : 1:30

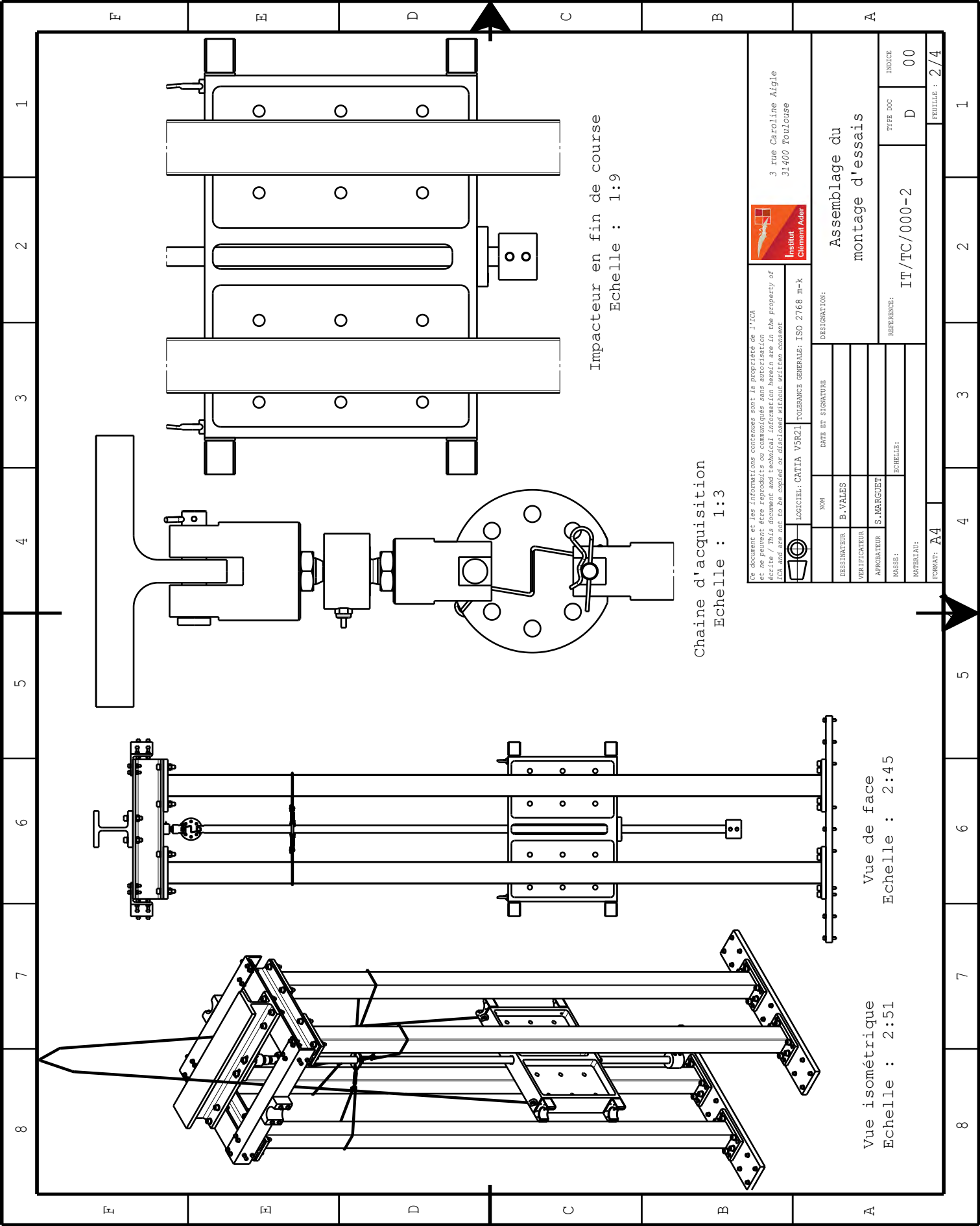


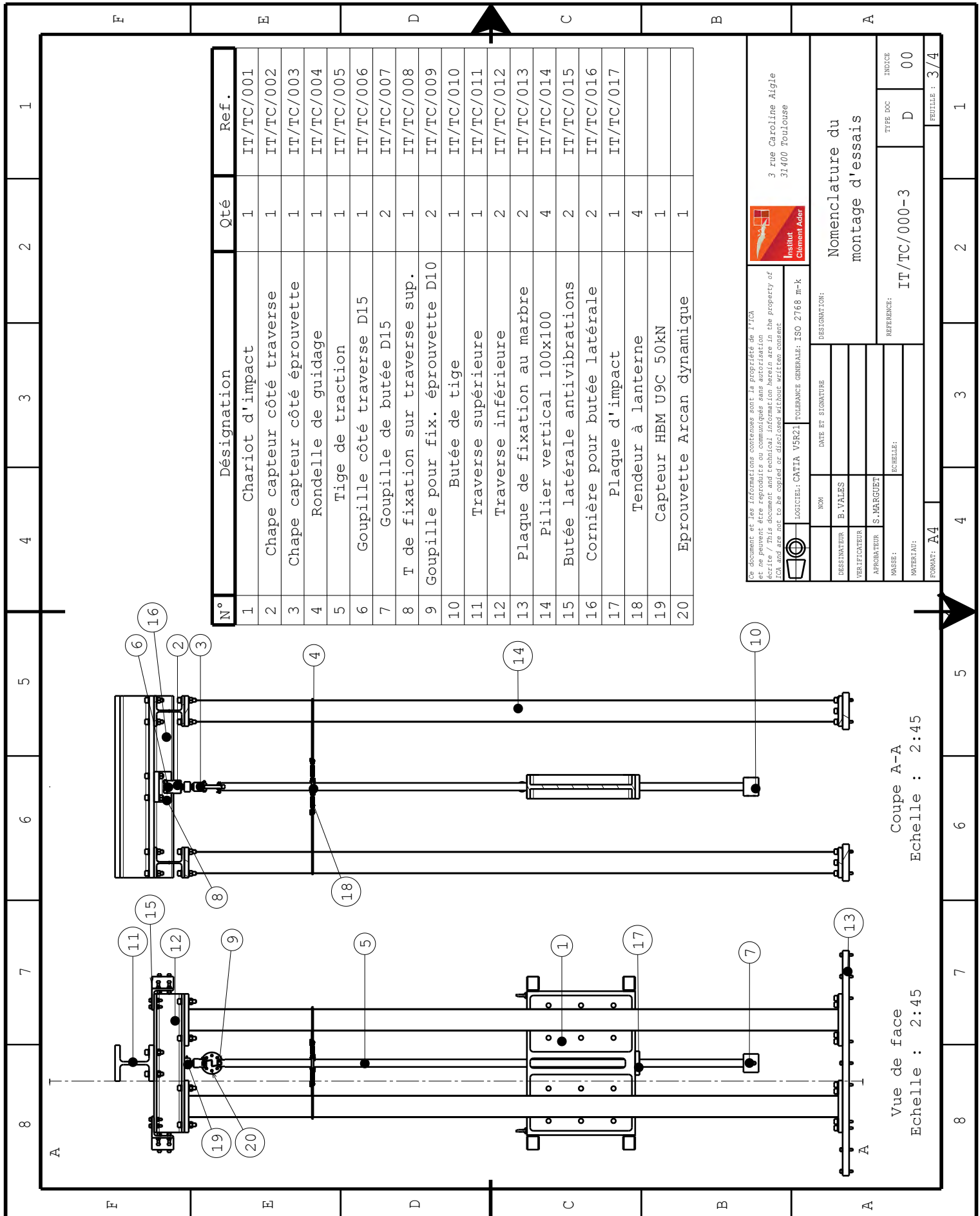
Vue de face
Echelle : 1:60

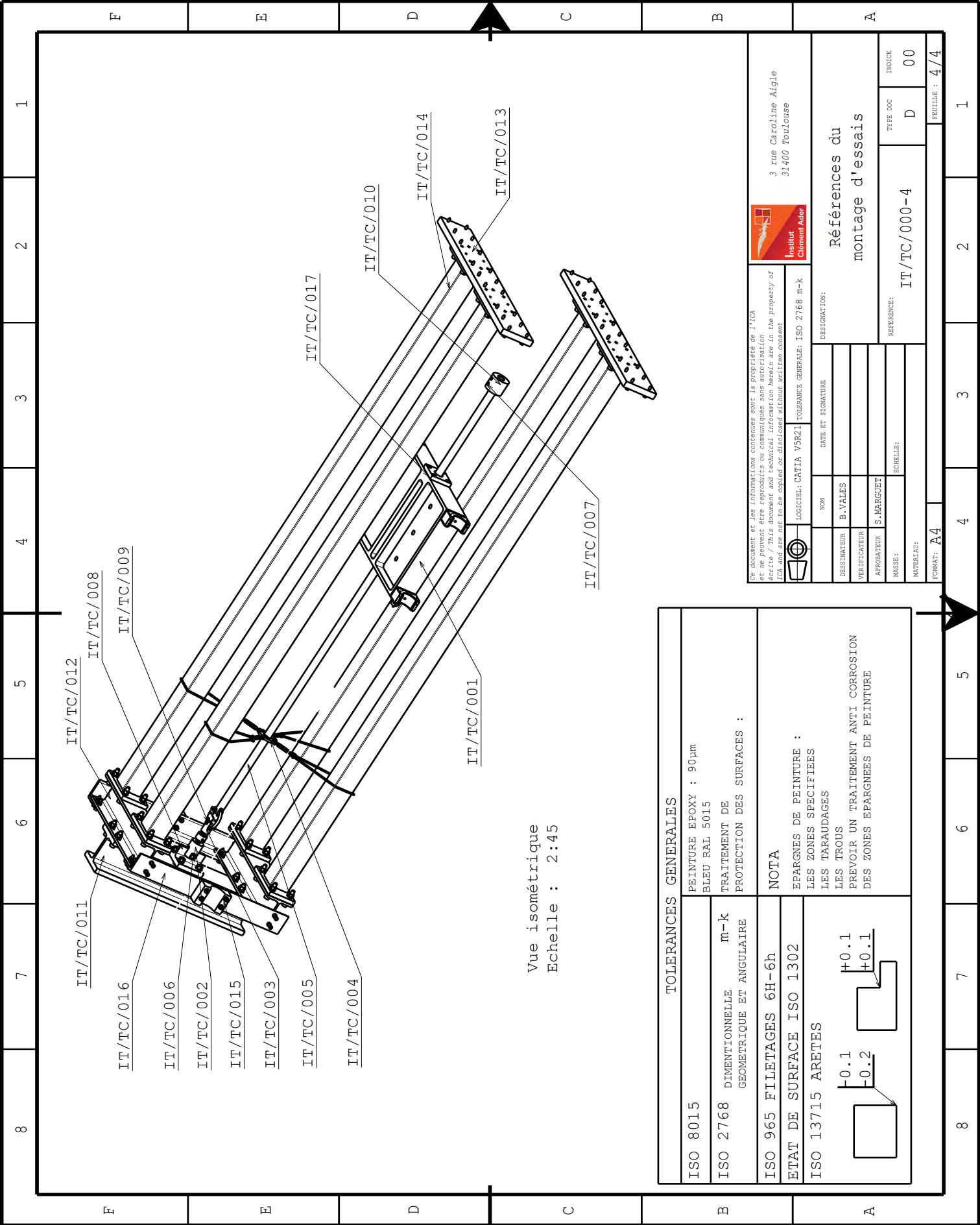


Vue isométrique
Echelle : 1:45

Ce document et ses informations concernent soit la propriété de l'ICA ou sont reproduites sans autorisation écrite. This document and its information are the property of ICA and are not to be copied or disclosed without written consent.				3 rue Caroline Aigle 31400 Toulouse	
		LOGICIEL: CATIA V5R21		TOLERANCE GENERALE: ISO 2768 M-K	
		DATE ET SIGNATURE		DESIGNATION:	
NOM				Montage d'essais	
DESIGNATEUR: B. VALES				sous tour de chute	
VERIFICATEUR					
APPROBATEUR: S. MARGUET					
MASSÉ:		ECHELLE:		REFERENCE:	
MATÉRIAU:				IT/TC/000-1	
FORMAT: A4				TYPE DOC: D	
				INDICE: 00	
				FEUILLE: 1/4	







D

Comparaison des adhésifs caractérisés

Résumé

Cette annexe présente une comparaison directe des résultats issus de la caractérisation des trois adhésifs étudiés dans le chapitre 4.

Sommaire

D.1	Comparaison des réponses mécaniques - Huntsman™ Araldite® 420 A/B	182
D.2	Comparaison des réponses mécaniques - Dow® Betamate™ 1496 V	183
D.3	Comparaison des réponses mécaniques - 3M® AF 191	184
D.4	Comparaison des énergies de déformation	185
D.5	Comparaison des faciès de rupture	186

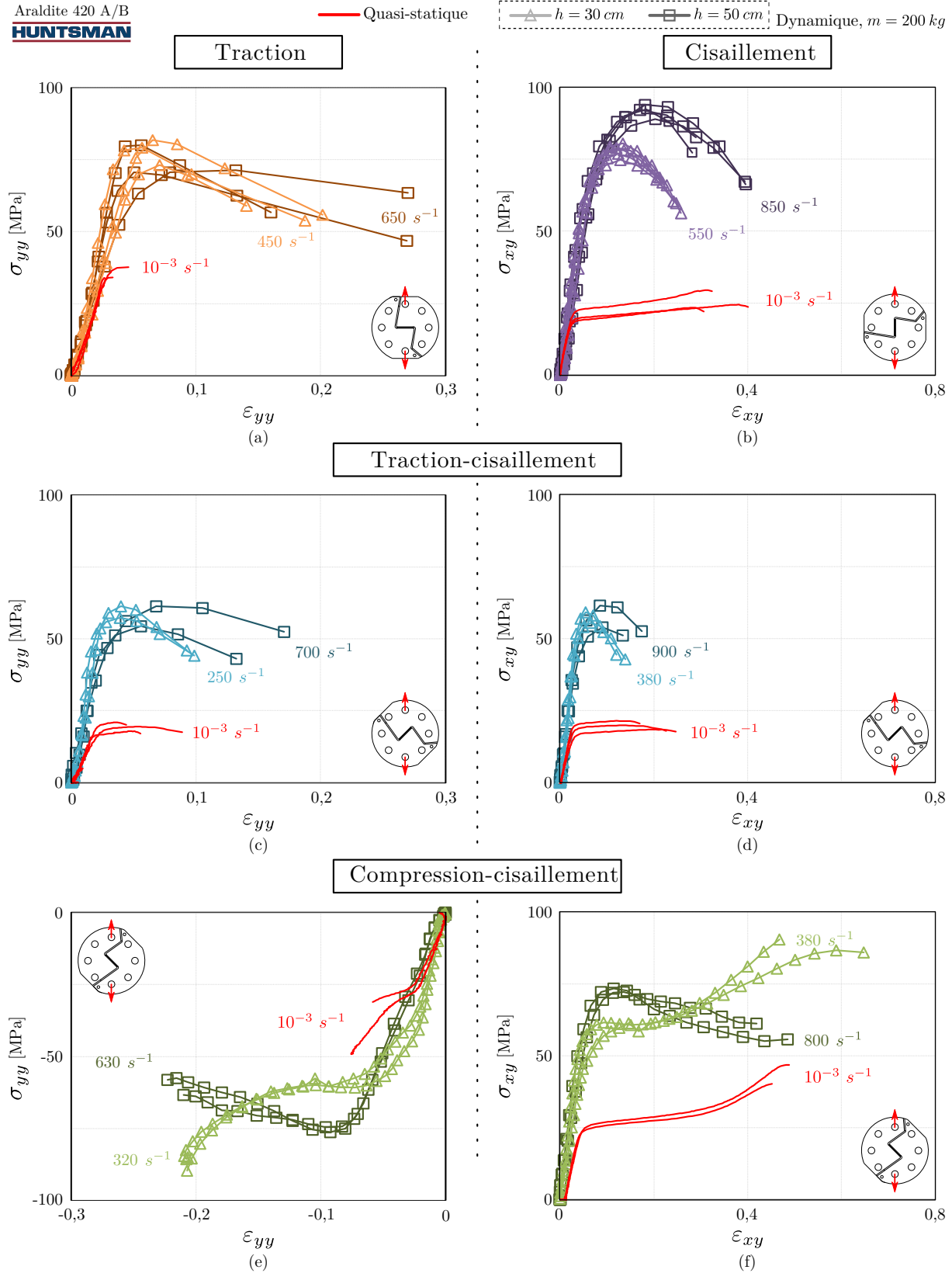


FIGURE D.1 – Comparaison des réponses mécaniques quasi-statiques et dynamiques obtenues pour la caractérisation de l'Huntsman™Araldite® 420 A/B. (a) En traction. (b) En cisaillement. (c-d) En traction-cisaillement. (e-f) En compression-cisaillement.

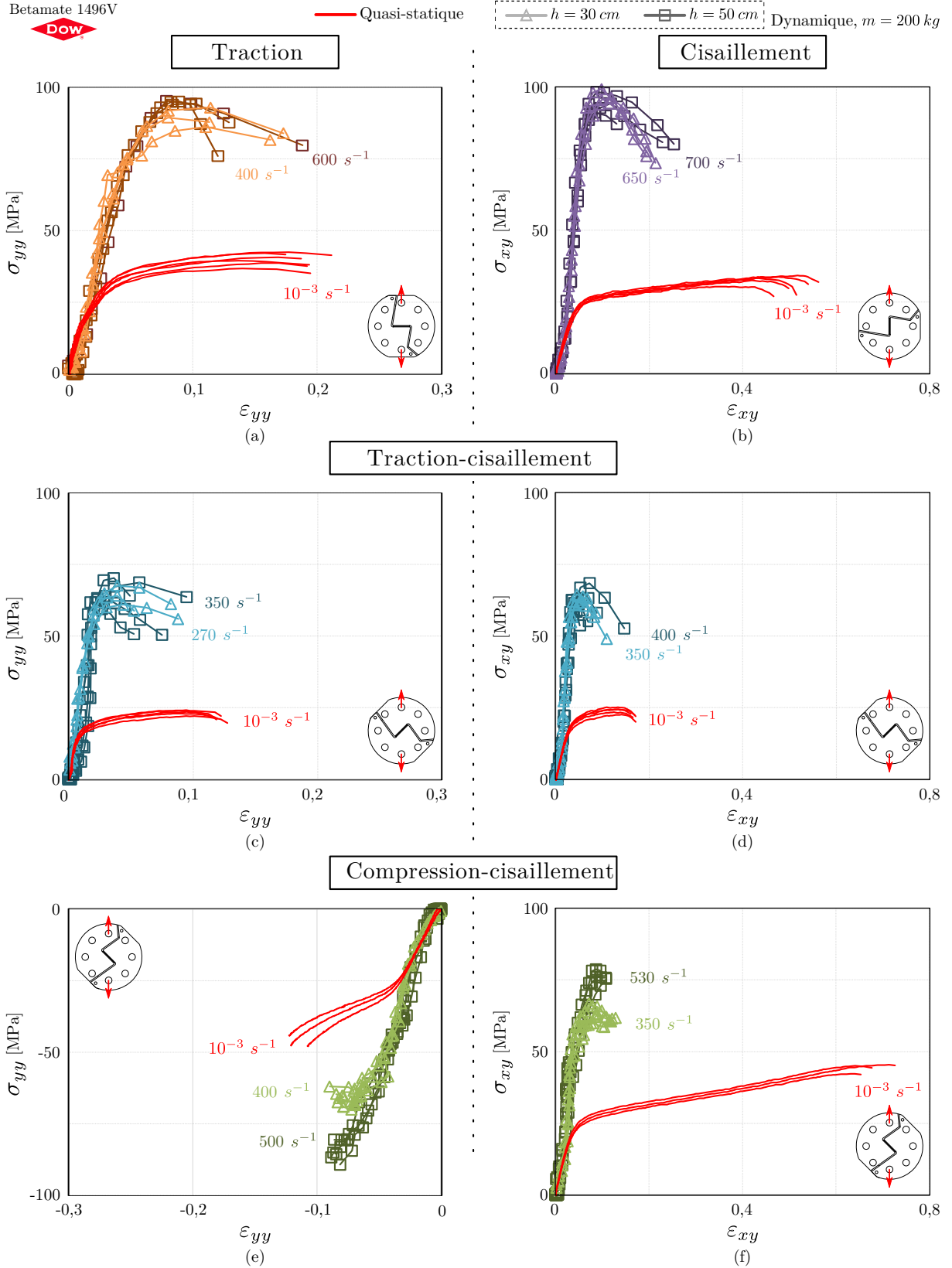


FIGURE D.2 – Comparaison des réponses mécaniques quasi-statiques et dynamiques obtenues pour la caractérisation de la Dow® Betamate™1496 V. (a) En traction. (b) En cisaillement. (c-d) En traction-cisaillement. (e-f) En compression-cisaillement.

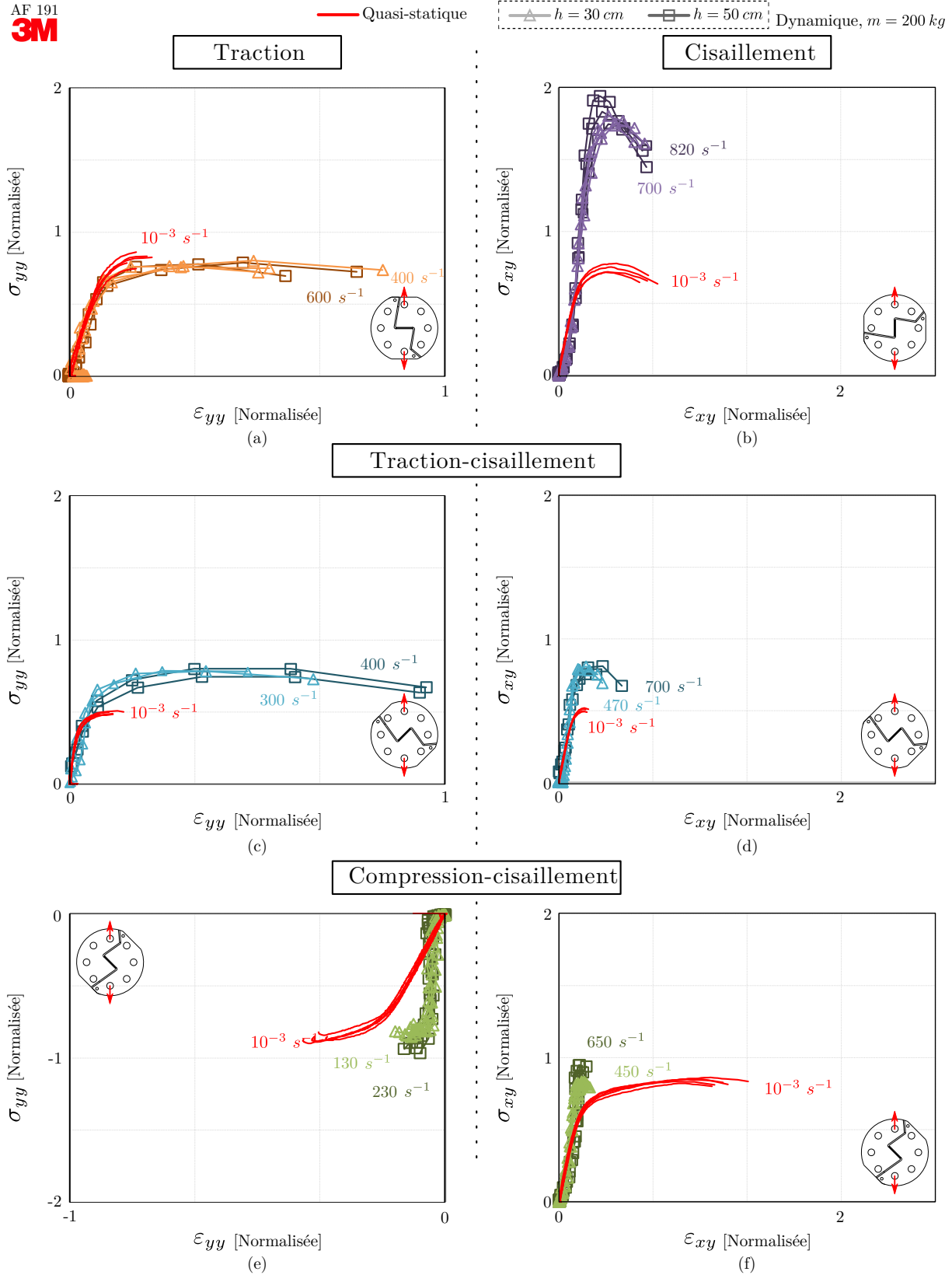


FIGURE D.3 – Comparaison des réponses mécaniques quasi-statiques et dynamiques obtenues pour la caractérisation de la 3M® AF 191. (a) En traction. (b) En cisaillement. (c-d) En traction-cisaillement. (e-f) En compression-cisaillement.

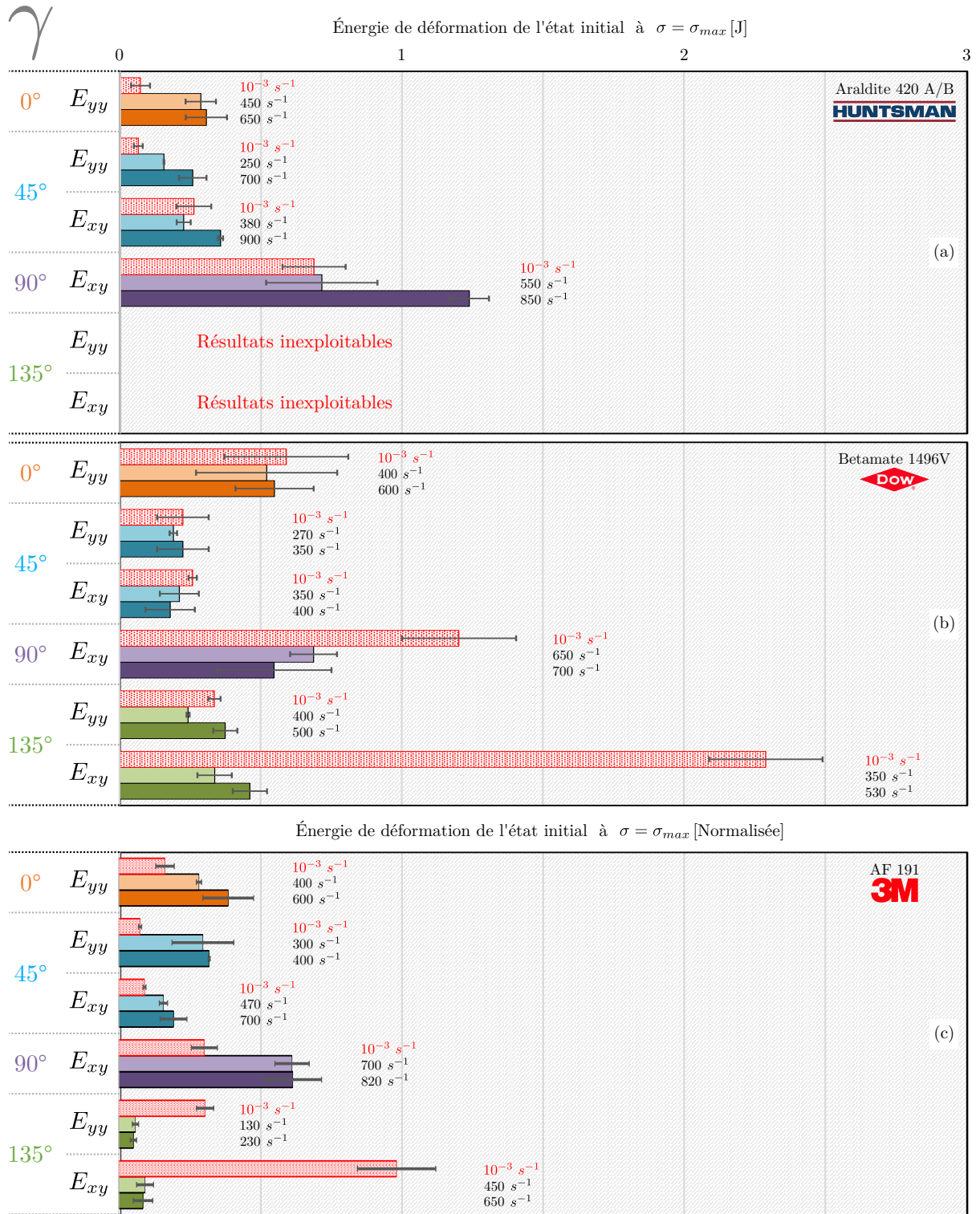


FIGURE D.4 – Comparaison des énergies de déformation E calculées de l'état initial à $\sigma = \sigma_{max}$. Résultats obtenus pour (a) l'HuntsmanTMAraldite[®] 420 A/B, (b) la Dow[®] BetamateTM1496 V et (c) la 3M[®] AF 191.

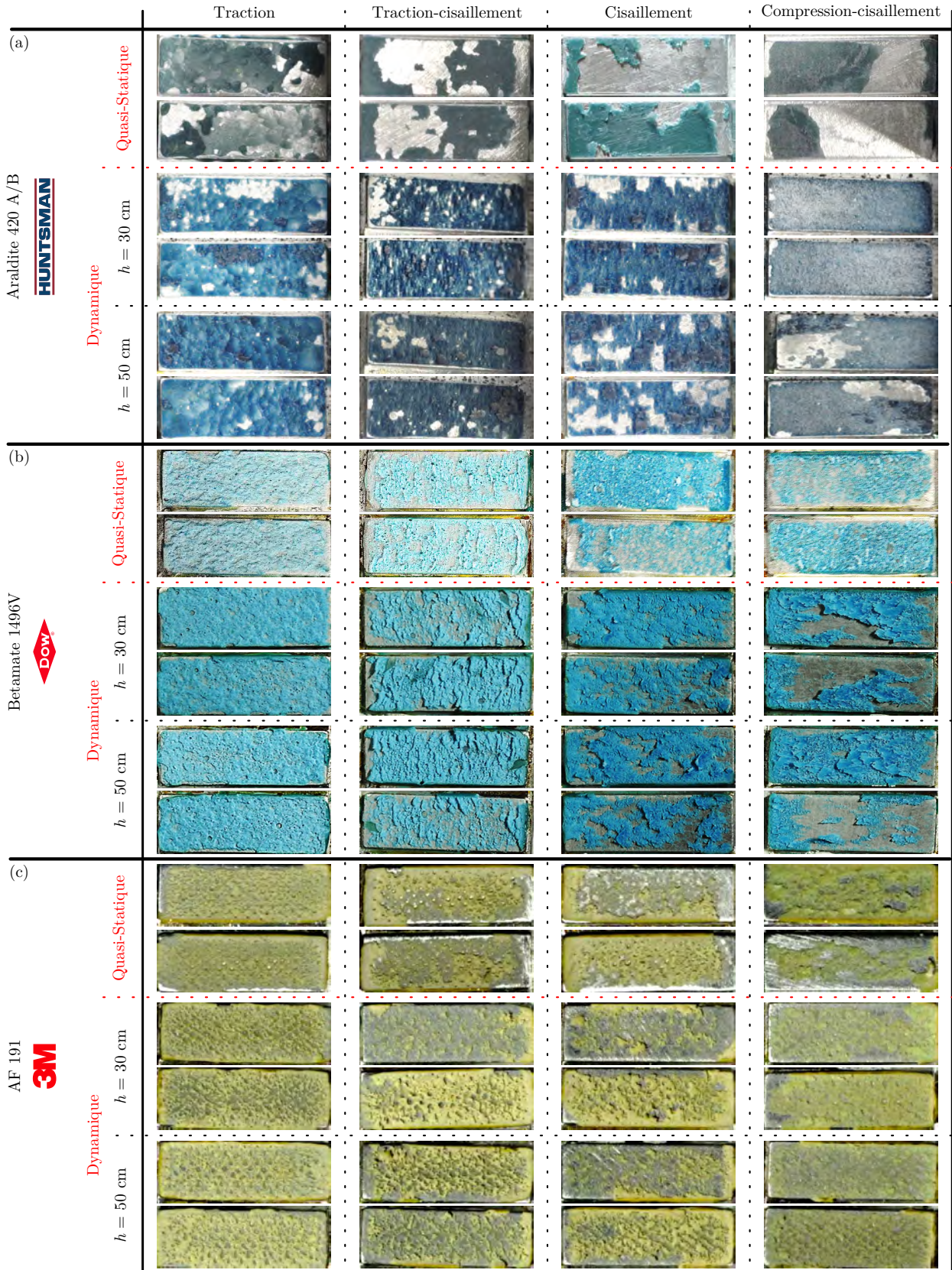


FIGURE D.5 – Comparaison des faciès de rupture. Résultats obtenus pour (a) l'HuntsmanTM Araldite[®] 420 A/B, (b) la Dow[®] BetamateTM 1496 V et (c) la 3M[®] AF 191.

Résumé

Afin de limiter les impacts environnementaux, les industries du transport (automobile, aéronautique, etc.) cherchent à alléger leurs produits. Cette recherche de gain de masse peut conduire à l'utilisation des adhésifs dans la réalisation des structures assemblées. Dans les situations de crash, les joints de colle introduits peuvent jouer un rôle critique sur la tenue globale de l'assemblage. Par conséquent, la maîtrise de leur comportement mécanique devient un point clef de développement. Notamment en vue du « virtual testing », il est essentiel de disposer de lois de comportement fiables dans le but de fournir des outils de calcul prédictifs à l'ingénieur. Les travaux de thèse portent sur le développement d'une démarche expérimentale permettant de caractériser le comportement mécanique d'adhésifs sous sollicitations dynamiques combinées.

Le développement d'une éprouvette Arcan et d'un dispositif de sollicitation dédiés à la caractérisation des adhésifs en dynamique constituent le cœur du travail de thèse. Après une phase de validation, le moyen d'essais développé a été utilisé afin de caractériser le comportement dynamique de trois adhésifs structuraux. Les résultats obtenus ont été comparés à des essais « structures » de type TAST.

En parallèle de ces travaux expérimentaux, une ouverture sur la modélisation numérique des adhésifs est proposée. La stratégie de modélisation se base sur l'utilisation d'éléments cohésifs et d'une loi de comportement développée suivant la méthode de l'état local. L'identification des paramètres matériaux est réalisée par méthode directe et inverse à partir des résultats issus d'essais Arcan. La stratégie de modélisation développée a été transposée à des essais TAST et simple recouvrement. Les prédictions faites par les modèles sont proches des résultats expérimentaux validant ainsi l'approche numérique mise en œuvre.

Mots clés

Collage structural - Caractérisation dynamique - Essai Arcan

Développement expérimental - Analyse MEF

Abstract

In order to limit environmental impacts, the transport industries (automotive, aeronautics, etc.) are seeking to reduce the weight of their products. This search for mass gain can lead to the use of adhesives in the manufacturing of assembled structures. In crash situations, introduced bonded joints can play a critical role in the overall strength of the assembly. Consequently, their mechanical behaviour becomes a key development point. Especially for virtual testing, it is essential to have reliable behaviour laws in order to provide predictive computing tools to the engineer. The thesis work focuses on the development of an experimental approach to characterize the mechanical behaviour of adhesives under combined dynamic loadings.

The development of an Arcan specimen and a test rig dedicated to the dynamic characterization of adhesives is the core of the thesis work. After a validation step, the developed test mean was used to characterize the dynamic behaviour of three structural adhesives. The results obtained were compared with "structural" TAST tests.

In parallel of this experimental work, a first study on the numerical modelling of adhesives is proposed. The modelling strategy relies on the use of cohesive elements and a behaviour law developed according to the local state method. The identification of material parameters is carried out by direct and inverse methods from the results of Arcan tests. The modelling strategy developed has been transposed to TAST and single lap joint tests. The predictions made by the models are close to the experimental results and therefore validate the implemented numerical approach.

Keywords

Structural adhesive bonding – Dynamic characterization - Arcan test

Experimental development – FEM analysis