







Université du Québec  
à Rimouski

# **Caractérisation de l'application du procédé de soudure par ultrasons à la fermeture des sacs en polypropylène tissé**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées (M.Sc.A.)

PAR

© PAULINE CUNISSE

**Septembre 2022**



**Composition du jury :**

**Jean-Sébastien Deschênes, président du jury, Université du Québec à Rimouski**

**Jean Brousseau, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski**

**Nicole R. Demarquette, codirectrice de recherche, École de technologie supérieure**

**Véronique Dassylva-Raymond, examinatrice, Université du Québec à Rimouski**

**Audrey Diouf-Lewis, examinatrice externe, Coalia (Thedford Mines)**

Dépôt initial le 15 juin 2022

Dépôt final le 13 septembre 2022



UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.



## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier l'ensemble de mes collègues et encadrants qui m'ont guidée et soutenue tout au long de cette aventure. Je salue le soutien matériel, technique et financier de Mitacs, Vestech et Coalia. Je tiens à remercier en particulier Jean Brousseau et Alexis Darisse grâce à qui je n'ai pas perdu le cap. Je vous serais éternellement reconnaissante pour tout ce que j'ai appris durant ces deux années de formation.



## RÉSUMÉ

Le projet cherche à adapter le procédé de soudure ultrasonique (US) à la fermeture de sacs en polypropylène tissé. On évalue l'applicabilité de la technologie à cette utilisation. Lors de l'étude, on explore des thématiques telles que le principe de fonctionnement du dispositif de soudure, la transmission des vibrations à la matière, les spécificités des sacs et le comportement du matériau à différentes sollicitations. Pour arriver aux résultats souhaités, on applique une méthode expérimentale pour évaluer la qualité des soudures en fonction des paramètres d'application. On suit un plan d'expérience à deux niveaux centrés sur les principaux facteurs de variation du procédé et on analyse les fermetures selon trois critères d'évaluation : la résistance des soudures, leur apparence et leur structure microscopique. Ces analyses permettent de connaître les performances globales des fermetures, de cibler une bonne utilisation du procédé et de comprendre ce qui influence principalement la qualité des soudures. Les résultats de l'étude montrent que les sacs fermés par soudure US sont plus résistants : avec un motif de soudure discontinu, si on amorce correctement la soudure, avec une grande puissance de soudure, une pression de contact et une vitesse de soudure équilibrée en fonction du matériau et du motif. Les expérimentations montrent surtout que la fermeture des sacs dépend d'un point d'équilibre complexe à trouver entre tous les paramètres. En effet, les réglages de la machine, la mise en position des sacs et les propriétés des matériaux à souder sont interdépendants. Une fois qu'on parvient à souder les sacs, il est difficile d'améliorer encore les soudures au risque de désagréger le matériau.

Mots clés : Soudure ; Ultrasons ; Polypropylène tissé ; Composite ; Ensachage ; Résistance des fermetures.



## ABSTRACT

The research project tries to adapt the ultrasonic welding process to seal woven polypropylene bag. We want to estimate the applicability of this technology and understand more how it is working. We study different topics like the working principle of the device, the vibration propagation to the material interface, the structure, and the behaviour of the material under different stresses. We use an experimental approach to measure the quality of the welded area linked with the sealing settings. We apply a two-level experiment design focused on the most important welding factors and we estimate the performance of the process in accordance with three criteria: these requirements are the mechanical strength, the appearance, and the microscopic structure. This methodology allows us to estimate the general quality of the welding and to identify the best way to use the ultrasonic welding. The results show us that we can produce a good seal with a discontinuous weld pattern as long as the weld is started correctly, the power is sufficient to create a good weld and that there is a good balance between the pressure at the interface, the welding speed. The experimental results also indicate that the bag closure depends on a complex balance to be found between all the parameters. Indeed, the machine settings, the bag positioning and the physical properties of the materials are interdependent. Once the bags have been successfully sealed, it is difficult to further improve the seals without altering the material.

*Keywords:* Ultrasound; Welding; Polypropylene; Composite structure; Bagging; Understanding; strength; Appearance; Regularity; Balance.



## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	vii
RÉSUMÉ.....	ix
ABSTRACT.....	xi
TABLE DES MATIÈRES.....	xiii
LISTE DES TABLEAUX.....	xv
LISTE DES FIGURES.....	xvii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xxi
LISTE DES SYMBOLES.....	xxiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS.....	5
1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE.....	5
1.2 TECHNOLOGIE DE SOUDAGE A ULTRASONS DANS L'INDUSTRIE DE L'EMBALLAGE.....	6
1.3 PROBLEMATIQUE.....	8
1.4 OBJECTIFS.....	12
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	15
2.1 PLAN DE RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	15
2.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN DISPOSITIF DE SOUDURE A ULTRASONS (ETUDE A ECHELLE MACROSCOPIQUE).....	16
2.2.1 Fonctionnement d'un dispositif de soudure à ultrasons.....	16
2.2.2 Paramètres et réglages du dispositif.....	19
2.3 COMPOSITION, STRUCTURE ET COMPORTEMENT DES SACS EN POLYPROPYLENE TISSÉ (ÉTUDE À ÉCHELLE MICROSCOPIQUE).....	23

2.3.1	Structure des sacs .....	23
2.3.2	Spécificités des sacs à échelle microscopique .....	29
CHAPITRE 3	MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	39
3.1	INTRODUCTION .....	39
3.2	DISPOSITIF DE SOUDAGE.....	40
3.2.1	Machine à souder et les paramètres .....	40
3.2.2	Roues et motifs de soudure .....	42
3.2.3	Paramètres d'application.....	44
3.3	MODELE DE SAC ET TYPE DE FERMETURE ETUDIÉS .....	45
3.4	TESTS MECANIQUES.....	47
3.4.1	Travaux préliminaires .....	48
3.4.2	Tests de chute.....	53
3.4.3	Tests d'arrachement et de cisaillement .....	55
3.4.4	Plan d'expérience et exploitation.....	60
3.5	ANALYSE DE L'APPARENCE DES FERMETURES .....	67
3.6	ANALYSE CHIMIQUE .....	70
3.6.1	Méthode d'identification et d'analyse .....	71
3.6.2	Matériel .....	74
CHAPITRE 4	ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION .....	80
4.1	PRESENTATION GENERALE DES RESULTATS .....	80
4.1.1	Tests de résistance.....	80
4.1.2	Analyse visuelle .....	87
4.1.3	Analyses microscopiques.....	92
4.2	DISCUSSION.....	102
4.2.1	Confrontation selon les trois critères d'évaluation .....	102
4.2.2	Critique des résultats obtenus .....	105
CONCLUSION	GÉNÉRALE .....	110
ANNEXE 1	.....	112
RÉFÉRENCES	BIBLIOGRAPHIQUES .....	122

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Comparatif entre les fermetures par couture et par soudure à US pour les sacs WPP à gueule ouverte.....	10
Tableau 2 : Récapitulatif des paramètres de la machine.....	42
Tableau 3 : Paramètres d'application.....	45
Tableau 4 : Caractéristiques des échantillons utilisés.....	46
Tableau 5 : Analogie entre les tests sur sacs et sur bandes de textile .....	52
Tableau 6 : Exigences pour les tests sur sacs entiers .....	54
Tableau 7 : Exigences pour les tests sur bande.....	56
Tableau 8 : Niveaux des paramètres de soudure.....	61
Tableau 9 : Code couleur pour l'analyse des tests de chute .....	64
Tableau 10 : Plan d'expérience pour l'analyse microscopique .....	73
Tableau 11 : Résultats des tests de chute et analyse statistique.....	82
Tableau 12 : Analyse globale des tests de cisaillement et d'arrachement .....	84
Tableau 13 : Analyse de l'impact des facteurs expérimentaux .....	85
Tableau 14 : Analyse des interactions entre les réglages de la soudeuse .....	86
Tableau 15 : Mesures de variabilité des tests d'arrachement .....	87



## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Principe de fonctionnement de la soudure par ultrasons appliquée à un thermoplastique .....	18
Figure 2 : Structure et fonctionnement d'un dispositif de soudure par ultrasons .....	19
Figure 3 : Exemples d'applications possibles du scellage par ultrasons .....	20
Figure 4 : Réglages et facteurs du dispositif de soudure .....	23
Figure 5 : Schéma des principaux types de sacs .....	25
Figure 6 : Structure et direction du tissage par rapport aux dimensions du sac .....	25
Figure 7 : Différence entre les sacs WPP et BOPP et exemples de laminages extérieurs. ....	26
Figure 8 : Défauts de tissage possible sur un sac en WPP.....	27
Figure 9 : Traitements appliqués au polypropylène.....	28
Figure 10: Structure macroscopique des sacs .....	28
Figure 11: Notion de contact intime .....	30
Figure 12: Notion de cicatrisation .....	30
Figure 13 : Notions de pétrochimie .....	33
Figure 14: Caractéristiques des chaînes de polypropylène.....	33
Figure 15 : Exemples de tacticités du polypropylène .....	34
Figure 16 : Structures cristallines du PP.....	35
Figure 17 : Modèles lamellaires du PP .....	36
Figure 18 : Exemples de sphérolites du PP.....	37
Figure 19 : Principe de fonctionnement de la soudeuse .....	41
Figure 20 : Photo de la soudeuse ultrasonique .....	41

Figure 21 : Autres motifs testés (lors d'essais exploratoires) .....	43
Figure 22 : Photographies des roues et des motifs de soudure.....	43
Figure 23 : Caractéristiques des motifs de soudure.....	44
Figure 24 : Sac utilisé pour les expériences (sacs BOPP).....	45
Figure 25 : Forme et position de la soudure pour les sacs .....	47
Figure 26 : Caractéristiques du matériau de remplissage.....	47
Figure 27 : Cycle de vie des sacs .....	48
Figure 28 : État initial des sacs.....	50
Figure 29 : Sollicitation des soudures internes avant rupture .....	50
Figure 30 : Répartition du produit dans le sac après rupture partielle de la soudure interne .....	51
Figure 31 : Position du pli et des goussets après rupture totale de la soudure interne.....	51
Figure 32 : Schéma de principe du test de chute.....	53
Figure 33 : Organigramme du système de test mécanique.....	57
Figure 34 : Schéma mécanique du montage de test .....	57
Figure 35 : Photos du système de test sur bandes .....	58
Figure 36 : Répartition des sollicitations mécaniques en fonction de la position de la soudure.....	59
Figure 37 : Géométrie des échantillons des tests de cisaillement et d'arrachement .....	59
Figure 38 : Plan d'expérience pour les tests de chute .....	62
Figure 39 : Plan d'expérience pour les tests en cisaillement.....	62
Figure 40 : Plans d'expérience pour les tests d'arrachement .....	63
Figure 41 : Exemples de diagrammes d'effet d'un facteur à deux niveaux .....	67
Figure 42 : Exemples de diagrammes d'interaction pour deux facteurs à deux niveaux.....	67
Figure 43 : Défauts visuels possibles .....	68
Figure 44 : Critères de classification des défauts .....	69

Figure 45 : Microscope électronique à balayage Hitachi SU1510 .....	75
Figure 46 : (1) Spectromètre Raman ; (2) Spectromètre FT-IR ; (3) XRF portatif .....	76
Figure 47 : Calorimètre DSC Q2000 .....	77
Figure 48 : Défaut 1 : la profondeur des soudures dans le matériau .....	88
Figure 49 : Défaut 2 : trajectoire des fermetures .....	89
Figure 50 : Défaut 3 : Transition entre les goussets et le centre du sac .....	89
Figure 51 : Défaut 4 : Arrachement du plastique et amorce des soudures à la première extrémité des échantillons .....	90
Figure 52 : Défaut 5 : Plissement du matériau autour de la fermeture .....	90
Figure 53 : Calorigramme de la partie tissée d'un échantillon non soudé .....	94
Figure 54 : Calorigramme de la partie laminée d'un échantillon non soudé .....	95
Figure 55 : Analyses par EDX de la composition des échantillons .....	96
Figure 56 : Prises de vue au MEB d'un échantillon de sac (vue de coupe) .....	97
Figure 57 : Prises de vue au MEB d'un échantillon de sac (tissage en PP) .....	97
Figure 58 : Prise de vue au MEB d'un échantillon de sac (zone laminée orange) .....	98
Figure 59 : Photographies au MEB d'échantillons soudés (exemples d'amorces de rupture) .....	100
Figure 60 : Photographies au MEB d'échantillons soudés (exemples de zones dégradées) .....	100
Figure 61 : Calorigramme de l'échantillon soudé 1 .....	112
Figure 63 : Calorigramme de l'échantillon soudé 4 .....	113
Figure 62 : Calorigramme de l'échantillon soudé 7 .....	113
Figure 64 : Courbe XRD du tissage (avant soudure) .....	115
Figure 65 : Courbe XRD du laminage (avant soudure) .....	115
Figure 66 : Courbes XRD, courbe du laminage et du tissage (avant soudure) .....	116
Figure 67 : Courbes XRD, soudures 1, 4, 7 .....	116
Figure 68 : Courbes XRD, soudures 4, 5, 6 .....	117

Figure 69 : Courbes XRD, soudures 7, 8, 9 .....	117
Figure 70 : Spectres Raman du tissage et du laminage (avant soudure).....	118
Figure 71 : Spectres Raman, soudures 1, 4, 7 .....	118
Figure 72 : Spectres Raman, soudures 1, 8, 9 .....	119
Figure 73 : Spectres Raman, soudures 4, 5, 6 .....	119
Figure 74 : Spectres FT-IR du tissage et du laminage (avant soudure) .....	120
Figure 75 : Spectres FT-IR, soudures 1, 4, 7.....	120
Figure 76 : Spectres FT-IR, soudures 1,8, 9.....	121
Figure 77 : Spectres FT-IR, soudures 4, 5, 6.....	121

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES**

<b>US</b>	Ultrasonique ou ultrasons
<b>PP</b>	Polypropylène
<b>PE</b>	Polyéthylène
<b>LDPE</b>	Low density polyethylene (polyéthylène à basse densité)
<b>WPP</b>	Woven polypropylene (polypropylène tissé)
<b>BOPP</b>	Bi-oriented polypropylene (polypropylène bi orienté)
<b>E</b>	Écartement
<b>P</b>	Pression
<b>V</b>	Vitesse
<b>O</b>	Output (puissance)
<b>S</b>	Surface
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials (Société américaine des tests et équipements)
<b>ISO</b>	Organisation internationale de normalisation
<b>ZAT</b>	Zone affectée thermiquement
<b>HF</b>	Haute fréquence
<b>DSC</b>	Calorimétrie différentielle à balayage

<b>MEB</b>	Microscope électronique à balayage
<b>EDX</b>	Énergie dispersive de rayons X
<b>XRD</b>	Diffraction de rayons X
<b>FT-IR</b>	Fourier transform infrared spectroscopy (spectroscopie à transformée de Fourier par infrarouge)

## LISTE DES SYMBOLES

$\dot{Q}$	Flux thermique par unité de volume ( $W/m^3$ )
$T_0$	Température initiale à l'interface (K)
$k$	Conductivité thermique du matériau ( $W/mK$ )
$T$	Température du matériau (K)
$\rho$	Masse volumique du matériau ( $kg/m^3$ )
$C_p$	Capacité thermique massique du matériau ( $J/K.kg$ )
$\tau$	Constante de temps de la période de la vibration (s)
$x$	Paramètre spatial (m)
$\omega$	Pulsation de l'onde (rad/s)
$f$	Fréquence de la vibration
$\varepsilon_0$	Amplitude de la déformation unitaire (m/m)
$\mu$	Viscosité dynamique du polymère (kg/ms)
$N_{\text{couleur}}$	Nombre d'échantillons correspondant à un même code couleur
$N_{\text{total}}$	Nombre total d'échantillons de la série
$\text{Force}_{\text{max}}$	Force maximale de l'échantillon
$\overline{F_{\text{max}}}$	Force maximale moyenne de la série
$\sigma$	Écart- type

<b>C<sub>v</sub></b>	Coefficient de variation des mesures
<b>E<sub>1</sub></b>	Force maximale moyenne pour l'écartement au niveau 1
<b>I<sub>E<sub>1</sub>P<sub>1</sub></sub></b>	Force maximale moyenne pour l'écartement au niveau 1 et la pression au niveau 1

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le sujet de ce mémoire consiste à estimer la pertinence du scellage par ultrasons appliqué à des sacs en polypropylène tissé. Cette technologie est certes connue et appliquée depuis des décennies, mais pour des sacs plus petits, sans goussets ni laminage et pour des matériaux plus réguliers comme des plaques, des films ou des textiles pour l'habillement. Dans ce cas d'étude, on cherche à adapter son utilisation et à en améliorer l'usage. Cela revient à comprendre le fonctionnement d'une soudeuse ultrasonique, de cibler les facteurs d'application à contrôler et d'identifier les caractéristiques et la composition de la structure à souder.

Les objectifs du projet sont d'étudier le procédé à échelle macroscopique et microscopique selon trois critères d'évaluation. On mesure dans un premier temps la résistance mécanique des soudures par des tests sur sacs entiers et par des tests de cisaillement et d'arrachement sur des bandes coupées dans des sacs. On en tire ainsi la résistance globale des soudures, l'effet des principaux facteurs de variation et de leurs interactions. Ensuite, on considère l'apparence des fermetures pour identifier les défauts de soudure et ensuite les minimiser. Enfin, on analyse la composition et la structure des sacs ainsi que les caractéristiques des zones soudées. Ces trois axes d'évaluation permettent de mesurer la qualité des soudures, de relier les caractéristiques du matériau à sa soudabilité et de définir une bonne façon d'appliquer le procédé à ce type de sac.

Les ultrasons sont utilisés pour la soudure et le scellage depuis les années 60 (Daniels, 1965). Initialement utilisée pour joindre des plaques en plastique rigide (Benatar & Gutowski, 1989), on a adapté cette technologie pour sceller et couper des films minces pour l'emballage (van Oordt *et al.*, 2014), des petits sacs (Conselvan, 2017), des textiles non tissés (Bhat, *et al.*, 2004) ou des tissus fins (Vujasinović *et al.*, 2007). Désormais, la soudure ultrasonique est utilisée pour les thermoplastiques et les métaux sous diverses formes. Ce

procédé permet en effet de souder des matériaux rigides ou souples et aussi de remplacer la couture pour l'industrie du vêtement ou pour les textiles non tissés en général. Plus spécifiquement, le scellage ultrasonique est développé par le secteur de l'ensachage pour l'agroalimentaire. Par exemple, on l'applique à des emballages en film plastique ou à des structures plus rigides destinés à la grande distribution. En ce qui concerne les contenants plus grands et en matériaux tissés, on ne retrouve pas d'application de ce processus de fermeture. De fait, on est capable de comprendre et d'utiliser les ultrasons pour des matériaux réguliers et pour des surfaces réduites. Cependant d'après les ressources bibliographiques disponibles il n'y a pas eu de travaux de recherche qui traitent de l'application du procédé pour des structures complexes et dans de plus grandes dimensions. Les particularités du projet de recherche sont que les sacs sont plus complexes, plus gros, plus sollicités et plus irréguliers que pour les travaux précédents. En effet, les sacs utilisés ont des goussets sur les côtés, ce qui implique que le nombre d'épaisseurs varie sur la longueur de la soudure, leur structure est tissée et est stratifiée à cause du laminage.

Le travail effectué lors du projet est présenté en quatre chapitres. Le premier pose le contexte du projet, la problématique de l'étude et se termine par une présentation des objectifs à atteindre. Le deuxième expose les concepts utiles à la compréhension du projet comme les phénomènes qui expliquent la soudure US, le fonctionnement et les facteurs d'une soudeuse, la structure et la composition des sacs et leur comportement face au procédé. Le troisième chapitre indique la méthode suivie, les facteurs d'application testés, le plan d'expérience suivi et les tests réalisés. On se limite au cas d'étude le plus représentatif et le plus complexe de l'industrie et on fixe : la composition et la structure des sacs, la forme de la fermeture et enfin la machine de soudure utilisée. On se limite également aux principaux facteurs d'application : la vitesse, la pression de soudure, l'écartement entre la roue et la sonotrode, la puissance de l'ultrason et le motif de soudure. On fixe les autres conditions expérimentales alors qu'on teste simultanément ces facteurs à deux niveaux de réglage. On produit un échantillon pour chaque combinaison de paramètres et on l'évalue mécaniquement et esthétiquement. Pour les tests mécaniques, on fait des tests de chute, des tests de cisaillement et d'arrachement, pour l'analyse de l'apparence on prend les mêmes échantillons avant de

les tester et on identifie et comptabilise les défauts de soudure. En complément, on analyse la structure et la composition des échantillons avant soudure puis on effectue les mêmes analyses sur des zones soudées. Dans le dernier chapitre, on donne les résultats des tests mécaniques, de l'analyse visuelle et des analyses microscopiques. Grâce à cela on peut relier l'apparence des soudures à leur résistance et aussi mieux saisir pourquoi la soudure prend cette forme et comment limiter la dégradation thermique et mécanique du matériau. On clôt l'étude par une discussion des résultats et une comparaison du projet par rapport aux travaux antérieurs.



# CHAPITRE 1

## PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

### 1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE

L'utilisation de la soudure ultrasonique est déjà répandue dans le secteur de l'emballage (Clark, 2013). Ce milieu concerne le conditionnement de multiples produits, que ce soit dans des sacs en forme de poche, des portions individuelles, où les conditions de soudure sont facilitées par la taille des contenants ainsi que leur composition (Conselvan, 2017). Ce procédé est aussi appliqué pour des sacs plus gros, par exemple pour la restauration ou l'agriculture et pour des films plastiques. Dans ces conditions, le procédé est peu sensible à la contamination, est efficace pour souder des membranes fines, est moins coûteux en énergie et en matériaux, est plus sécuritaire et simple pour les opérateurs en production, améliore la qualité des produits et permet de gagner en productivité (Mediana, 2018). L'utilisation de cette méthode de fermeture garantit de mieux répondre à beaucoup d'enjeux actuels, mais implique de savoir la maîtriser et de trouver les conditions de soudure adéquates à chaque cas d'utilisation.

Dans cette étude on souhaite adapter la démarche des travaux précédents, mais pour des sacs en polypropylène tissé (Chomon, 2006 ; Phyllis LTD, s.d. ; Reyne, 1993). Ces sacs servent à conditionner des aliments en vrac destinés à l'élevage, l'agriculture et l'alimentation humaine. Par conséquent, ils doivent résister à des conditions de conservation et d'utilisation plus difficiles : température variable, taux d'humidité important, salissures, chocs récurrents, moisissures et rongeurs (Coulon, 2008 ; CTAC, s.d. ; Delaunay, 1998). Ces sacs se distinguent des autres produits parce qu'ils sont plus rigides et irréguliers que les films plastiques, ils sont plus remplis donc plus lourds que les poches et ont une longueur à souder plus importante que pour les autres sacs (Mehta, 2018). On a donc de mauvaises conditions

de soudure, des sollicitations mécaniques subies plus importantes et un environnement d'utilisation plus difficile. C'est pourquoi la couture est encore le procédé le plus implanté dans ce domaine, et ce, même si elle représente un obstacle pour les industriels. En effet, la couture demeure la solution technologique la plus satisfaisante pour les entreprises et les clients. La problématique de cette étude est alors d'étudier la pertinence de la soudure US pour remplacer la couture dans cette application. Cela revient à relever des défis comme comprendre l'effet du procédé sur la matière, vérifier son potentiel par rapport au secteur et déterminer comment adapter cette technologie au contexte d'utilisation. On utilise la couture comme référence en termes de résistance mécanique et d'application en production. De plus, on doit comprendre comment les sacs réagissent à la soudure, déterminer comment évaluer les fermetures et en déduire l'intérêt de passer à un autre processus d'assemblage.

## **1.2 TECHNOLOGIE DE SOUDAGE A ULTRASONS DANS L'INDUSTRIE DE L'EMBALLAGE**

La soudure ultrasonique appliquée aux thermoplastiques est un sujet étudié depuis les années 60. Les premiers travaux ont amorcé l'analyse des mécanismes à l'origine de ce phénomène et ont ciblé plusieurs sources de variation des soudures (Daniels, 1965 ; Shoh, 1976). Par la suite, des chercheurs tels que Benatar et Grewell ont approfondi cette démarche. Ils en ont déduit un modèle viscoélastique qui explique comment les ondes provoquent la fusion de la matière à l'interface et quels phénomènes expliquent cela (Benatar, 2015 ; Tolunay *et al.*, 1983). Par ailleurs, d'autres chercheurs ont exploité ces résultats pour modéliser et optimiser ce processus avec des calculs de proche en proche ou en uniformisant les champs de température et de déformation. On trouve notamment des travaux d'optimisation par intelligence artificielle (Mongan *et al.*, 2022), des simulations réalisées grâce à des modèles multi physiques (Levy *et al.*, 2014), ou avec un modèle par éléments finis (Rani *et al.*, 2015). Ces outils de simulation sont pertinents, car ils permettent de tester une multitude de facteurs thermodynamiques et de cas d'étude, que ce soit selon la géométrie de l'assemblage, l'onde transmise ou les matériaux à assembler. Cependant cette démarche a ses limites, car elle implique de connaître en détail les caractéristiques des matériaux modélisés et nécessite de faire des simplifications pour que les simulations puissent

converger (Suresh *et al.*, 2007). De plus ces modèles ne permettent pas de connaître les performances de l'assemblage pour des applications industrielles, où les conditions de soudure sont aléatoires et imparfaites. En effet, une étude théorique ne permet pas d'anticiper les problèmes techniques causés par la mise en position des surfaces à souder, la variabilité des conditions de fusion et de refroidissement ou l'irrégularité des matériaux à joindre. C'est pour cela qu'il faut tester la technologie dans des conditions réelles avant de l'appliquer en production.

Pour toutes ces raisons, de nombreux chercheurs ont effectué des expérimentations pour étudier et caractériser le procédé. Ils permettent de découvrir d'autres caractéristiques du processus sans être bloqués par des phénomènes inconnus ou encore peu compris du procédé à l'heure actuelle. Certains d'entre eux ont centré leur étude sur un seul paramètre de soudure (Tsuji *et al.*, 2004). D'autres ont porté leur attention sur des combinaisons de réglages ainsi que leurs interactions (Shi & Little, 2000). Il existe de plus des études de soudabilité sur diverses structures, qu'il s'agisse de composites (Benatar & Gutowski, 1989), de films plastiques (van Oordt *et al.*, 2014), ou de pièces plus volumineuses (Asokan & Prasanna, 2021). Il apparaît que les méthodes et outils utilisés sont semblables, mais que les résultats varient en fonction de la structure et du matériau soudé (Asokan & Prasanna, 2021). Par ailleurs, d'autres chercheurs ont étudié ce procédé en le comparant à une technologie analogue. Des publications traitent par exemple de la soudure US par rapport à la soudure thermique ou la couture (Bach *et al.*, 2012 ; Nase *et al.*, 2013 ; Seif & Nasr, 2016) au même titre que ce projet de recherche. Cependant, il n'existe pas à notre connaissance de travaux traitant de la soudure US pour fermer des sacs en WPP (polypropylène tissé) à gueule ouverte, mais un ensemble de publications sur des sujets périphériques. Certaines portent déjà sur l'adaptation du procédé à l'ensachage mais pour des poches en film thermoplastique (Zhang *et al.*, 2005), alors que d'autres traitent de la soudure US pour des structures tissées comme l'habillement et la voile (Ghosh & Reddy, 2009 ; Vujanović *et al.*, 2007). Enfin, il existe des travaux complémentaires à propos des propriétés et du comportement du polypropylène (PP). Cela va des variations de cristallisation du polymère en fonction des conditions de fusion et de refroidissement (Gradys *et al.*, 2005), des propriétés du PP lors du

soudage (Chand *et al.*, 2001), des changements de structure cristalline (Crist & Schultz, 2016), jusqu'à l'évolution de ses propriétés physiques (Bhat *et al.*, 2004).

On constate alors qu'il existe des méthodes et outils disponibles pour répondre à la problématique, mais qu'on doit les adapter à l'étude. Puisqu'on manque d'informations à propos de la composition des sacs et du dispositif de soudure, il est plus judicieux de mener une étude expérimentale plutôt que de modéliser le procédé. De plus, on doit définir quels facteurs expérimentaux sont évalués et selon quels critères d'estimation. D'après les travaux précédents, les paramètres principaux seront : la vitesse, la pression, l'énergie de soudure, le motif et la qualité de l'interface à souder (Potente, 1984). De même, la méthode de test dépendra des structures à assembler (Espinoza Ori' as & Renaud, 2004, January) en l'occurrence une membrane composée de bandes étirées et tissées. Enfin, les fermetures peuvent être analysées selon des critères de résistance mécanique (Ageorges & Hou, 2001), des critères esthétiques (Nguyen *et al.*, 2020) et selon les modifications de structure du matériau à échelle microscopique (Martin, 2009).

### **1.3 PROBLEMATIQUE**

D'après ce qu'on a vu précédemment, la soudure ultrasonique est déjà exploitée pour plusieurs applications industrielles. Elle a notamment remplacé des procédés comme la couture ou la soudure thermique pour les industries du textile et de l'emballage (Boles, 2012 ; Nase *et al.*, 2013). Une multitude de travaux montrent en ce sens la pertinence du procédé appliqué pour des plaques, des films ou des textiles fins (Conselvan, 2017 ; Zhang *et al.*, 2005). D'après les ressources disponibles, il n'y a pas d'études sur la soudure US des sacs tissés pour l'agroalimentaire, contrairement aux autres applications étudiées (Ageorges *et al.*, 2001 ; Bach *et al.*, 2012 ; Bhat *et al.*, 2004). La difficulté industrielle et technique du projet explique pourquoi la couture n'a pas été remplacée par la soudure US. On peut penser que l'industrie n'a pas encore implanté ce procédé aux sacs en WPP, car il est complexe à mettre en œuvre et que la couture répond aux besoins de l'application. L'objet du projet est

justement d'explorer l'application du soudage US à ce cas d'étude en cohérence avec le contexte industriel.

Le tableau 1 présente un comparatif de l'application de la soudure avec la couture pour cette utilisation, inspiré de Fischerbein Company (s.d.) et de Vetron (2019). Ces deux processus ne sont pas sensibles aux mêmes facteurs opératoires et ont déjà été étudiés et confrontés par le passé (Boles, 2012 ; Mehta, 2018 ; Seif & Nasr, 2016). La couture est une technologie démocratisée et répandue dans le secteur de l'ensachage. Elle permet de fermer tout type de sac et dans une diversité de situations satisfaisantes : nombre de plis de la fermeture, ouverture facile, fluctuations du taux de remplissage des sacs, besoin d'ajouter une étiquette dans la fermeture. De plus, les couseuses restent performantes même lorsque les conditions opératoires et l'utilisation varient : sac dégradé, bord du sac mal positionné, surface à fermer inclinée, surfaces à joindre contaminées ou salies et sollicitations mécaniques variées (Fischerbein Company, s.d.). La soudure ultrasonique est pertinente, car elle permet de fermer les sacs plus rapidement, avec moins de consommables, moins de pièces d'usures et moins d'étapes de réglage et de maintenance.

Tableau 1 : Comparatif entre les fermetures par couture et par soudure à US pour les sacs WPP à gueule ouverte

<b>Critère de comparaison</b>	<b>Couture</b>	<b>Soudure</b>
Utilisation de la technologie	Très répandue pour fermer des sacs de grandes dimensions et en WPP	Utilisé pour souder des films et des textiles non tissés sur des longueurs réduites
Tolérancement positionnement sac + contamination	Insensible à ces variations du moment que l'aiguille peut transpercer le matériau	Information inconnue
Permet d'ouvrir facilement le sac	Pensé dans la conception du motif de couture. Il suffit de tirer sur une extrémité donnée du fil pour ouvrir le sac	Non car la technologie n'est pas développée pour ce marché
Vitesse de production	Limitée par le mouvement de l'aiguille (environ 0,15 m/s)	Procédé très rapide (environ à 0,3 m/s)
Réglages	Position de l'aiguille, mouvement du mécanisme, alimentation en consommable, réglage du mouvement du sac dans le mécanisme.	Énergie, pression et vitesse de soudage réglés sur l'interface de la machine. Attention aux ajustements et à la rigidité du dispositif acoustique.
Consommables	Fil, cavalier, sac et pièce d'usure (aiguille)	Sac, dans certain cas des pièces d'usure (roue, sonotrode)
Arrêts de production	Fréquents (alimentation en consommables, remplacement de aiguille, casse, réglages)	Pas de consommables à alimenter dans la machine, peu de pièces prévues pour casser dans le mécanisme, besoin de surveiller l'ajustement du dispositif acoustique (figure 3)
Sécurité	Risque de blessure à cause des mécanismes et de l'aiguille	Attention au bruit généré par les ultrasons et le mouvement du dispositif acoustique (peut être audible)
Continuité de la fermeture	Non car le fil perfore le sac, donc les efforts exercés sur le sac sont irréguliers	Continue dans les zones soudées, car la matière n'est pas perforée et que l'interface disparaît
Épaisseurs à transpercer ou souder	Illimitée tant que l'aiguille peut passer dans la matériau	Information inconnue mais en théorie sera plus limitée que la couture

D'après les publications disponibles et les exigences dues au contexte, il y a plusieurs critères d'évaluation pertinents pour évaluer puis optimiser la soudure ultrasonique. Le premier critère relève du contrôle de l'apparence des soudures pour qu'elles restent régulières et conformes aux attentes des clients (CTAC, s.d.). Le deuxième critère d'évaluation revient à tester la résistance mécanique des soudures (Dridi, 2010). Enfin, le troisième critère d'évaluation est l'analyse des soudures à l'échelle microscopique. La dernière analyse est pertinente, car elle donne des éléments d'information pour comprendre et expliquer le comportement mécanique des sacs soudés (Okada *et al.*, 1963).

L'analyse visuelle des fermetures revient à contrôler le premier critère de sélection des clients. Si on veut que la production s'écoule, il faut que les produits soient réguliers et identiques pour correspondre aux attentes des clients. On souhaite pour cela minimiser les défauts de soudure et proposer les meilleurs produits possibles. De façon complémentaire, on veut que chaque sac résiste aux efforts exercés lors de la production, que ce soit par des robots ou des convoyeurs mais aussi lors des manipulations par les personnes (Fischerbein Company, s.d. ; Fournisam, s.d. ; Zhang *et al.*, 2005). Les produits doivent également résister à toutes les conditions de conservation et de stockage possibles : variations de température, forte humidité, moisissures, lumière, terre, empilement et vibrations (Delaunay, 1998). De même, les travaux précédents indiquent que les tests mécaniques effectués sont pertinents s'ils sont représentatifs de ce que le produit va subir dans la réalité. La méthode suivie lors des tests mécaniques doit donc correspondre aux efforts subis lors du cycle de vie du produit (Jolliet *et al.*, 2010) pour que ce soit utile et compréhensible pour l'industrie (Seif & Nasr, 2016). Lorsque possible, elle devra aussi suivre les méthodes d'essai normalisées (ASTM et ISO).

Par ailleurs, on étudie la structure du matériau avant et après soudure. Cela permet d'identifier l'état initial du composite puis d'avoir une représentation plus précise des

soudures. Il est aussi possible de déduire des causes de rupture prématurée dans le plastique (Fayolle, B. 2005), des changements de structure dans le matériau (Crist & Schultz, 2016), l'étendue de la fusion sur l'épaisseur de la matière (Bhat *et al.*, 2004), et enfin l'ampleur de la dégradation thermique dans le plastique (Rodts *et al.*, 2019). Il pourra aussi s'agir des modifications de phase cristalline, une altération du taux de cristallinité ou de la densité ou enfin d'un changement dans la forme des structures lamellaires (Billon & Bouvard, 2015 ; Labrosse, 1995).

Enfin, on considère que le sujet de l'étude se fait à deux échelles d'analyse. D'un côté, on évalue la soudure de façon générale à une échelle macroscopique, alors que de l'autre, on analyse les soudures à échelle microscopique plus réduite. Cette étude en deux temps permet de mesurer les performances de la soudure et par la même occasion d'enrichir notre compréhension du procédé et du matériau utilisé.

#### **1.4 OBJECTIFS**

D'après les parties précédentes, la soudure ultrasonique se manifeste à plusieurs échelles et est généralement évaluée selon trois méthodes. On mène en conséquence une étude à échelle macroscopique avec des tests mécaniques ainsi qu'une analyse visuelle des soudures, suivi d'une étude structurelle du matériau à échelle microscopique.

La première phase des expérimentations correspond aux tests mécaniques, qui permettent de mesurer la résistance moyenne des fermetures sur des sacs entiers et sur des échantillons ainsi que d'estimer la résistance maximale possible avec la soudure US. Ces tests permettent aussi de mesurer l'impact des facteurs et leurs interactions sur la résistance des soudures. Par la suite, l'analyse visuelle complète les mesures précédentes par une identification des défauts de soudure et une estimation des conditions de soudabilité propices à de bonnes fermetures. Troisièmement, on se place à échelle microscopique pour approfondir encore l'analyse des soudures. On identifie la composition chimique et la structure initiale des échantillons comme les polymères présents, les additifs ajoutés au matériau, l'orientation de la matière et enfin les dimensions des strates du sac. On identifie

aussi leurs propriétés principales, telles que la température de fusion, la compatibilité entre les espèces présentes ou la vulnérabilité à la dégradation. Ces analyses permettent également de caractériser les zones affectées thermiquement et de comprendre en quoi la structure des soudures influe sur leur résistance. Cela permet de dresser un portrait global du procédé et de proposer une bonne méthode pour utiliser cette technologie.

Dans la partie qui suit, on précise les termes et phénomènes relatifs au projet selon ces deux échelles d'évaluation. On voit d'une part le fonctionnement des soudeuses ultrasoniques et d'autre part la structure et les propriétés des sacs en polypropylène tissé. Les précisions apportées seront l'occasion d'expliquer quels facteurs expérimentaux seront testés lors de l'étude, de décrire comment on génère une soudure grâce à ce type de machine et en quoi cela modifie les propriétés et la structure du matériau.



## **CHAPITRE 2**

### **REVUE DE LITTÉRATURE**

#### **2.1 PLAN DE RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE**

Le sujet s'articule entre deux disciplines à approfondir, l'une axée sur l'utilisation des ultrasons pour la soudure et l'autre sur le comportement thermomécanique des sacs soudés (Régnier & Le Corre, 2016). Comme développé dans le premier chapitre, les phénomènes étudiés se manifestent à deux échelles d'étude différentes (Levy, 2010). D'abord, l'échelle macroscopique qui concerne les problèmes technologiques comme la propagation des vibrations (Benatar, 2015), les tolérances géométriques (Cosme, 2013) ou les mesures de résistance mécanique des sacs (Monot *et al.*, 2021). Il y a également des phénomènes à considérer à une échelle réduite pour quantifier les effets de la soudure à l'interface, la qualité de la fermeture et les changements de structure dans le matériau (Duval, 2004). On travaille à l'échelle microscopique pour considérer les soudures avec plus de précision (Vite, 2009).

La présente revue de littérature permet de balayer les deux composantes du projet selon plusieurs échelles d'analyse. On y présente d'abord le fonctionnement d'un dispositif de soudure ultrasonique, comment il permet de souder deux surfaces et enfin quels sont les facteurs de soudure dont il faudra tenir compte par la suite. Dans un second temps, on approfondit les caractéristiques structurelles des sacs soudés. Cela concerne le tissage et le laminage du polypropylène, mais aussi ses caractéristiques en tant que thermoplastique semi-cristallin. Enfin, on voit brièvement comment les variations de température et d'efforts mécaniques lors du soudage influent sur la structure du polypropylène et par extension sur sa résistance et son apparence.

## **2.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN DISPOSITIF DE SOUDURE A ULTRASONS (ETUDE A ECHELLE MACROSCOPIQUE)**

On voit tout d'abord la structure et le fonctionnement d'une soudeuse à ultrasons pour en déduire les facteurs opératoires fondamentaux à tester. Cela concerne principalement les phénomènes à l'échelle macroscopique et les observations à échelle humaine.

### **2.2.1 Fonctionnement d'un dispositif de soudure à ultrasons**

#### **2.2.1.1 Enjeux généraux d'un processus de soudure appliqué à des thermoplastiques**

On considère qu'un assemblage est réalisé par soudure lorsque l'adhésion entre les pièces a lieu directement à partir des matériaux de base sans forcément fournir de matière supplémentaire à l'assemblage (Institut de Soudure (IA) Association, 2020 ; Yousefpour *et al.*, 2004). C'est une question d'équilibre entre un apport d'énergie suffisant pour que les surfaces adhèrent les unes aux autres et entre le contrôle de la dégradation du matériau dans la zone soudée à cause de l'oxydation et de l'apparition de cavités ou de la génération de contraintes résiduelles au niveau de la fermeture. Un bon procédé de soudure permet d'atteindre l'interface à souder avec le maximum de précision et sans provoquer une dégradation excessive du matériau ou un changement de température trop extrême (Vasile, 2000). Il est possible d'arriver à ces résultats de trois façons différentes (pour les matériaux non métalliques) : par apport direct de chaleur, par rayonnement électromagnétique ou enfin par la propagation d'une onde mécanique (Joly, 2005 ; Reyne, 2001).

La première option est problématique, car elle ne permet pas un échauffement direct à l'interface en assurant simultanément une pression de soudure sur l'assemblage, deux conditions nécessaires expliquées dans la partie suivante. On compare les solutions par onde électromagnétique puis par onde mécanique par la suite (Joly, 2005). Un rayonnement électromagnétique comme un laser ou un faisceau d'électrons présente de nombreux avantages, car il est plus précis et énergétique sans imposer les contraintes d'un système mécanique en mouvement et directement en contact avec la matière. Cependant, l'utilisation

d'un laser est plus complexe, dangereuse et coûteuse qu'un système mécanique (Humbe *et al.*, 2014 ; Katayama (Ed.), 2013). Ainsi, l'emploi d'une onde mécanique est plus avantageux qu'un rayonnement électromagnétique, car les installations nécessaires sont plus sommaires et moins coûteuses, les vibrations se propagent plus lentement dans la matière et enfin peuvent pénétrer dans les matériaux opaques. C'est pour ces raisons que la soudure à ultrasons est privilégiée par rapport à la solution de la soudure par laser ou autre onde possible. Il faut néanmoins différencier la soudure par friction et la soudure par ultrasons, qui n'ont pas les mêmes effets sur la matière (Yilbas & Sahin, 2014). Puisqu'on veut souder des éléments fins, on considère uniquement la soudure par ultrasons à cause des contraintes industrielles et dimensionnelles du sujet d'étude (Joly, 2005 ; Levy, 2010 ; Reyne, 2001).

#### 2.2.1.2 Caractéristiques spécifiques de la soudure par ultrasons

La maîtrise des ultrasons est répandue depuis environ un siècle, mais ce n'est que depuis quarante ans environ que cette technologie est vraiment industrialisée. Les ondes générées se situent dans une gamme de fréquences entre 20 kHz et 100 MHz, entre le domaine de l'audible et des hypersons. Comme dans la figure 1, cela permet de déformer cycliquement les pièces à assembler et de dissiper thermiquement l'énergie à l'interface entre les deux pièces, d'après Grewell & Benatar (2007) et Jongbloed *et al.* (2022). Ce phénomène a l'avantage de concentrer l'échauffement vers la zone à assembler et de limiter la propagation inutile de chaleur.

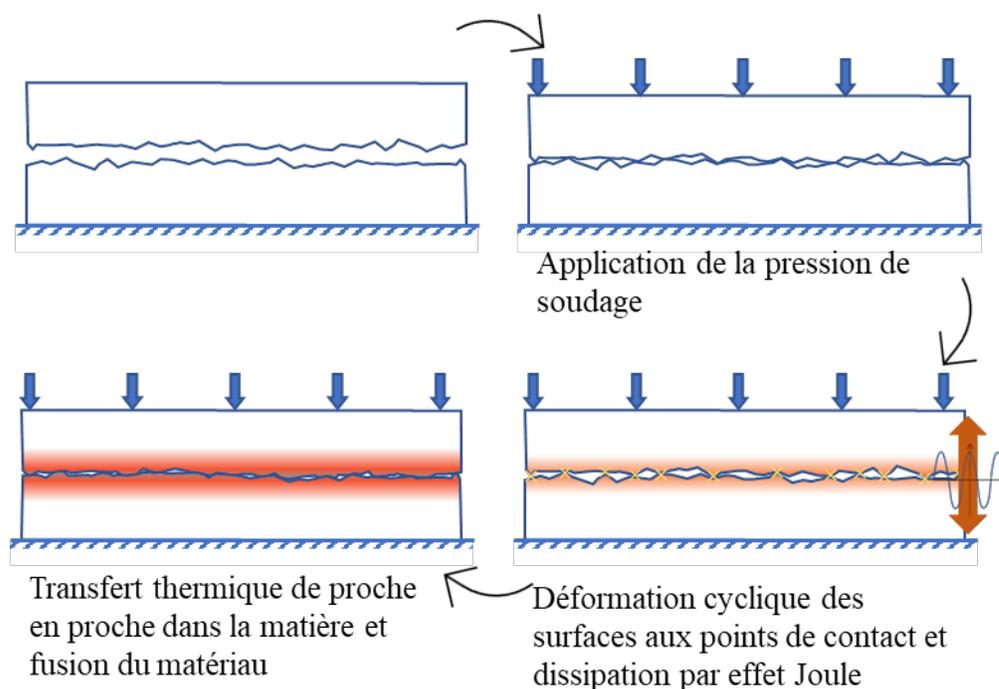


Figure 1 : Principe de fonctionnement de la soudure par ultrasons appliquée à un thermoplastique

De manière générale, une soudeuse est composée de quatre parties principales représentées dans la figure 2, inspirée de Herrmann Ultrasonics (2017). D'abord le générateur haute fréquence convertit le courant électrique fourni en une vibration ultrasonique transmise au reste de la machine. L'amplitude de cette onde longitudinale est amplifiée par le « booster » puis transmise à la sonotrode. Cette dernière partie est en contact avec l'assemblage à réaliser et conduit l'onde dans la matière. D'un autre côté, l'enclume assure le maintien en position de l'assemblage et assure la pression de soudage (Cosme, 2013). En théorie, l'ensemble mécanique formé par ces composants constitue un ensemble acoustique conçu pour fonctionner à sa propre fréquence de résonance (David & Cheeke, 2017).

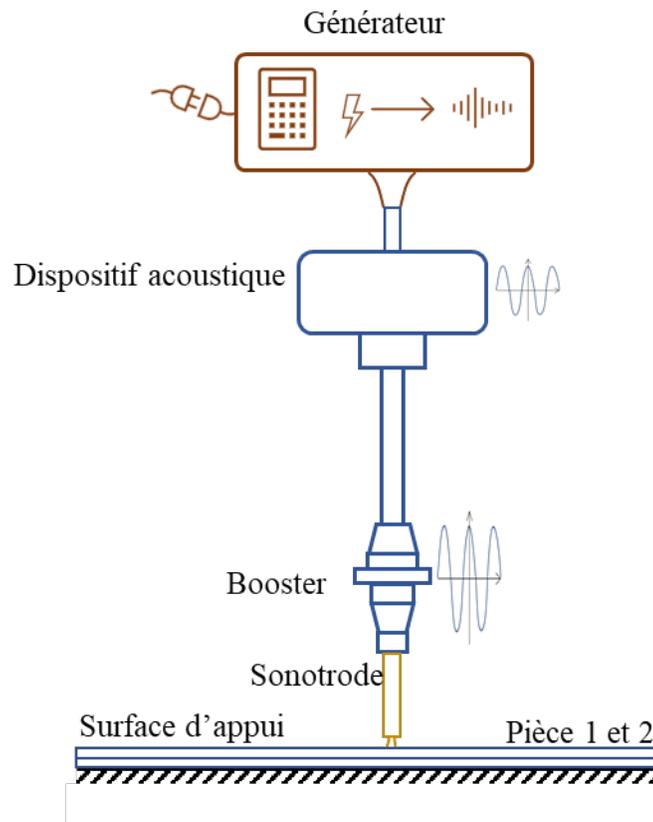


Figure 2 : Structure et fonctionnement d'un dispositif de soudure par ultrasons

Il est alors possible de transmettre de l'énergie pour souder les matériaux sans avoir besoin de gérer frontalement une élévation de température et avec un équipement de taille raisonnable. Cependant, la structure de la machine doit se limiter à une fréquence de fonctionnement qui doit convenir à l'ensemble acoustique (Kuttruff, 2012).

## 2.2.2 Paramètres et réglages du dispositif

### 2.2.2.1 Configurations possibles

Il existe une multitude de configurations possibles, qu'on traduit par une diversité de mouvements entre la sonotrode et l'enclume et qui dépendent des conditions de soudure recherchées (Emerson Industrial Automation – Branson, 2013 ; Vetron, 2019). La figure 3 est inspirée de Jongbloed *et al.* (2020) et présente les cas les plus répandus tels que le soudage

par point en (a) ou la soudure continue. La sonotrode ou l'enclume peuvent translater sur les zones à assembler comme dans les schémas (b) et (d). Ils peuvent aussi être mis en rotation pour entraîner les pièces à souder dans le mécanisme. Ils tournent à vitesse différente pour atteindre la même vitesse linéaire en fonction de leur diamètre, et cela selon un axe de rotation parallèle ou perpendiculaire comme schématisé en (c) et (e).

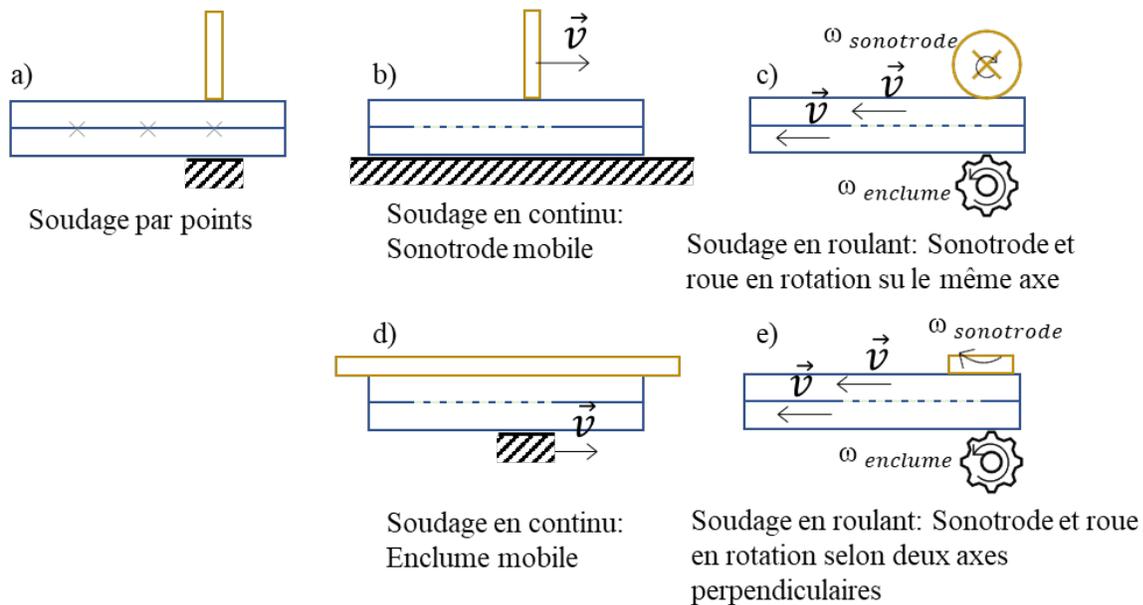


Figure 3 : Exemples d'applications possibles du scellage par ultrasons

#### 2.2.2.2 Maîtrise des paramètres opératoires

Les informations à connaître pour paramétrer une phase de soudure doivent permettre de quantifier l'énergie fournie à la matière, les contraintes mécaniques générées sur la zone de contact et la forme de la soudure. Premièrement, une représentation théorique du procédé permet d'avoir une meilleure idée des paramètres de soudure et de leur lien avec la fusion du plastique. On verra par la suite qu'on retrouve ces facteurs parmi les réglages de la soudeuse utilisée lors des tests. En termes thermodynamiques, on assimile le procédé à un échauffement adiabatique volumique associé au comportement visco élastique d'un polymère. Les formules suivantes modélisent analytiquement ce phénomène et permettent de

relier les facteurs et l'élévation de température entre eux. Ici, on se limite à une représentation unidimensionnelle avec des propriétés maintenues constantes par rapport au temps et à la température (Tolunay *et al.*, 1983).

Équation 1 : échauffement adiabatique volumique du plastique en 1D

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{Q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

Équation 2 et 3 : dissipation thermique associée au comportement visco élastique du polymère

$$T(\tau) = T_0 + \int_0^{-\tau} \frac{\omega^2 \varepsilon_0^2 \mu}{2} dt \quad (2)$$

$$\dot{Q} = \frac{\omega^2 \varepsilon_0^2 \mu}{2} \quad (3)$$

Avec les membres suivants:  $\dot{Q}$ : flux thermique par unité de volume ( $W/m^3$ ),  $T_0$ : Température initiale à l'interface (K),  $k$ : conductivité thermique du matériau ( $W/mK$ ),  $T$ : Température du matériau (K),  $\rho$ : Masse volumique du matériau ( $kg/m^3$ ),  $C_p$ : Capacité thermique massique du matériau ( $J/K.kg$ ),  $\tau$ : constante de temps, période de la vibration (s),  $x$ : paramètre spatial (m),  $\omega$ : pulsation de l'onde (rad/s),  $\varepsilon_0$ : amplitude de la déformation unitaire (m/m),  $\mu$ : viscosité dynamique du polymère (kg/ms)

Deuxièmement, l'énergie de soudure est limitée par la conception du dispositif de soudure. Déjà la fréquence et l'amplitude de la vibration sont interdépendants parce qu'ils sont reliés à la puissance d'alimentation de la machine. La fréquence et amplitude doivent être en équilibre par rapport à la puissance nominale du générateur hautes fréquences. Utiliser une onde à 35 kHz abaissera l'amplitude maximum de l'onde par rapport à une fréquence à 20 kHz (Tsujino *et al.*, 2004). Cependant, il est possible de moduler l'amplitude de l'onde en modifiant le dispositif acoustique soit au niveau de la sonotrode soit par rapport au booster si c'est possible (Benatar & Gutowski, 1989 ; Emerson Industrial Automation – Branson, 2013). En effet, ces modifications peuvent amplifier la résonance du dispositif acoustique ou la propagation de la vibration jusqu'à l'assemblage. Il faut que les surfaces à joindre soient situées là où l'amplitude est maximale pour que l'onde se propage dans le matériau sans endommager le dispositif acoustique. En plus de cela, la surface de contact et le temps de

soudage ont aussi un impact sur la transmission de l'énergie de soudure et par extension la qualité de soudure. En effet, la pression, la forme, l'état et la trajectoire de la sonotrode vont assurer une transmission plus ou moins qualitative de l'onde (Bhudolia *et al.*, 2020). Une grande surface de contact implique une soudure plus volumineuse et donc moins d'énergie transmise par unité de surface. De même, réduire le temps de contact avec la matière limite l'énergie totale fournie à l'assemblage. Il est donc nécessaire de considérer l'ensemble de ces facteurs opératoires pour contrôler le procédé et assurer au mieux une soudure de qualité.

Troisièmement, il est fondamental de prendre en compte les effets des ultrasons au niveau de la machine, en surface et à l'interne. Pour cela, il faut surveiller la rigidité de l'assemblage, les mobilités internes et les ajustements pour contrôler l'usure du système, la propagation de l'onde et les risques d'échauffements involontaires (Bhatia, 1985). De même, la position et l'état de la sonotrode sont déterminants pour assurer le bon déroulement du procédé (Amza & Drimer, 1976 ; Nguyen *et al.*, 2017). Cela peut causer une usure prématurée de la pièce, un risque de glissement, un mauvais contact et amplifier la surchauffe de la zone de contact (Cosme, 2013).

Pour résumer, le phénomène de soudure ultrasonique se module avec les paramètres représentés dans la figure 4 : la fréquence, l'amplitude, la puissance, la pression de soudage, la surface de contact, le temps de soudage et le matériau à souder, inspiré de Emerson Industrial Automation – Branson (2013) et de Herrmann Ultrasonics (2019). Régler le dispositif revient à maintenir un équilibre entre ces facteurs pour apporter de l'énergie à l'assemblage sans solliciter à outrance l'installation utilisée. En complément, il faut prendre en compte la réaction du matériau vis-à-vis de ces sollicitations mécaniques et de cet apport d'énergie (Combette & Ernoult, 2005). Ainsi, nous aurons une vision globale du problème et une démarche de résolution complète.

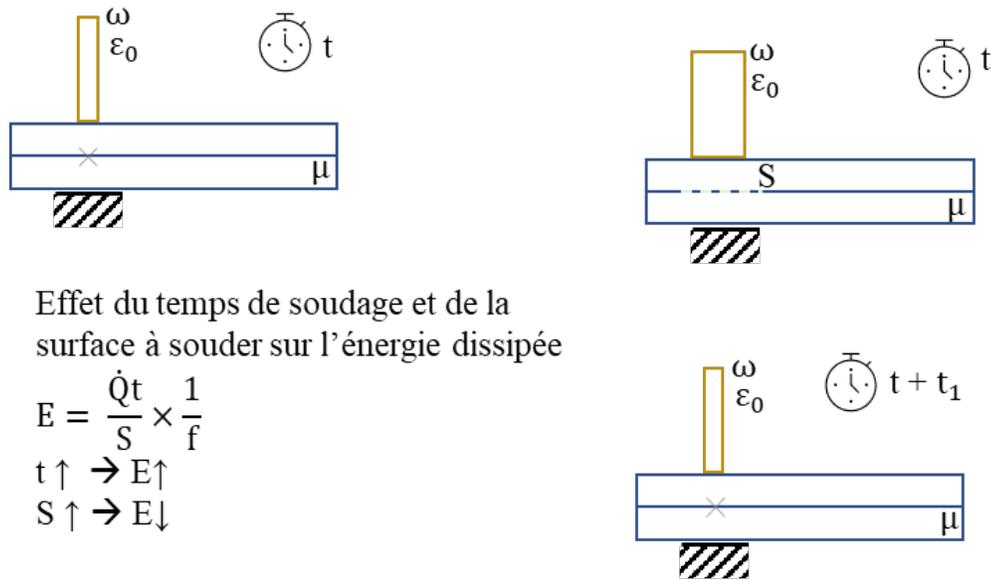


Figure 4 : Réglages et facteurs du dispositif de soudure

### 2.3 COMPOSITION, STRUCTURE ET COMPORTEMENT DES SACS EN POLYPROPYLENE TISSÉ (ÉTUDE À ÉCHELLE MICROSCOPIQUE)

Cette partie de la revue de littérature traite de la structure des sacs en polypropylène tissé, mais aussi des caractéristiques structurelles et thermodynamiques de ses composants. C'est un sujet présenté à l'échelle microscopique qui permet une évaluation plus détaillée de l'efficacité du procédé et de la réaction de la matière à ce processus industriel. En effet, le PP est un plastique bien spécifique dont les propriétés dépendent de sa mise en forme, qui conditionnent les paramètres de soudure à privilégier. L'objectif ici est de décrire le procédé à l'échelle intermoléculaire, de caractériser les matériaux présents avant soudure pour enfin en décrire la structure après la fusion et le refroidissement de la matière.

#### 2.3.1 Structure des sacs

Dans un premier temps, on présente la structure macroscopique du sac utilisé une fois qu'il est replacé dans le contexte de l'étude. Il existe une diversité de sacs qu'on différencie en fonction de leur composition, de leurs dimensions et de leur forme. Dans cette étude, on

se concentre sur les sacs à gueule ouverte de grandes dimensions, qui se distinguent des sacs à valve ou des sacs en tube comme on peut le voir sur la figure 5, inspirée de Knack Packaging (s.d.), Lc Packaging (2017), MRB International (s.d.), et de Ritesh Dua (s.d.). Ce type de sac est ouvert sur toute la largeur et possède des goussets sur les côtés. Une soudure sur ce type d'emballage sera alors plus longue et réalisée sur un nombre d'épaisseurs variables contrairement aux petits sacs, aux sacs tubes ou aux sacs à valve (Conselvan, 2017 ; Mediana, 2018 ; Mehta, 2018). De façon générale, ces membranes peuvent être formées d'une ou plusieurs couches de film plastique, aluminium ou papier ainsi qu'en plastique tissé.

Dans le cadre de ce projet de recherche, on se limite aux sacs en polypropylène tissé, une structure complexe anisotrope composée de deux nappes de fibres parallèles entremêlées successivement (Bueno, 2015). Ces deux nappes sont schématisées dans la figure 6, inspirée de Akkerman (2005). Elles sont respectivement nommées la chaîne et la trame, et cet ensemble tissé est appelé l'armure. Pour obtenir ces bandes de polymère on étire le matériau par extrusion et laminage selon une direction d'étirage (Caramaro, 2005 ; LyondellBasell Industries, s.d. ; Silagy, 2005). Les ressources accessibles chez les fabricants de sacs permettent de connaître également l'orientation du tissage par rapport aux sacs. À notre connaissance, la plupart des sacs en WPP produits sont des toiles dont la chaîne et la trame sont respectivement parallèles à la longueur et à la largeur du sac (Alcock *et al.*, 2007 ; MRB International, s.d. ; Ritesh Dua, s.d.). Il existe deux types de sacs : le sac en polypropylène tissé ou WPP (Woven Polypropylene) qui n'est pas laminé et le sac de polypropylène à orientation biaxiale ou BOPP (Bioriented Polypropylene) (Durling, 2009 ; Karthik, s.d. ; Knack Packaging, (s.d.) ; Lc Packaging, (2017) ; MRB International, s.d. ; Qenos Pty Ltd, s.d. ; Ritesh Dua, s.d.). La figure 7 s'inspire de Blayo (2007) et de Liu *et al.* (2021) et illustre les différences entre le sac WPP et BOPP principalement par rapport à l'impression des sacs. Lors de l'étude, on utilise des sacs BOPP, constitués de bandes tissées dont le matériau est orienté selon la direction d'étirage ainsi qu'un revêtement stratifié orienté selon deux directions d'étirage. Puisque le plastique est étiré et mis en forme à partir de l'état fondu alors sa structure dépend du sens de mise en forme, ce qui lui confère des propriétés anisotropes (Alcock *et al.*, 2007 ; Dridi, 2010).

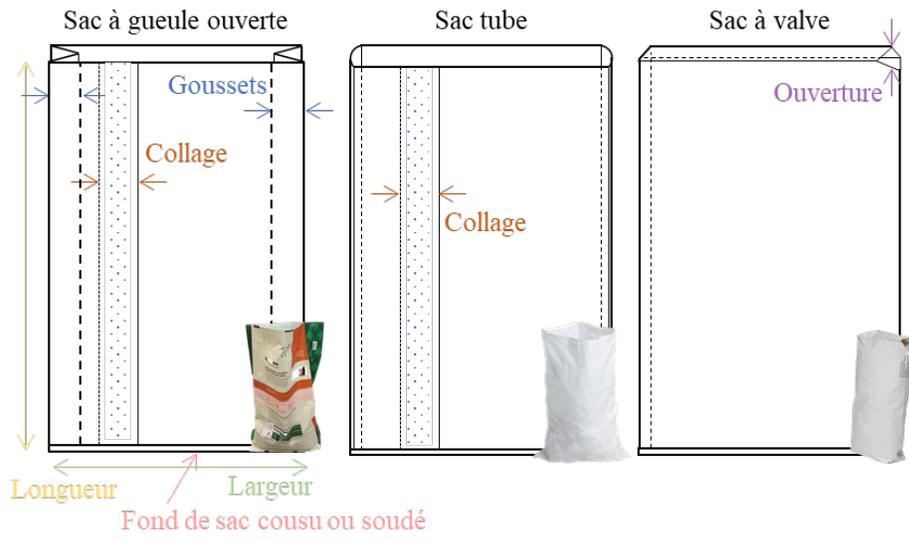


Figure 5 : Schéma des principaux types de sacs

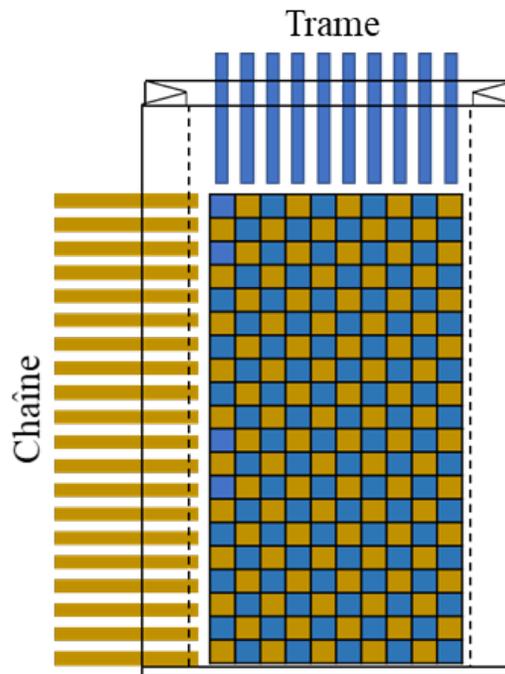


Figure 6 : Structure et direction du tissage par rapport aux dimensions du sac

Sac en polypropylène tissé (WPP) avec ou sans motifs imprimés sur l'extérieur



Sac en polypropylène tissé avec un laminage Bi orienté (BOPP)

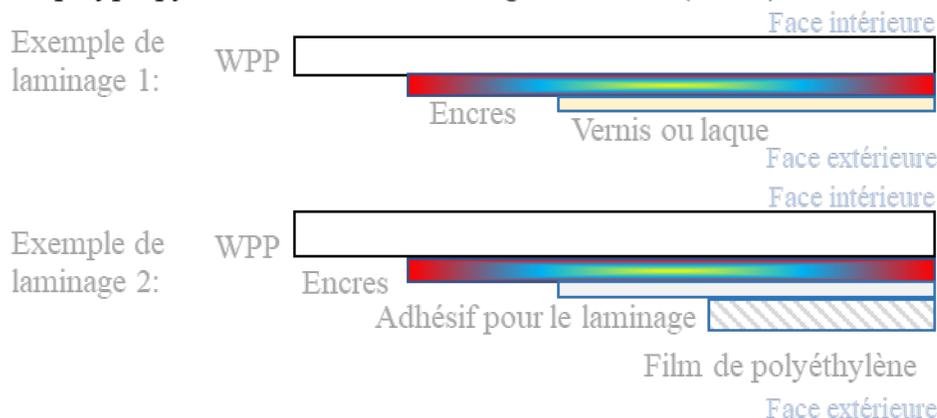


Figure 7 : Différence entre les sacs WPP et BOPP et exemples de laminages extérieurs.

De plus, on peut observer divers défauts de production dans la structure des sacs que ce soit au niveau de la géométrie, des impressions ou du tissage. Les principales différences à signaler sont la linéarité du motif par rapport aux dimensions du sac, la densité des défauts sur la surface et la largeur des bandes tissées. Ces défauts sont représentés dans la figure 8 qui s'inspire de Bueno (2015), Dridi (2010) et de Sharma & Alagh (2021). En plus, le matériau tissé peut subir des traitements thermiques, mécaniques ou chimiques dans le but de modifier ses caractéristiques physico-chimiques. Ces traitements peuvent avoir pour but de limiter les moisissures, le transfert de plastique dans la marchandise et surtout faciliter l'impression et l'enrobage des surfaces. La plupart du temps, ils modifient leur porosité en surface, leur réactivité chimique aux acides et solvants, leur structure cristalline, mais aussi les phénomènes de vieillissement, comme résumé dans la figure 9 selon Durling (2009) et Qenos Pty Ltd (s.d.). Puisque la soudure ultrasonique se base sur la friction à l'interface et la

compatibilité chimique des matériaux présents, ces traitements peuvent indirectement influencer sur la qualité de la fermeture. Pour cette raison, il faut en tenir compte par la suite. L'ensemble est donc constitué de multiples couches aux propriétés et fonctions différentes comme un vernis, des couches d'encre, le tissu en polypropylène, un film de polyéthylène, un revêtement en résine, un adhésif ou une couche protectrice en surface illustré dans la figure 7 (Durling, 2009 ; Reyne, 1998).

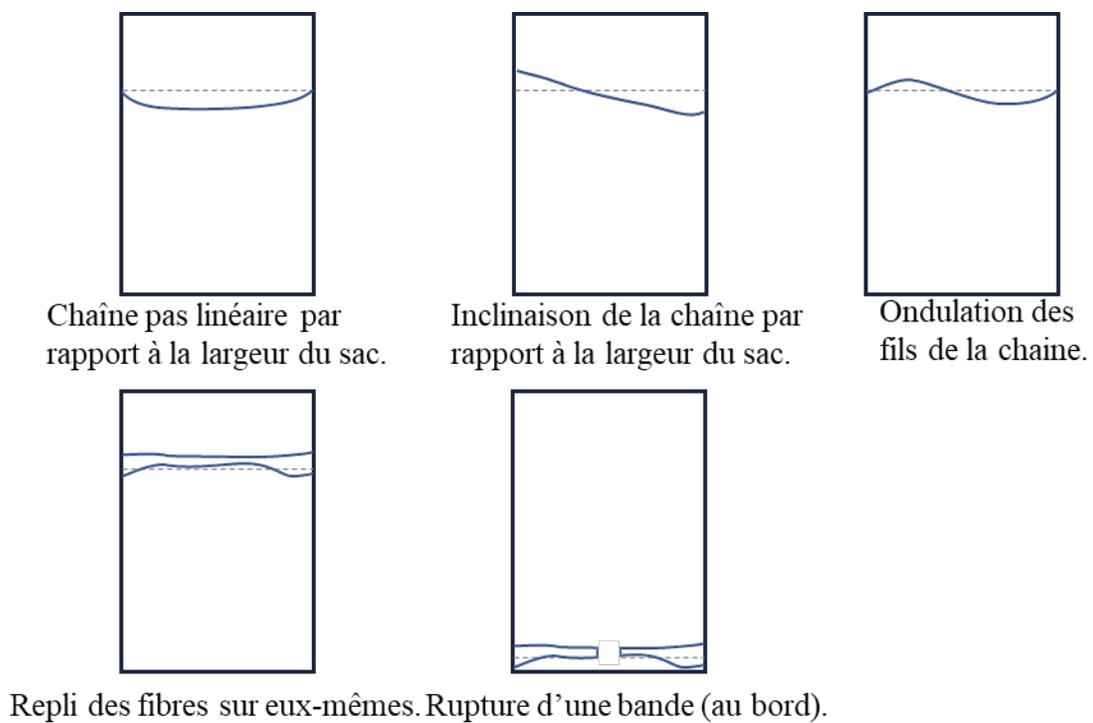


Figure 8 : Défauts de tissage possible sur un sac en WPP

Traitement électrique:

Améliore l'adhésion en surface

Traitement au plasma: presque le même effet que avec un courant électrique, et peut provoquer des réactions chimiques avec le gaz ionisé

Traitement à la flamme: pour éliminer les impuretés en surface

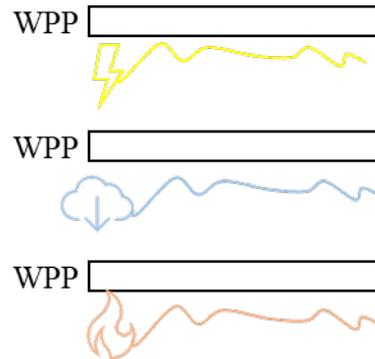
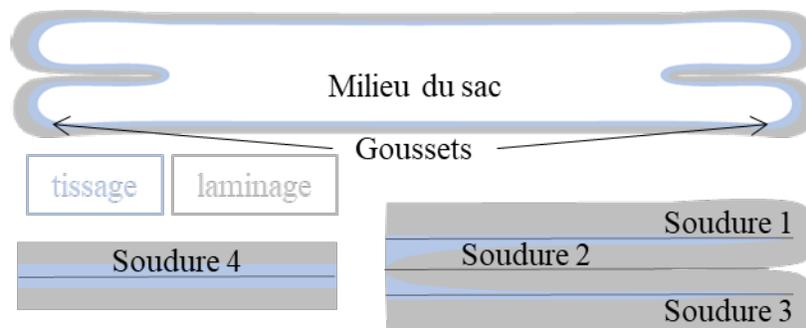


Figure 9 : Traitements appliqués au polypropylène.

Dans le projet, on se place dans le cas de figure le plus complexe qu'on peut avoir, car l'étude consiste à souder un matériau anisotrope selon son épaisseur et sa largeur, dont la structure est stratifiée à partir de matériaux tissés et traités en surface. Cette hétérogénéité dans le matériau influencera la propagation des ultrasons dans le matériau, le transfert de chaleur, la soudabilité et la solidité de la fermeture. De plus, il faut souder plusieurs épaisseurs en même temps et dont le nombre varie si on se place au milieu du sac ou sur les goussets comme illustré dans la figure 10, qui est inspirée de Riedl (2013) et de Wolf (2010).



Une soudure au milieu du sac se fait entre deux épaisseurs à souder avec un contact dans la zone tissée (soudure 4). Les goussets sont soudés à trois endroits, entre le laminage vers l'extérieur (soudure 1 et 3) et le tissage pour la soudure centrale (soudure 2).

Figure 10: Structure macroscopique des sacs

En plus de cela, le polyéthylène et le polypropylène sont deux matériaux thermoplastiques, connus pour avoir une structure composite biphasée et directionnelle dont la mise en forme et l'orientation ont un impact plus ou moins grand sur leur soudabilité. Par la suite, on va décrire la structure du polypropylène avant soudure et anticiper son évolution sous l'effet des US. Il faut successivement cerner les phénomènes physiques à l'origine de la soudure, comment cela va se répercuter sur le PP et enfin comment l'analyser par la suite.

### **2.3.2 Spécificités des sacs à échelle microscopique**

#### **2.3.2.1 Phénomènes fondamentaux à maîtriser**

On commence par considérer le phénomène de soudure à grande échelle pour relier l'effet de la machine de soudure par ultrasons au comportement de la matière. De fait, pour permettre de souder deux pièces entre elles il faut parvenir à un contact intime complet entre les deux surfaces à relier comme dans la figure 11 d'après Levy (2010). Le contact intime est la proportion de surface où les deux pièces sont en contact total l'une et l'autre qui assure l'échange de matière entre les deux corps (Mohamed & Washburn, 1975). C'est pourquoi l'application d'une pression de soudage sur l'assemblage et pour toute la durée de la soudure est fondamentale et doit être contrôlée. En effet, cela assure la diffusion de la matière entre les deux surfaces et une homogénéisation sur la majorité de la fermeture et permet au phénomène d'interdiffusion moléculaire puis de cicatrisation de se dérouler (Levy, 2010 ; Régnier & Le Corre, 2016). L'interdiffusion désigne l'homogénéisation de la structure moléculaire entre deux volumes à partir de la surface de contact. Si le contact intime n'est pas assez grand alors les molécules ne vont pas diffuser sur l'ensemble de la fermeture et il y aura des cavités et des irrégularités par endroits. La figure 12 schématise la cicatrisation d'après Levy (2010), qui est bien réalisée lorsque l'interface initiale a complètement disparu et que les deux corps à joindre n'en forment plus qu'un (Jongbloed *et al.*, 2018 ; Levy, 2010 ; Villegas, 2019).

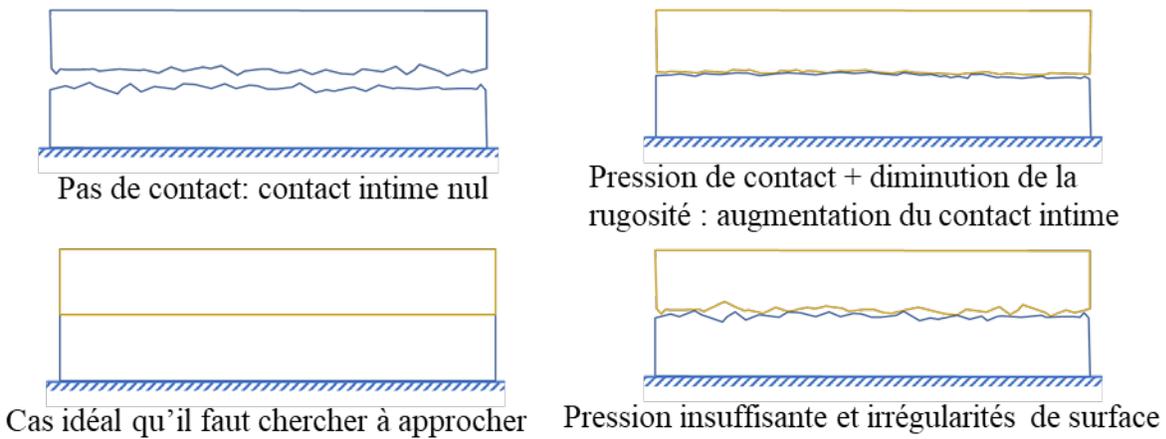


Figure 11: Notion de contact intime

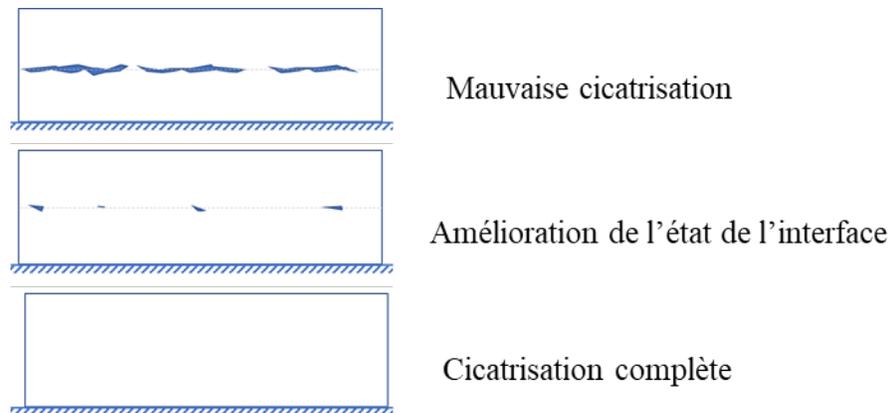


Figure 12: Notion de cicatrisation

La soudure étudiée à échelle microscopique désigne donc un transfert de molécules d'une surface vers une autre une fois que la matière est passée d'un état vitreux à caoutchoutique, voire fluide, puisqu'il se refroidit et se réorganise pour retrouver à nouveau un état statique et stable (Pierlot, 2011). Lorsque l'on fait subir des sollicitations mécaniques et thermiques à un polymère, alors on altère son organisation interne, sa résistance mécanique et son vieillissement.

### 2.3.2.2 Caractérisation générale d'un polymère et des polypropylènes

Pour se rendre compte de l'effet de la soudure sur la structure microscopique des polymères, on doit les considérer à différentes échelles d'étude. Si on parle d'un polymère semi-cristallin, alors il s'agira d'un matériau constitué d'amas de matière eux-mêmes formés de successions de phases amorphes et cristallines. Ces deux phases ont leur propre structure interne et leurs effets sur le comportement macroscopique de la matière. Il est capital d'établir un équilibre entre elles pour optimiser les propriétés du matériau, car la phase amorphe permet une bonne soudabilité du matériau et une certaine élasticité tandis que la phase cristalline apporte plus de rigidité et de résistance au plastique. Si on considère une zone amorphe, les molécules y sont imbriquées de façon complexe, ce qui bloque les mouvements moléculaires responsables des changements de conformation. On génère une soudure lorsque ces pelotes statistiques se démêlent et que les molécules peuvent bouger entre elles et se mélanger de proche en proche jusqu'à l'interface et au-delà. Au contraire, les zones cristallines sont organisées selon la répétition d'une conformation plus stable et ordonnée sous la forme de mailles cristallines. Cette phase assure la résistance mécanique du matériau et l'anisotropie de ses caractéristiques en fonction de l'orientation de ces lamelles (Duval, 2004 ; Pierlot, 2011 ; Régnier & Le Corre, 2016 ; Vite, 2009). Il y a plusieurs conformations macromoléculaires possibles ainsi que plusieurs motifs cristallins existants et on les rencontre en fonction des conditions de mise en forme du matériau en termes de sollicitations mécaniques et de cycle thermique.

Il faut distinguer d'abord le type de matériau rencontré, s'il s'agit d'un polymère, d'un copolymère ou d'un compound. Un polymère est composé d'une succession d'unités identiques alors qu'un copolymère est un assemblage de monomères de différents types (Duval, 2004). La figure 13 s'inspire de Martin (2009) pour la schématisation des chaînes de polymères à partir des monomères. Les composés polymères (compounds) eux sont des mélanges de matériaux plus complexes qu'on ne développe pas dans l'étude. Cet assemblage peut être linéaire, ou ramifié en fonction du polymère et de sa conformation. Ici, il est question d'un homopolymère composé uniquement de molécules de polypropylène et d'une

part d'additifs et d'impuretés. Le polypropylène fait partie de la famille des polyoléfines, la plus importante famille de matières plastiques utilisée dans l'industrie. On y retrouve aussi le polyéthylène, un autre polymère utilisé entre autres pour le laminage de sacs et dont les caractéristiques physico chimiques sont similaires, mais différentes (Fiscus *et al.*, 2017). Plus précisément, une polyoléfine est un polymère aliphatique issu de la polymérisation d'une oléfine. On dit qu'un corps chimique est aliphatique lorsqu'il s'agit d'une chaîne carbonée linéaire ou ramifiée ouverte (Combette & Ernoult, 2005).

En effet, la macromolécule de polypropylène est composée d'un enchaînement linéaire plus ou moins régulier de molécules de propylène, son monomère constitutif (Duval, 2004) représenté dans la figure 14 d'après Fiscus (2017). Puisque le polypropylène est une molécule linéaire et mobile alors elle peut se conformer et équilibrer ses charges locales d'une multitude de façons. En effet, la chaîne peut être caractérisée selon la répartition spatiale du groupe méthyle et la régularité de cet ordonnancement. Globalement, on peut avoir les molécules dans le même plan pour un polypropylène isotactique, ou alternativement de part et d'autre du plan des carbones si le polypropylène est syndiotactique (Olabisi & Adewale, 2016). De plus on peut avoir les groupes méthyles alternativement du même côté puis au hasard si le polymère est hémiisotactique et enfin une molécule sans périodicité si le polymère est atactique (Vite, 2009), comme représenté dans la figure 15 d'après Olabisi & Adewale (2016).

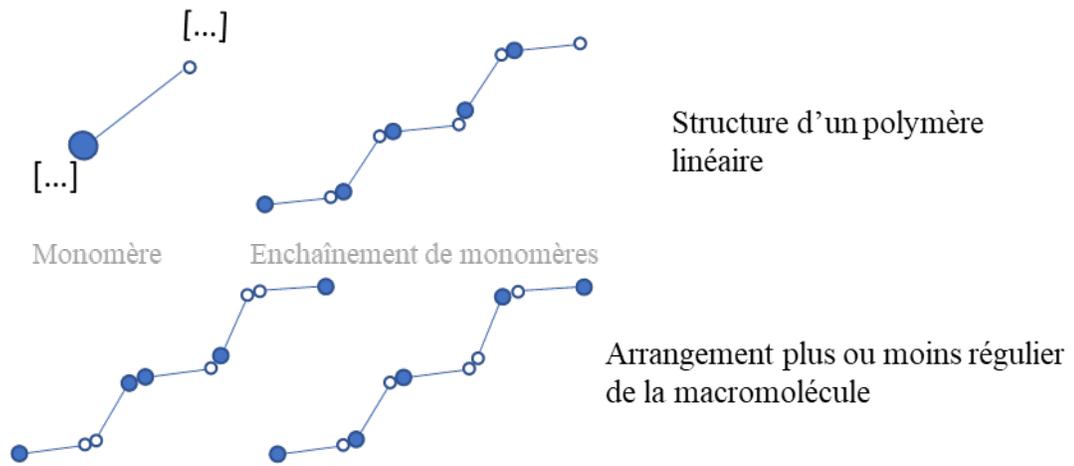


Figure 13 : Notions de pétrochimie

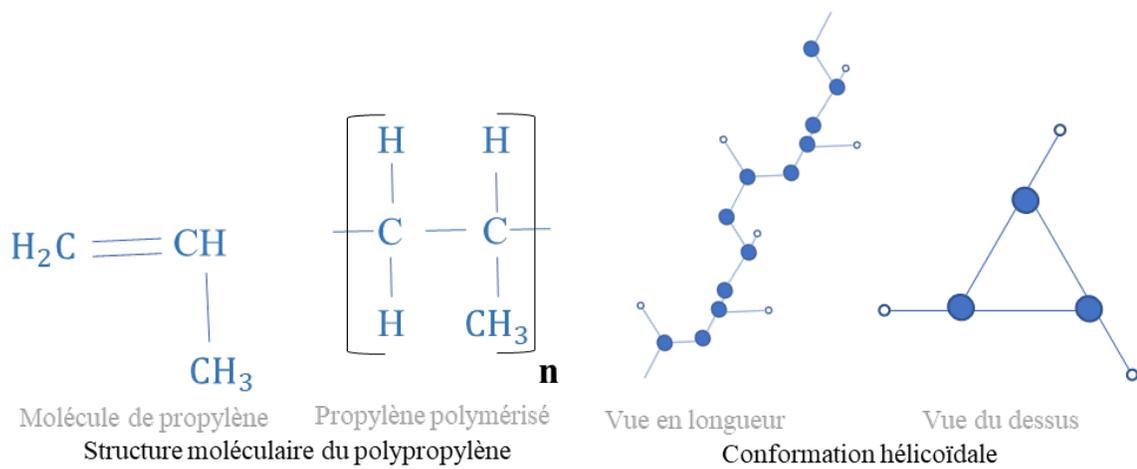


Figure 14: Caractéristiques des chaînes de polypropylène

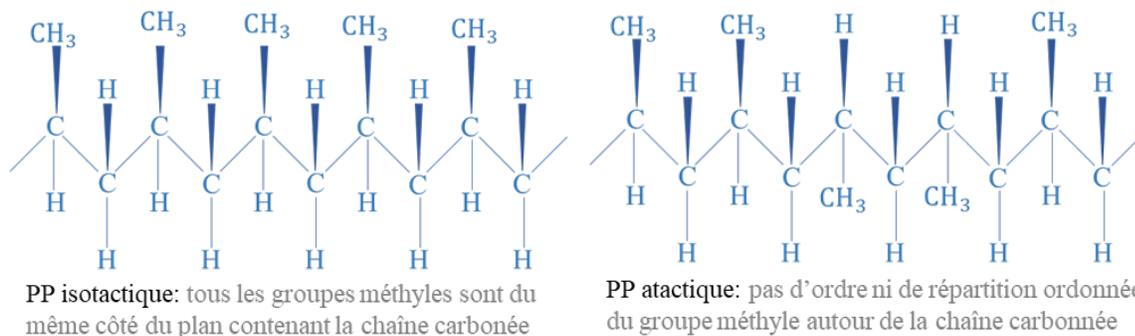


Figure 15 : Exemples de tacticités du polypropylène

On se situe dans une zone amorphe lorsque les molécules ont un enchaînement et des conformations irréguliers, faisant qu'elles sont plus instables et mobiles entre elles. La zone cristalline au contraire, est constituée de chaînes régulières et organisées entre elles pour former un motif cristallin. Il existe plusieurs mailles cristallines possibles aux propriétés différentes. La plus répandue est la maille  $\alpha$ , qu'on caractérise par sa température de fusion entre 160 °C et 175 °C, une compacité élevée à 0,94, une structure lamellaire, en feuillets avec une alternance d'hélices droite et gauche et qui est la structure prédominante pour un polymère cristallisé à partir de l'état fondu. La maille  $\beta$  hexagonale elle est moins stable que la phase  $\alpha$ , avec une température de fusion entre 145°C et 160°C, une forte vitesse de croissance des entités cristallines, mais peut être majoritaire. La maille  $\gamma$  triclinique elle est plus rare que les autres, elle a une compacité de 0,954 supérieure à celle de  $\alpha$ , une température de fusion entre 150°C et 160°C qui se forme sous très forte pression et à de faibles vitesses de refroidissement. Enfin, la structure mésomorphe est particulièrement instable et smectique, de densité de 0,91, qui se forme pour de fortes pressions et lors d'un refroidissement rapide du polymère (Le Neindre & Cancouët, 2009 ; Vite, 2009). Les trois principales mailles cristallines du PP sont schématisées dans la figure 16, inspirée de Vite (2009) et de Le Neindre & Cancouët (2009).

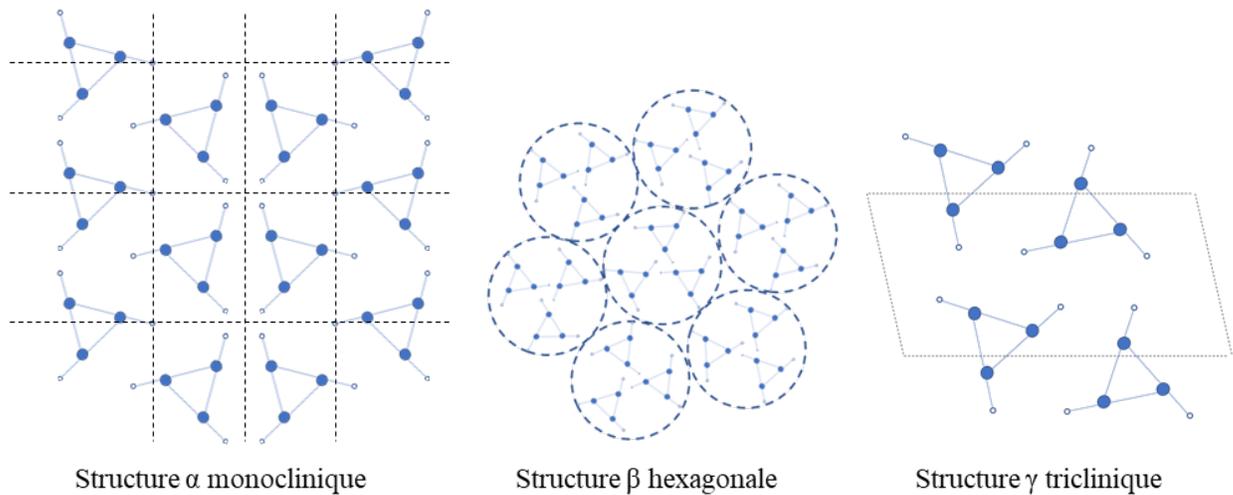


Figure 16 : Structures cristallines du PP

À plus grande échelle, les zones cristallines et amorphes peuvent s'organiser d'une multitude de façons la plupart du temps sous forme d'une alternance de régions amorphes et cristallines pour former des structures lamellaires. Il y a tout d'abord le modèle lamellaire à chaînes repliées constitué d'un empilement de lamelles séparées par des zones amorphes et reliées entre elles par des molécules de liaison. Les zones amorphes sont constituées de molécules de liaison, de l'extrémité des chaînes et de l'enchevêtrement de chaînes indépendantes et il s'agit d'une cristallisation isotherme à haute température et sans sollicitations mécaniques. Ensuite, le modèle lamellaire à chaînes étendues se caractérise par l'alternance de ces lamelles parallèles et de zones amorphes et qui se forment lors de la sollicitation d'échantillons à de fortes déformations. Enfin, il y a le modèle lamellaire à micelles à franges où les cristallites sont décrites comme des faisceaux de chaînes parallèles qui participent à plusieurs cristallites distinctes et aux phases amorphes intermédiaires. On crée cette phase lorsque le polypropylène cristallise sous haute pression et basse température ou après étirage à l'état solide. La figure 17 schématise des trois structures cristallines selon Schultz (1984). Il est possible d'observer uniquement un de ces modèles ou dans certains cas ils peuvent coexister (Combette & Ernoult, 2005) (Figure 17).

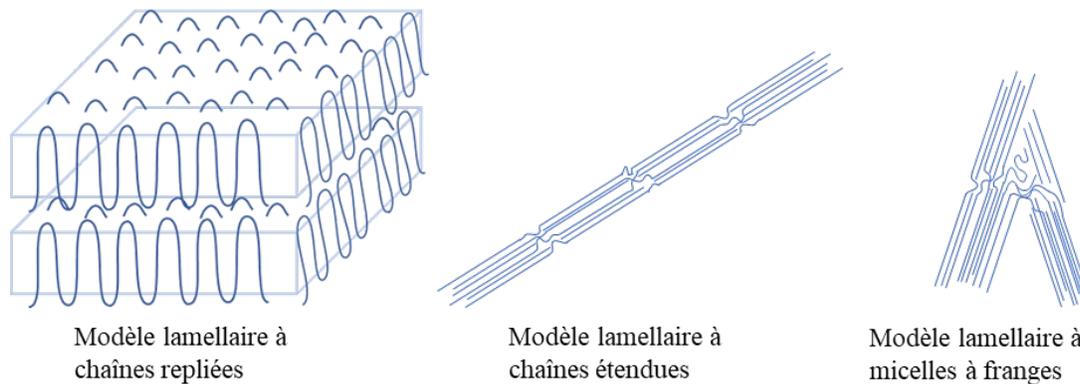


Figure 17 : Modèles lamellaires du PP

Lors du refroidissement et de la cristallisation, il est possible d'avoir plusieurs structures à plus grandes échelles constituées de ces modèles lamellaires qu'on appelle des sphérolites. Ces superstructures cristallines peuvent se former en fonction des conditions extérieures et de la gestion de la germination et du type de cristallisation. La germination désigne l'amorce de la cristallisation qui peut être provoquée à partir de germes ou d'autogermes présents dans le polymère ou à cause de corps étrangers en contact avec le matériau comme des charges, des fibres ou les parois d'un moule. S'il s'agit de cristalliser un matériau sans sollicitation extérieure ni grandes variations du milieu, alors le sphérolite sera sphérique et les lamelles seront orientées radicalement par rapport à un germe central et séparées par de la phase amorphe. Cependant, la forme des superstructures est sensible à l'environnement extérieur et à ses variations, surtout en ce qui concerne la température et les contraintes mécaniques exercées sur le matériau. L'application d'un cisaillement lors de la cristallisation peut générer d'autres structures comme des ellipsoïdes, des gerbes ou des cylindrites. De même, un grand gradient de température impliquera que les cristaux vont s'incurver pour devenir parallèles au gradient thermique et la formation de phases métastables ou smectiques. Enfin, la présence d'une surface étrangère de cristallisation fera que les cristaux se développent dans une direction parallèle à elle et favorisera la condition de transcristallinité, soit l'apparition de plusieurs formes cristallines (Vite, 2009). Plusieurs exemples de sphérolites sont donnés en figure 18, inspirée de LyondellBasell Industries (s.d.). Finalement, avoir une conformation et une structure particulière confère aux éléments

en polypropylène des propriétés spécifiques. C'est en partie pour cette raison qu'il a une gamme d'application étendue, mais qu'il est complexe à contrôler.

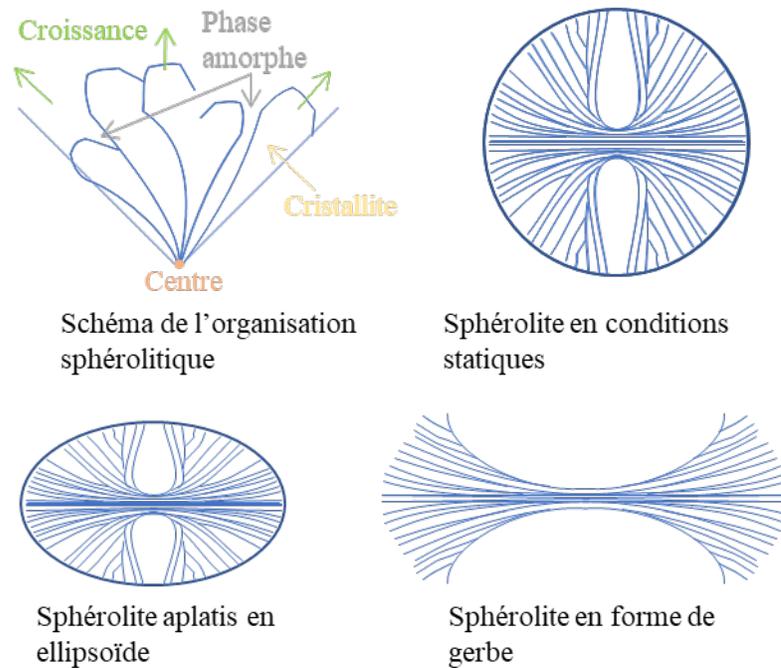


Figure 18 : Exemples de sphérolites du PP

### 2.3.2.3 Relation entre la structure du polypropylène et ses propriétés

Comme on a pu le voir précédemment, le polypropylène peut être formé selon une multitude de conformations, qui influencent la soudabilité du matériau. Cela implique d'adapter les conditions de soudure en fonction de la structure cristalline présente, mais aussi de contrôler la structure créée à la suite de la fusion et du refroidissement.

L'organisation des chaînes carbonées conditionne la résistance mécanique du polymère. Cela dépend de la géométrie et de l'orientation des lamelles cristallines, en plus des inclusions et dislocations. Si on sollicite les lamelles en traction dans une direction perpendiculaire à l'orientation des cristaux alors le matériau cédera plus rapidement que si la sollicitation était orientée dans le sens des lamelles. De plus, la présence d'inclusion dans le

matériau et de dislocations retarde le phénomène de glissement entre les lamelles. Il faut donc bien orienter le matériau pour optimiser sa durée de vie (Lemaitre, 2020 ; Martin, 2009).

D'un autre côté, la structure d'un polymère semi-cristallin se résume à ce que les chaînes carbonées se conforment et selon un état énergétique plus ou moins stable. Ainsi, chaque conformation a un certain stade de stabilité qui dépend de la maille cristalline présente, de la taille des lamelles et de la zone amorphe. Si on souhaite faire fondre un matériau semi-cristallin, alors il faut apporter à cette structure moléculaire une certaine quantité d'énergie pour modifier son organisation. La structure initiale du matériau définit donc le cycle thermique à suivre pour le souder correctement. Même si on arrive à sa température de fusion, un refroidissement excessif couplé à des contraintes mécaniques perturbe la réorganisation de la matière, donc le matériau se dégrade.

Puisque la soudure ultrasonique provoque un échauffement localisé suivi d'un refroidissement et d'une recristallisation brutale, cela perturbe fortement l'organisation moléculaire des chaînes carbonées. On s'attend alors à avoir une structure plus anarchique et un équilibre énergétique perturbé par la brutalité du procédé. On risque de retrouver un plastique dégradé mécaniquement et thermiquement dans la zone affectée thermiquement (ZAT). D'une part, la compression et l'étirement du polypropylène risquent de le rendre irrégulier au point où des cavitations peuvent se créer au sein du matériau (Martin, 2009 ; Pawlak *et al.*, 2014). On a alors une zone soudée mal orientée, poreuse et fragilisée par rapport à sa structure initiale. D'autre part, le cycle thermique est réalisé dans un environnement non contrôlé et riche en oxygène. Lors du refroidissement, le polypropylène est fortement mobile et réactif à l'attractivité locale des atomes d'oxygène présent dans l'air. C'est à cette occasion que la structure du PP est perturbée puisque l'oxygène peut facilement se lier aux chaînes du polymère et donc fragiliser sa structure. Ce phénomène d'oxydation implique un vieillissement prématuré du matériau qui se manifeste par une texture plus dure et plus rigide concentrée dans la zone soudée. On appelle communément cela « l'embrittlement » du plastique (Vasile, 2000).

## **CHAPITRE 3**

### **MATÉRIEL ET MÉTHODE**

#### **3.1 INTRODUCTION**

Dans ce chapitre, on présente la méthode suivie pour évaluer le procédé et les équipements utilisés pour chaque phase des expérimentations. Cela concerne la machine à souder, les sacs utilisés et les dispositifs pour prendre des données. On détermine dans un premier temps les conditions expérimentales, on sélectionne les équipements pour mesurer la résistance des soudures, leur apparence et leurs caractéristiques microscopiques. De plus, on structure un plan d'expérience à suivre pour les différentes phases de test. Enfin, on prévoit une méthode d'analyse et d'exploitation des résultats pour en déduire les performances du procédé.

On réalise aussi plusieurs essais préliminaires pour comprendre le comportement des soudures lors des tests afin d'affiner la stratégie à suivre. Cela concerne le remplissage des sacs, le choix des motifs utilisés et la mise en position des échantillons lors du soudage et des tests. On décrit enfin les manipulations effectuées et les équipements utilisés, les plans d'expérience suivis et la méthode d'exploitation des résultats. Dans le cas des tests mécaniques et de l'analyse visuelle, on cherche à brosser un portrait global des performances du procédé en fonction des conditions de soudures et aussi d'indiquer les meilleurs réglages à choisir. Pour les analyses structurelles des soudures, on cherche à comprendre l'effet du procédé sur la structure et ainsi à estimer plus précisément une corrélation entre les conditions de soudure et la qualité du scellage.

## **3.2 DISPOSITIF DE SOUDAGE**

### **3.2.1 Machine à souder et les paramètres**

Pour des raisons d'accessibilité du matériel et de faisabilité technique, on se limite à une machine manuelle avec des éléments roulants. Cela permet de faire des analogies avec la fermeture par couture et de faciliter la circulation des sacs dans le mécanisme. De plus, le fait de concevoir un dispositif industriel constitue un projet de développement à part entière, donc on néglige les enjeux de conception de la machine pour se focaliser sur les paramètres et les sacs.

On utilise le modèle SeamMaster développé par Sonobond, schématisé dans la figure 19 (Sonobond ultrasonics, 2015) : une soudeuse manuelle qui soude en roulant selon une infinité de motifs. Le système a une fréquence de soudure constante à 20 kHz, une puissance nominale de 1300W et une vitesse maximale de 0,3 m/s, ces caractéristiques sont rassemblées dans le tableau 2. Le dispositif est composé de : un générateur HF, un dispositif acoustique, un support et la possibilité de changer le motif de soudure et l'écart entre la sonotrode et la roue. La position de la sonotrode offre une grande mobilité de mouvement et permet de générer des soudures selon diverses trajectoires. Ainsi, le contact entre la sonotrode, la roue et la matière peut être réduit à un point et c'est pour cette raison qu'il faut être vigilant lorsque le motif de soudure est peu épais. Avec cette conception, la roue risque davantage de glisser ou de dévier ce qui peut fausser les résultats. Au contraire, les roues d'entraînement vont aider à maintenir la vitesse et la trajectoire de soudage une fois que l'échantillon est passé dedans, d'après les photographies du système à la figure 20.

On règle la vitesse de la roue, celle de la sonotrode et la puissance avec trois potentiomètres gradués de 1 à 10 dont on ne connaît pas le fonctionnement en détail. À défaut de pouvoir déterminer l'état des paramètres physiques de la machine, on fait l'hypothèse d'avoir une variation linéaire pour déterminer les réglages réalisés. De plus, le réglage de la puissance de soudage est certes proportionnel à la puissance de l'alimentation, mais aussi

très dépendant de l'ajustement du dispositif acoustique qu'on ne peut pas analyser en détail. De même, la vitesse de circulation des sacs dépend du diamètre de la roue et de la sonotrode donc le réglage fixé reste plutôt incertain. Par ailleurs, l'écartement entre la roue et la sonotrode est réglable avec un vernier situé sur le dessus de la machine. Puisqu'on doit dévisser le système pour changer de motif, on n'a aucune graduation sur le vernier et donc aucun moyen direct de mesurer la valeur de l'écartement. Pour pallier ce manque, on utilise des cales pour vérifier ce réglage lors de l'utilisation du dispositif. Sur la machine, la pression de soudage est indiquée par la pression pneumatique exercée par le compresseur sur la machine. Il est difficile de connaître la pression réelle exercée entre les fibres à souder, parce que la pression de contact dépend également du motif de soudure utilisé, de sa largeur et de sa régularité.

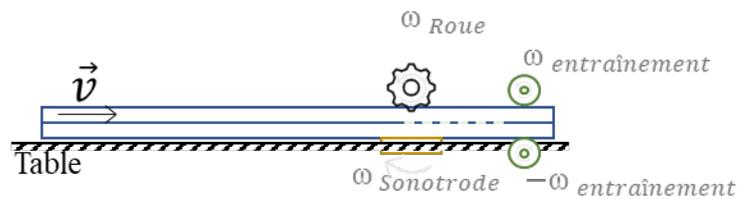


Figure 19 : Principe de fonctionnement de la soudeuse



Figure 20 : Photo de la soudeuse ultrasonique

Tableau 2 : Récapitulatif des paramètres de la machine

Paramètre	Symbole	Influence	Domaine de variation
fréquence	f	Énergie	20 kHz
Amplitude	$\varepsilon_0$	Énergie	Inconnue
Énergie	E	Énergie	0 à 1300 W
Vitesse de déplacement	V	Énergie	0 à 0,3 m/s
Pression	P	Contact intime	0 à 0,62 MPa
Écartement entre l'enclume et la sonotrode	e	Contact intime	0 à 20 mm

### 3.2.2 Roues et motifs de soudure

En ce qui concerne les motifs de soudure, on doit en sélectionner un nombre réduit et se focaliser sur certains aspects de leur design pour cadrer le plan d'expérience. Il existe une infinité de motifs (Vetron, 2019 ; Vujasinović *et al.*, 2007) dont la conception dépend du diamètre de la roue, de l'épaisseur des éléments du motif, de sa continuité, de l'espace entre chaque élément du motif et de la répartition de la pression de soudure sur l'assemblage (Emerson Industrial Automation – Branson, 2013 ; Potente, 1984). De plus, les études précédentes (Nguyen *et al.*, 2020) et des essais exploratoires ont montré qu'un motif contenant une ligne non interrompue comme dans la figure 21, avaient tendance à fragiliser énormément les soudures. En effet, une fermeture formée d'une ligne de soudure favorise la propagation de l'arrachement dans le matériau et une pression variable génère davantage d'amorces de rupture et de concentration de contraintes dans l'assemblage.

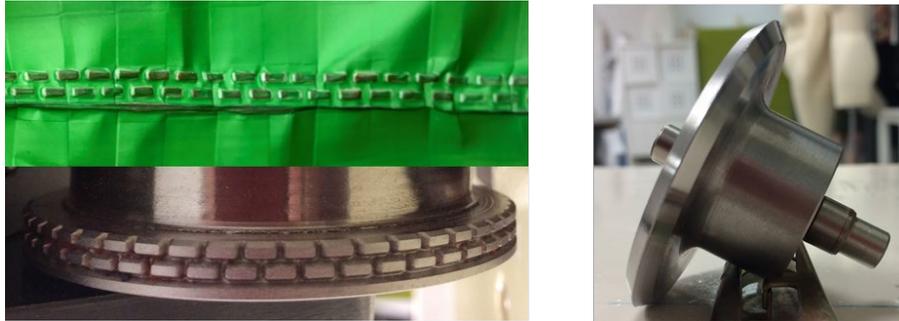


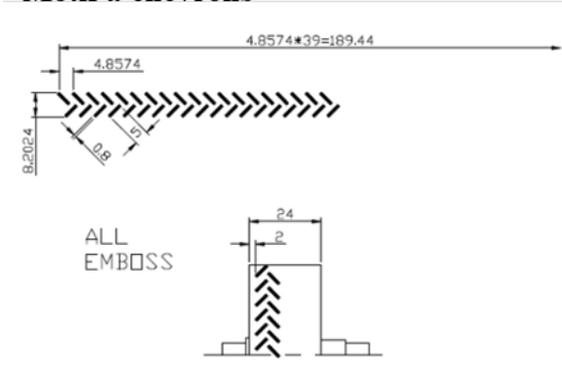
Figure 21 : Autres motifs testés (lors d'essais exploratoires)

On utilise donc la machine avec 3 motifs discontinus visibles dans la figure 22 : des chevrons, des pointillés épais et des pointillés fins. Cela permet de comparer deux motifs différents entre le chevron et le pointillé et aussi la surface de soudure entre les deux pointillés. Évidemment, le reste de la conception est commun entre les trois roues. Dans la figure 23, on voit que le périmètre des roues (qui influe sur la vitesse de rotation de la roue) et l'écartement entre chaque motif (qui influe sur la répartition et la régularité de la pression de soudage) sont constants.

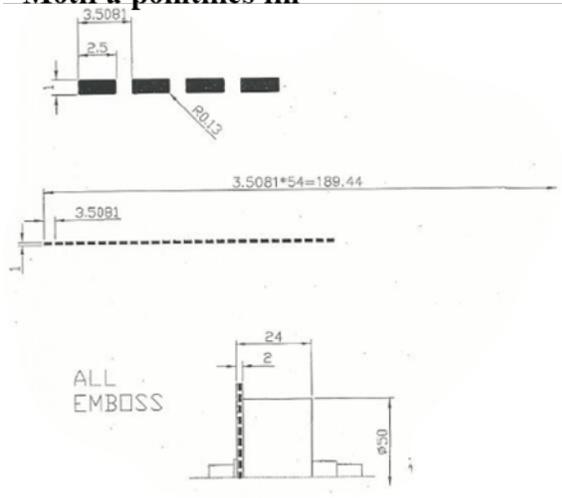


Figure 22 : Photographies des roues et des motifs de soudure

### Motif à chevrons



### Motif à pointillés fin



### Motif à pointillés épais

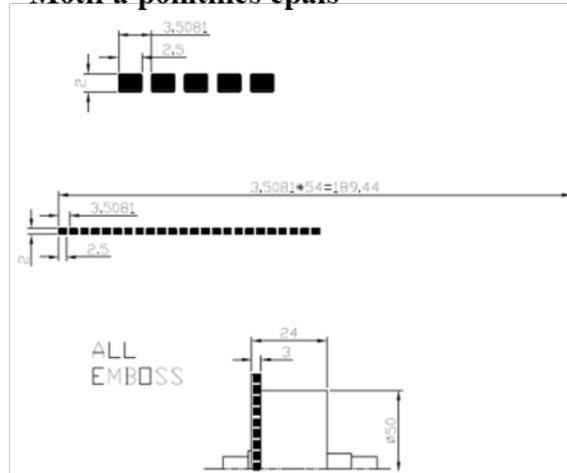


Figure 23 : Caractéristiques des motifs de soudure

Pour la suite, on liste les facteurs opératoires à définir. Cela concerne les réglages de la machine et les conditions opératoires à fixer. On planifie les séries d'expériences à réaliser à partir de cette classification.

### 3.2.3 Paramètres d'application

Les paramètres évalués lors de l'étude concernent uniquement les réglages de la soudeuse US et le design des motifs de soudure. On a les facteurs d'application suivants : une fréquence fixe à 20 kHz, la puissance fournie par l'onde à la matière (nommée Output dans la documentation), l'écartement entre la sonotrode et l'enclume, la pression de soudage, la

forme du motif et la surface de contact entre le dispositif et le matériau. Ces paramètres sont résumés dans le tableau qui suit.

Tableau 3 : Paramètres d'application

Facteur	Symbole	Valeurs
Output	O	Graduation 7 et 10
Écartement	e	0,1 et 0,2 mm
Pression	P	0,2 et 0,4 MPa
Vitesse	V	11 et 7,2 m/min (graduation 4 et 6)
Surface de contact	S	1 mm et 2 mm d'épaisseur du motif
Motif de soudure	Rien	Pointillés et chevrons (voir figure 23)

### 3.3 MODELE DE SAC ET TYPE DE FERMETURE ETUDIES

Le modèle de sac utilisé pour les tests est un BOPP de grandes dimensions, utilisé pour l'alimentation du bétail, avec une faible densité de tissage comme le montre la figure 24, et un laminage en polyéthylène vers l'extérieur. Les caractéristiques du sac sont rassemblées dans le tableau 4.



Figure 24 : Sac utilisé pour les expériences (sacs BOPP)

Tableau 4 : Caractéristiques des échantillons utilisés

Longueur	93 cm
Largeur	40 cm
Gousset	7 cm
Épaisseur	0.2 mm
Densité de tissage	17 x 17 trames (10 x 10 cm)
Texture du laminage	Rendu visuel mat / BOPP

Les sacs seront soudés dans la même configuration pour garantir un effort exercé constant, car la longueur et la direction de la soudure influent sur la répartition de la force exercée et sur l'uniformité du champ de contraintes. De même, le volume de produit et le taux de remplissage du sac seront constants encore une fois pour fixer les conditions expérimentales au moment des tests. On ferme la totalité des sacs testés avec une soudure réalisée sur la largeur du sac et sur un pli comme illustré dans la figure 25. Ils sont remplis avec des granules de bois visibles sur la figure 26 et refermés avec une couseuse manuelle pour accélérer les phases de test et pour se focaliser sur une zone du sac.

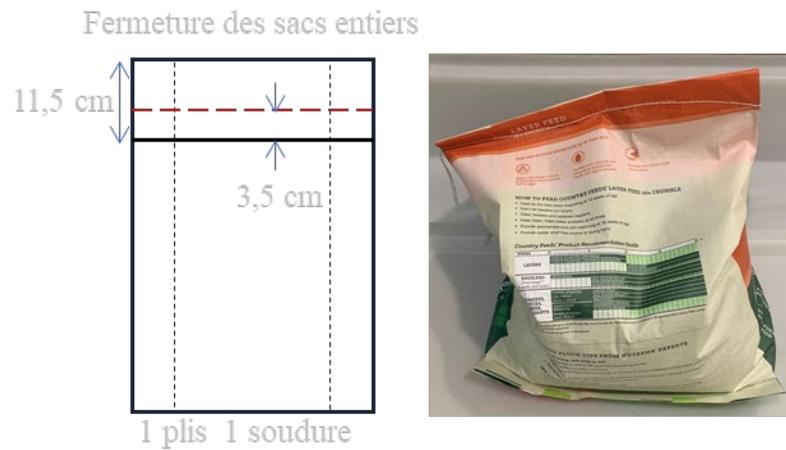


Figure 25 : Forme et position de la soudure pour les sacs

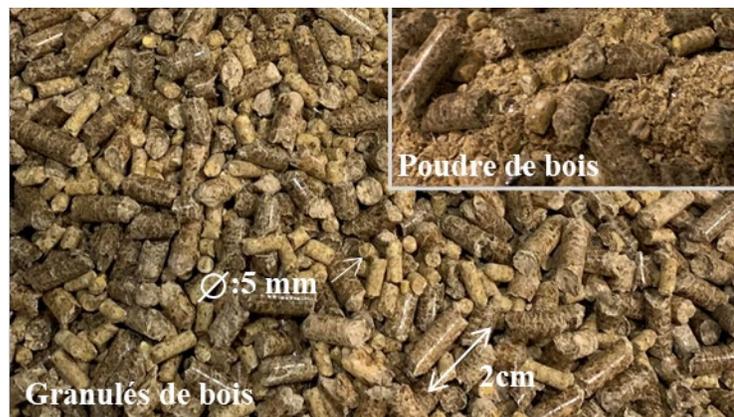


Figure 26 : Caractéristiques du matériau de remplissage

### 3.4 TESTS MECANIQUES

On doit analyser la résistance d'un système mécanique qui ne correspond pas aux normes habituelles de tests à notre connaissance (Labrosse, 1995 ; Lemaitre *et al.*, 2020). D'abord, parce que les soudures sont difficiles à modéliser, car ni leur composition ni leur structure ne sont uniformes. De plus, la soudure est générée sur un matériau déformable, peu élastique et peu épais ce qui complexifie encore la situation. On ne peut donc pas tester les

fermetures d'une façon générique au risque de fausser les résultats ou de négliger des phénomènes importants. On peut se concentrer sur une position et une sollicitation subie par les sacs puis décomposer les efforts exercés pour suivre les phases de rupture des soudures cette fois-ci sur des échantillons soudés. On aura alors une vision globale de ce que les fermetures subissent et un nombre de données plus important à exploiter.

### 3.4.1 Travaux préliminaires

Lors du cycle de vie du produit dans la figure 27 (Jolliet, 2010), les moments critiques pour les sacs et les fermetures arrivent lors du remplissage, du transport, de la palettisation et lorsque le client manipule les produits. Les efforts maximaux exercés arrivent lors de la palettisation si on considère une sollicitation statique et lorsque le produit chute en production ou avec le client s'il est question d'une sollicitation dynamique. On fait l'hypothèse qu'une sollicitation dynamique au choc est plus risquée pour les fermetures des sacs, car irrégulière et de plus grande intensité qu'une charge en compression constante. On choisit alors de se concentrer sur un test dynamique qui est représentatif de manipulations humaines ou d'accidents sur les palettiseurs ou les convoyeurs en production (Lemaitre *et al.*, 2020).

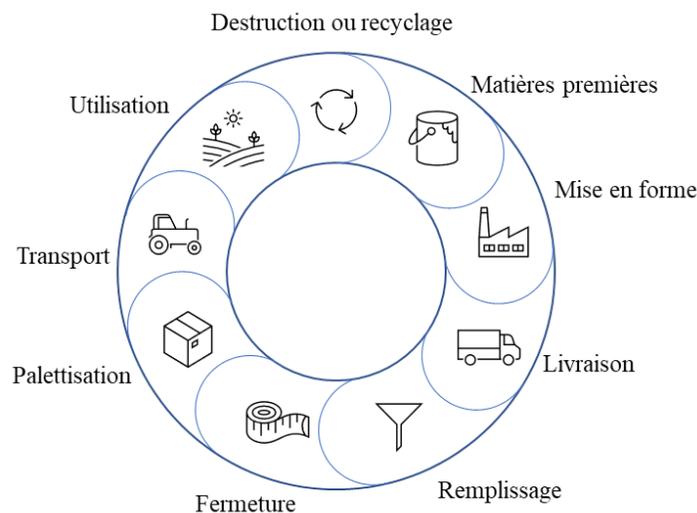


Figure 27 : Cycle de vie des sacs

Avant de procéder aux expérimentations, on a réalisé des essais de soudure et de remplissage dans le cadre d'une étude exploratoire du procédé et des sacs. Cela consistait à souder puis à remplir des sacs afin d'anticiper par la suite comment les fermetures risquent d'évoluer et comment elles sont sollicitées lors du remplissage, du transport, de la palettisation ou d'essais de chute. On a alors pu visualiser les phases de ruptures des fermetures et déterminer comment manipuler les sacs pour évaluer le scellage au mieux. Pour l'étude, on considère une position initiale unique : le sac rempli, cousu en haut et soudé en bas avec une soudure droite sur un pli et contenant une masse de matériau donné comme dans la figure 28. À partir du remplissage, la soudure sera déjà sollicitée en dynamique puis en statique puisque le produit va appuyer entre deux couches de la fermeture à l'intérieur du sac tel que dans la figure 29. Si cette soudure cède alors le produit va se répartir autrement dans le sac et la soudure subira d'autres contraintes comme pour la figure 30. Si le pli n'est plus situé en dessous alors le produit n'écarte plus les parois du sac et applique simplement une tension vers le bas pendant que la soudure est maintenue vers le haut sur un des côtés du sac comme pour la figure 31. Il est aussi possible que du produit aille entre deux extrémités du sac et provoque la rupture d'une autre zone de la soudure, auquel cas on retrouve la même sollicitation que pour la soudure interne (figure 28).



Figure 28 : État initial des sacs

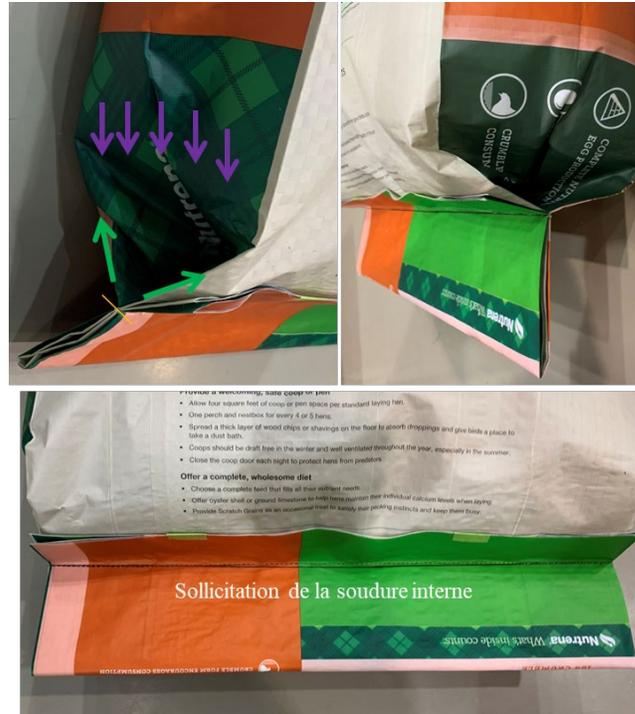


Figure 29 : Sollicitation des soudures internes avant rupture



Figure 30 : Répartition du produit dans le sac après rupture partielle de la soudure interne

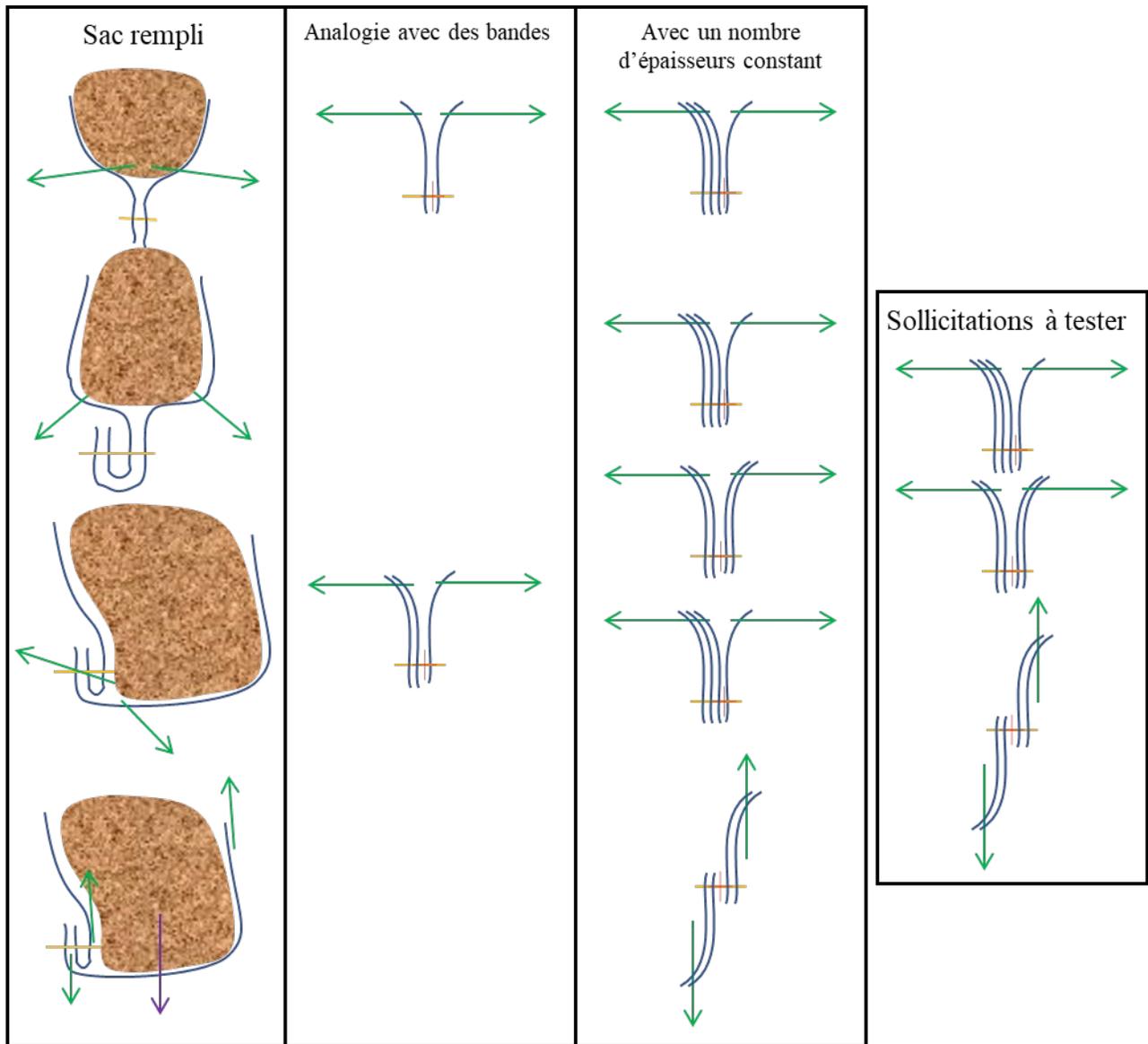


Figure 31 : Position du pli et des goussets après rupture totale de la soudure interne

Pour résumer, la fermeture d'un sac avec un pli et une fermeture droite peut subir deux types de sollicitations lors du remplissage, de la manipulation et en cas de choc. Le produit à l'intérieur du sac peut causer un arrachement de la soudure entre les deux couches où il est situé ou alors il peut tirer sur la soudure si elle est correctement mise en position comme sur la figure 31. Si on se ramène dans des conditions où le nombre d'épaisseurs à souder est

constant et positionné de façon analogue au pli réalisé alors il y a un nombre limité de cas d'études. On peut donc faire des tests de cisaillement et d'arrachement pour répliquer ce qu'il se passe sur les fermetures des sacs, comme le résume le tableau 5.

Tableau 5 : Analogie entre les tests sur sacs et sur bandes de textile



### 3.4.2 Tests de chute

En ce qui concerne les tests sur sacs entiers, on s'est restreint au test le plus représentatif des sollicitations subies lors du cycle de vie du sac (figure 27). On évalue alors les soudures avec un test dynamique au choc. D'après les normes de test existantes, il faut respecter certaines exigences pour que les résultats soient acceptables, résumées dans le tableau 6. On réalise alors les essais de chute selon des conditions expérimentales constantes schématisées dans la figure 32 : hauteur de chute, surface de choc, positionnement masse et volume du sac. (International Organization for Standardization, 1984). Grâce à cela, les conditions expérimentales seront constantes et contrôlées (frottement de l'air, force de l'impact, vitesse de chute) et on pourra analyser visuellement la résistance des soudures (s'il y a une rupture, si elle est étendue, où elle est localisée).

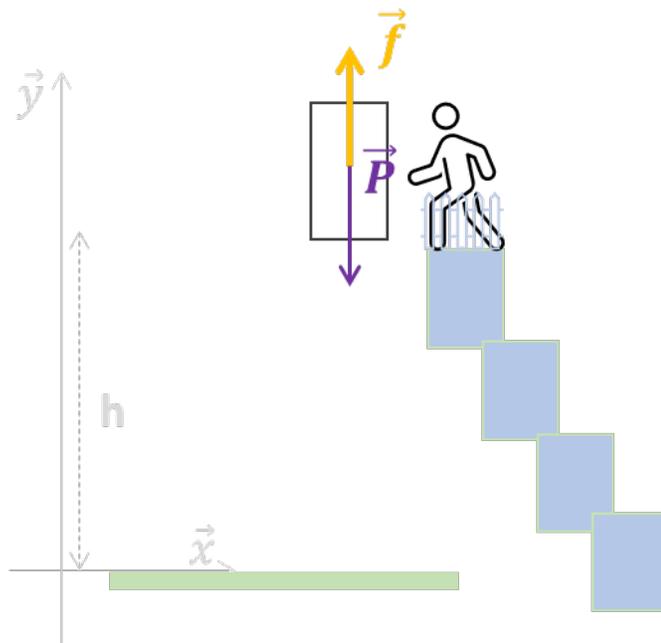


Figure 32 : Schéma de principe du test de chute

Tableau 6 : Exigences pour les tests sur sacs entiers

Contrainte	Explications	Solution
Surface de choc (où le sac chute)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Écart de niveau de la surface (planéité) <math>\leq 2</math> mm</li> <li>Rigidité: déformation <math>\leq 0,1</math> mm lorsque la surface de 100 mm<sup>2</sup> supporte en un point quelconque, une charge statique de 10 kg</li> <li>Dimensions pour que les sacs tombent entièrement à l'intérieur des limites de la surface</li> </ul>	<p>Surface plane Suffisamment rigide Suffisamment étendue pour contenir le sac testé</p>
Hauteur de chute	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\pm 2\%</math> la hauteur de chute préétablie</li> <li>distance séparant le point le plus bas du sac au moment du largage et le point le plus proche de la surface de choc</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>On considère une hauteur de chute constante</li> <li>Pour des raisons de limites matérielles et de sécurité nous serons limités à une hauteur de 2m</li> <li>On fixe la hauteur par rapport à la position du sac avant chute</li> </ul>
Positionnement du sac	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pour les chutes sur toute face, la surface d'impact du sac doit être parallèle à la surface de choc à 2° près</li> </ul>	<p>On fixe la position du sac (autant que possible) pour chaque test de chute: fermeture vers le bas et sac droit</p>
Vitesse de chute	<ul style="list-style-type: none"> <li>La vitesse au moment du choc doit être égale à <math>\pm 1\%</math> à celle qui serait atteinte en chute libre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dépend du volume du sac, de sa masse et de la hauteur de chute. D'après des estimations on ne peut pas atteindre la vitesse de chute libre à moins de réduire fortement la masse des échantillons ou d'augmenter leur masse.</li> <li>On néglige donc cette exigence pour pouvoir garantir la sécurité lors des tests et le parallèle avec le contexte industriel du projet.</li> </ul>

### **3.4.3 Tests d'arrachement et de cisaillement**

#### **3.4.3.1 Machine de test**

On procède de la même manière que les tests de chute. Comme pour le reste, il n'existe pas de normes strictes pour tester ce type de matériau et de fermeture et c'est pour cela qu'on suit les exigences de tests analogues en plus de suivre une méthode appliquée en général en mécanique fondamentale pour structurer ces tests (American Society for Testing and Materials, 2022 ; International Organization for Standardization, 2000 ; International Organization for Standardization, 2005 ; International Organization for Standardization, 2013). Cela revient à suivre les contraintes décrites dans le tableau 7.

Tableau 7 : Exigences pour les tests sur bande

Contrainte	Explications	solution
Mise en position des échantillons	<ul style="list-style-type: none"> <li>Serrage de l'éprouvette sans glissement ni endommagement ;</li> <li>Il faut que l'axe passant par le centre des deux mâchoires soit dans l'alignement du sens de traction;</li> </ul>	Utilisation des systèmes de fixation utilisés dans les machines d'ensachage des sacs à gueule ouverte (mors en caoutchouc strié sur des mâchoires mobiles) Système de serrage manuel réglable par pincement (sans froisser ni arracher l'éprouvette ; a proximité des mâchoires)
Fréquence d'échantillonnage	Au moins 8Hz	Temps d'échantillonnage: $T = 10\text{ms}$ $F = 1/T = 100\text{Hz}$
Vitesse de déplacement	<ul style="list-style-type: none"> <li>20 mm/min, 100mm/min ou 50 mm/min en fonction des normes</li> <li><math>\pm 10\%</math></li> </ul>	20mm/s = 1200 mm/min (pas bien c'est trop rapide)
Longueur d'essais	<ul style="list-style-type: none"> <li>75 mm ou 100 mm ou 200 mm</li> </ul>	100 mm
Position initiale	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sans prétension ;</li> <li>La bande doit être tendue uniformément sur toute sa largeur</li> <li>Longueur initiale: 100 mm au moins</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Écartement des mâchoires = longueur initiale des échantillons</li> <li>La mise en position doit permettre d'avoir la soudure perpendiculaire à la direction de traction et la longueur de l'échantillon parallèle à la direction de la sollicitation</li> </ul>
Largeur des mâchoires	Au moins de la taille des échantillons (au moins 20 fils contenu dans la largeur de l'échantillon)	On se fixe à largeur = $150 \pm 5\text{mm}$ (d'après la densité de tissage des échantillons)
Direction du déplacement	Perpendiculaire à la direction de la soudure et dans la direction de l'effort exercé	On va avoir les fixations parallèles les unes aux autres et perpendiculaires au système de traction
Type de mouvement	Translation rectiligne Les éprouvettes doivent être soumises à des champs uniformes de contraintes ou déformation	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vérin linéaire</li> <li>Alimentation électrique</li> <li>Commandé par ordinateur</li> </ul>
Rigidité de l'ensemble	Grande (il faut assurer un mouvement régulier sans saccade ni écart de trajectoire)	On choisit des liaisons glissières et des ensembles encastrés par des vis pour permettre d'une part la rigidité de l'ensemble et aussi de pouvoir l'ajuster manuellement si nécessaire
Moyen d'appliquer un effort	L'effort doit être: Constant Régulier Peu saccadé Uniforme Commandé en même temps que le déplacement	Vérin électrique
Système de mesure d'effort	Coordonné avec la mesure du déplacement, pour avoir des données numériques exploitables à analyser par ordinateur	Cellule de charge (50 kg max capté)
Mesure d'allongement	Coordonné avec la lecture de l'effort et l'application du déplacement	Directement mesurée d'après le déplacement du vérin et avec un PLC et un ordinateur

On choisit les solutions technologiques citées (tableau 9) afin d'avoir le système schématisé par les figures 33 et 34. On a alors le dispositif en photo dans la figure 35 (International Organization for Standardization, 2003 ; International Organization for Standardization, 2006).



Figure 33 : Organigramme du système de test mécanique

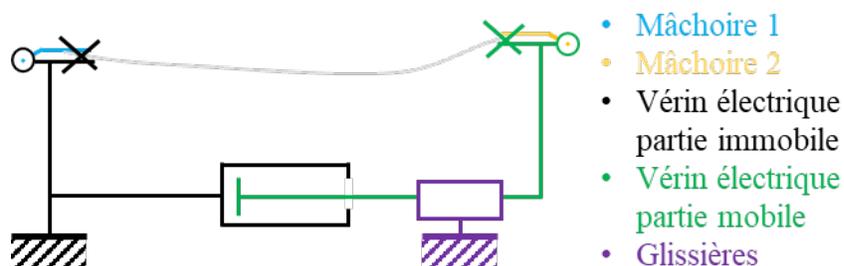
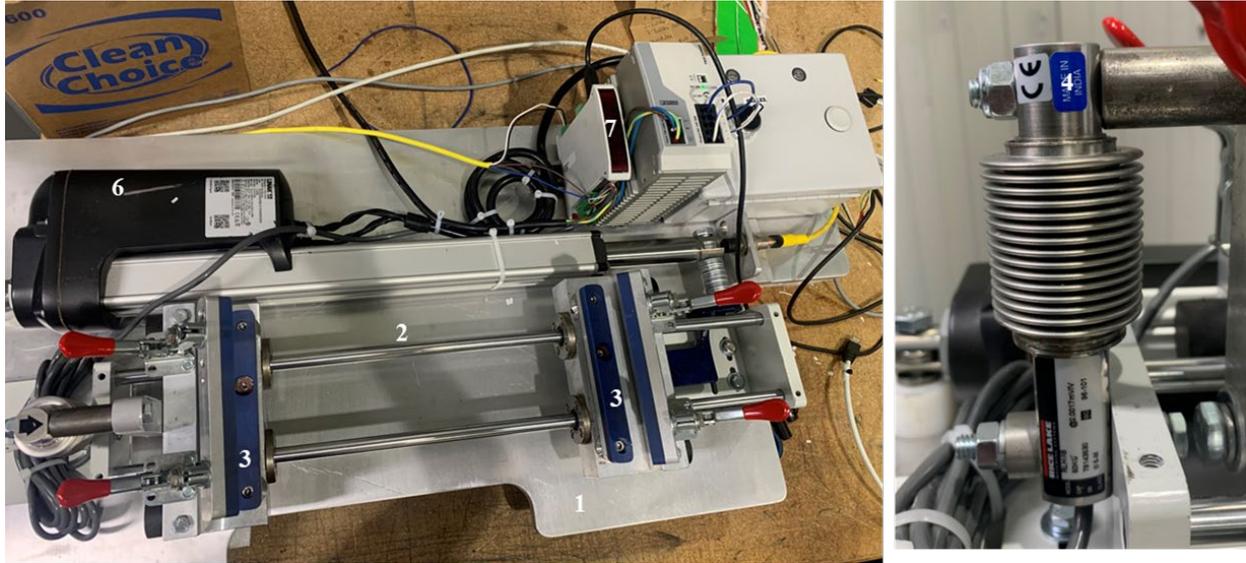


Figure 34 : Schéma mécanique du montage de test



1	Bâti
2	Double liaison glissière
3	Mâchoires
4	Cellule de charge
5	PLC
6	Vérin électrique
7	Alimentation + afficheur



Figure 35 : Photos du système de test sur bandes

### 3.4.3.2 Préparation des échantillons

Les sacs seront soudés dans la même configuration pour garantir un effort exercé constant, car la longueur et la direction de la soudure influent sur la répartition de la force exercée et sur l'uniformité du champ de contraintes comme l'illustre la figure 36. Les bandes utilisées pour les tests d'arrachement et de cisaillement sont découpées, positionnées et soudées selon la figure 37. Les faces des bandes sont positionnées pour reproduire les mêmes interfaces que pour une fermeture de sac : la première et troisième interface entre deux surfaces laminées et la deuxième interface entre deux surfaces tissées, comme illustré dans la figure 10 dans le

chapitre 2. La position des échantillons lors du soudage et des tests mécaniques est contrôlée pour chaque échantillon.

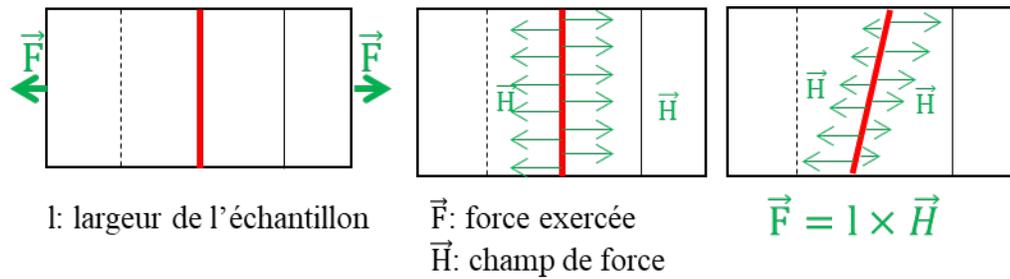
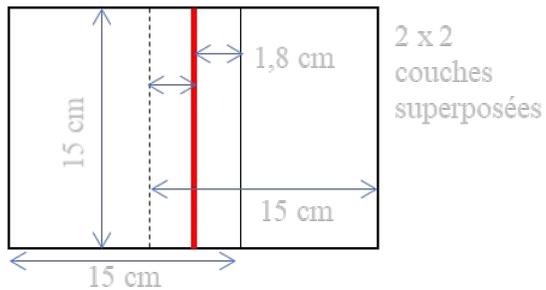


Figure 36 : Répartition des sollicitations mécaniques en fonction de la position de la soudure

Échantillons pour les tests en cisaillement



Échantillons pour les tests en arrachement

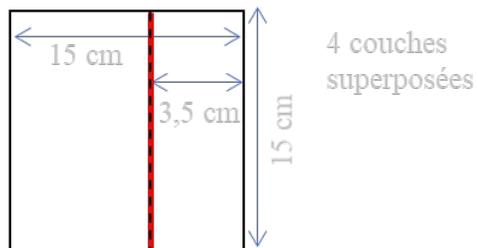


Figure 37 : Géométrie des échantillons des tests de cisaillement et d'arrachement

### **3.4.4 Plan d'expérience et exploitation**

#### 3.4.4.1 Plan d'expérience

On effectue suffisamment de mesures pour tester 4 paramètres machine (écartement, puissance/output, vitesse, pression), 2 paramètres relatifs au motif (surface et motif) (tableau 8) et selon 4 tests mécaniques différents (test de chute sur des sacs entiers, test en cisaillement, test d'arrachement entre 3 bandes d'un côté et 1 de l'autre et arrachement entre 2 bandes de chaque côté) (tableau 5). Pour s'assurer de la qualité des soudures pour chaque combinaison de paramètres, on soude un nouvel échantillon si le précédent comporte trop de défauts de soudure. De plus, on produit 5 échantillons pour chaque motif avec les mêmes réglages pour vérifier la variabilité des mesures de force. On cherche à voir si chaque test d'arrachement et de cisaillement est valide individuellement ou si au contraire les valeurs obtenues varient trop et ne permettent qu'une analyse globale des résultats obtenus.

On suit donc un plan d'expérience entier à deux niveaux donnés dans les figures 38, 39, 40 et tableau 5, qui revient à 192 tests concernant le plan d'expérience et 15 tests pour l'analyse de variabilité. On a donc 207 données au total à produire. Cela permet de limiter le nombre d'échantillons tout en ayant les données nécessaires à l'analyse du procédé. Concernant les sacs on va observer l'état de la fermeture à chaque étape du test (sac vide, remplissage, pesée, fermeture par couture, après chute) et catégoriser les sacs en fonction de s'il y a un problème de soudabilité, si les goussets sont déployés, si la soudure interne est rompue et enfin si le sac est toujours fermé ou non. En ce qui concerne les tests d'arrachement et de cisaillement, on va mesurer l'effort maximal supporté par les échantillons et s'il y a eu la saturation du capteur de force.

Tableau 8 : Niveaux des paramètres de soudure

Facteur	Symbole	Niveau 0 et niveau 1
Output	O	Graduation 7 et 10
Écartement	E	0,2 et 0,1 mm
Pression	P	0,2 et 0,4 Mpa
Vitesse	V	11 et 7,2 m/min Graduation 4 et 6
Surface de contact	S	1 mm et 2 mm d'épaisseur du motif
Motif de soudure	Rien	Pointillés et chevrons

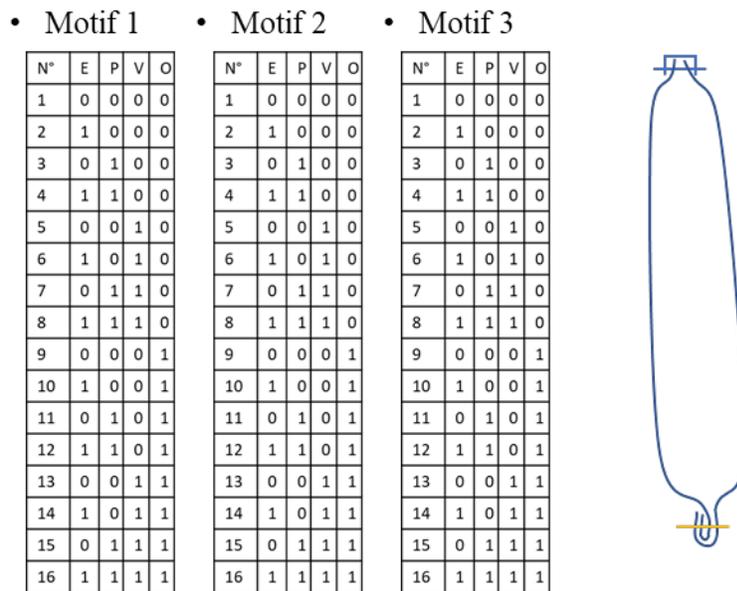


Figure 38 : Plan d'expérience pour les tests de chute

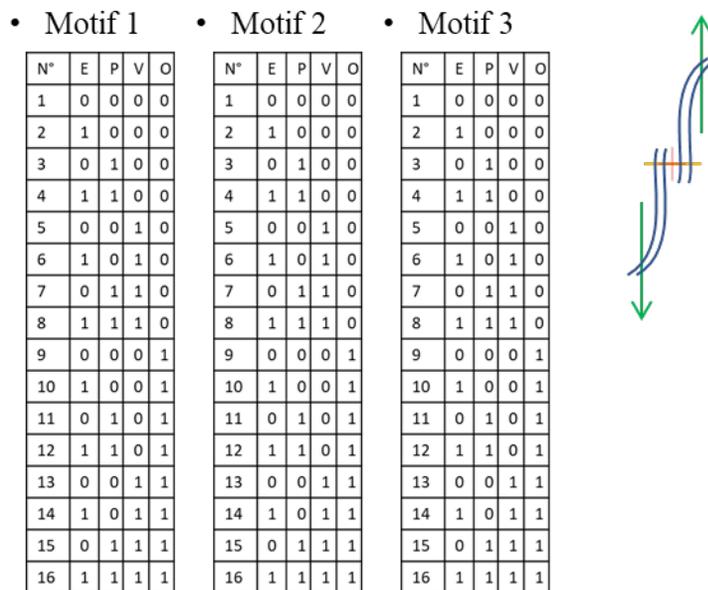


Figure 39 : Plan d'expérience pour les tests en cisaillement

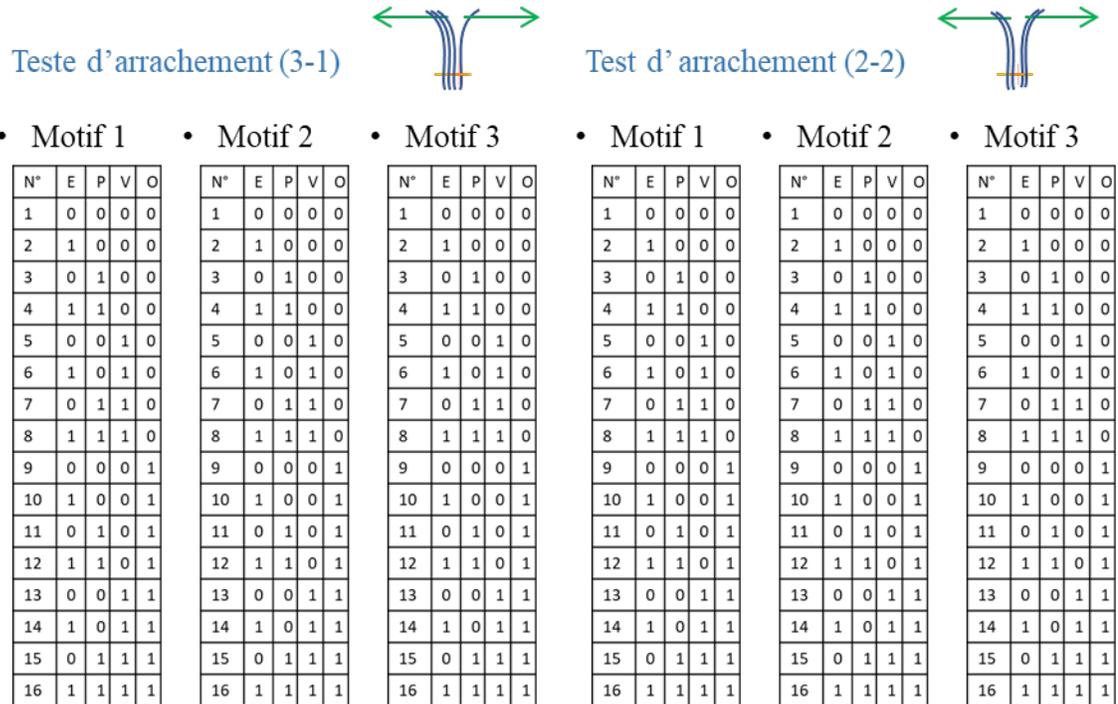


Figure 40 : Plans d'expérience pour les tests d'arrachement

### 3.4.4.2 Exploitation des tests de chute

Les tests de chute consistent à déterminer l'état des fermetures en fonction des paramètres, et que cela aille au-delà de l'évaluation binaire : le sac est rompu ou le sac est intact. On décrit l'état des soudures en général, à partir de quand est-ce que le matériau commence à rompre et où est-ce qu'on situe la rupture. Pour simplifier l'analyse des résultats, on utilise un code couleur visible dans le tableau 9, pour visualiser la proportion de sacs correctement soudés, ceux avec des défauts de soudure avant le test de chute, lorsqu'il y a des ruptures négligeables, si le sac a rompu avant le test et enfin si la fermeture s'est déchirée à cause du choc. On utilise la formule suivante pour calculer les résultats expérimentaux, selon la légende résumée dans le tableau qui suit. Par exemple, si on prend la série de tests avec le motif à chevrons (16 tests de chute au total) et que trois sacs ont rompu alors on a une proportion de sacs rompus (couleur rouge dans le tableau 11) de  $\frac{N_{\text{couleur}}}{N_{\text{Total}}} \times 100 =$

$$\frac{3}{16} \times 100 = 18,75 \% \text{ des sacs de la série.}$$

Équation 4 : Proportion de différentes soudures obtenues lors des essais de chute

$$\frac{N_{\text{couleur}}}{N_{\text{Total}}} \times 100 \quad (4)$$

Pourcentage de sacs qui répondent au critère d'évaluation ; avec :  $N_{\text{couleur}}$ : nombre de fermetures qui correspondent à la description de la légende et  $N_{\text{Total}}$ : nombre d'échantillons de la série (16 essais à chaque fois).

Tableau 9 : Code couleur pour l'analyse des tests de chute

État de la soudure	Pas de rupture	Problème de soudure mineur	Ouverture avant test	Rupture sans ouverture	Rupture
Légende					

État de la soudure	1 gousset ouvert	2 goussets ouverts	Rupture soudure interne
Légende	1G	2G	

Dans un premier temps, on estime la résistance globale des sacs, par le nombre de ruptures obtenues au ratio de tous les tests de chute. Par la suite, on analysera la répartition et la proportion de l'ensemble des résultats pour discriminer les profils de rupture. On pourra définir les conditions qui assurent des sacs plus résistants et à l'inverse quelles conditions ne permettent pas d'avoir un scellage acceptable.

Dans un second temps, on discrimine les résultats par exemple la proportion de cas où la soudure interne s'arrache, dans quels cas les goussets seront fragilisés, si on a différents profils de rupture et si la rupture est systématiquement totale.

#### 3.4.4.3 Exploitation des tests de tension

Les tests de tension permettent de mesurer la force exercée sur toute la longueur de l'échantillon en même temps que le déplacement. On vérifie systématiquement que le

maximum exercé correspond au début de la rupture et que l'arrachement est uniforme sur toute la soudure et donc que le déplacement est réduit. Cela permet d'avoir une courbe lisible et qui n'est pas une courbe d'arrachement (International Organization for Standardization, 2000)

Dans un premier temps, on souhaite connaître la résistance globale des soudures selon l'ensemble des tests réalisés en utilisant les formules qui suivent. On calcule la moyenne et l'écart type de l'effort maximal exercé par chaque série de 16 soudures. Cela permet de visualiser la série de tests la plus dispersée et celle qui donne la résistance moyenne la plus élevée (Pillet, 2001).

Équation 5 : Résistance moyenne des soudures (pour une série de 16 données)

$$\overline{Force_{max}} = \frac{\sum_{i=1}^{16} Force_{max}}{16} \quad (5)$$

Équation 6 : Écart-type

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{16-1} \sum_{i=1}^{16} (F_{max} - \overline{Force_{max}})^2} \quad (6)$$

Équation 7 : Coefficient de variation des mesures

$$C_v = \sigma / \overline{Force_{max}} \quad (7)$$

Avec :  $\overline{Force_{max}}$  : effort maximal subi par les bandes pour une série de 16 échantillons (N) (une sollicitation et un motif de soudure) ;  $Force_{max}$  : effort max subi par un échantillon (N) (effort maximal lu par le dispositif de test) ;  $\sigma$  : écart-type des valeurs de  $Force_{max}$  obtenues (N) (pour une série de 16 bandes),  $C_v$  : coefficient de variation de  $Force_{max}$  (N).

Dans un second temps, on peut compléter l'analyse en allant regarder les maximums de résistance obtenus. Cela permet d'avoir une première idée des conditions de soudures idéales à choisir et si ce maximum est commun à toutes les séries de 16 échantillons.

Troisièmement, le plan d'expérience complet permet de tracer des diagrammes d'influence des paramètres et des interactions. On calcule séparément la résistance moyenne pour le niveau 0 et 1 de chaque paramètre puis la tendance des interactions entre deux

paramètres avec la même logique (Sabre, 2007). On compare les figures obtenues en fonction de la tendance de la courbe et de sa hauteur comme dans la figure 41 (Pillet, 2001). En particulier, pour l'analyse des interactions, on regardera si les deux droites obtenues sont confondues, sinon, si elles sont parallèles et si elles sont inclinées l'une par rapport à l'autre au même titre que dans la figure 42. À partir de ce stade, on sera en mesure de cibler les facteurs les plus importants et avoir une idée des réglages à réaliser pour avoir une fermeture résistance selon ces critères (Pillet, 2001).

Équation 8 : Force moyenne des soudures avec un paramètre est au réglage 1 (par exemple l'écartement)

$$E_1 = \overline{\text{Force}_{E=1}} = \frac{\sum_0^{16} \text{Force}_{E=1}}{8} \quad (8)$$

Équation 9 : Force moyenne des soudures avec une combinaison de deux paramètres respectivement au niveau 1 (par exemple l'écartement et la pression)

$$I_{E_1P_1} = \overline{\text{Force}_{E=1 \text{ et } P=1}} = \frac{\sum_0^{16} \text{Force}_{E=1 \text{ et } P=1}}{4} \quad (9)$$

Avec par exemple :  $E_1$  : moyenne des valeurs de  $Force_{max}$  (N) obtenues pour l'écartement (E) réglé au niveau 1 (0,1mm), pour une série de 16 tests mécaniques. On a 8 résultats avec E au niveau 1 et pareil pour le niveau 0 ;  $I_{E_1P_1}$  : moyenne de  $Force_{max}$  (N) avec l'écartement au niveau 1 (0,1mm) et la pression au niveau 1 (0.4 MPa), pour une série de 16 tests mécaniques. On aura 4 données pour le point  $E_1P_1$ , et la même chose pour  $E_0P_1$ ,  $E_1P_0$  et  $E_0P_0$ .

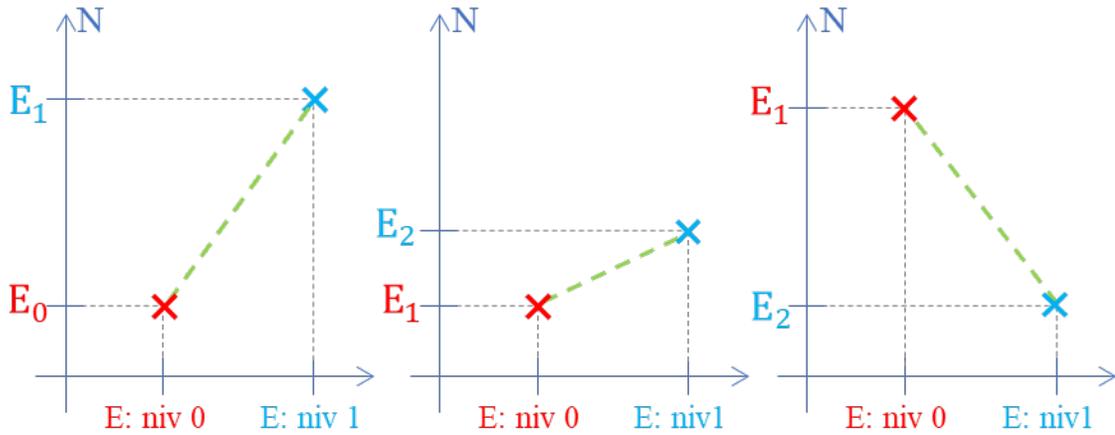


Figure 41 : Exemples de diagrammes d'effet d'un facteur à deux niveaux

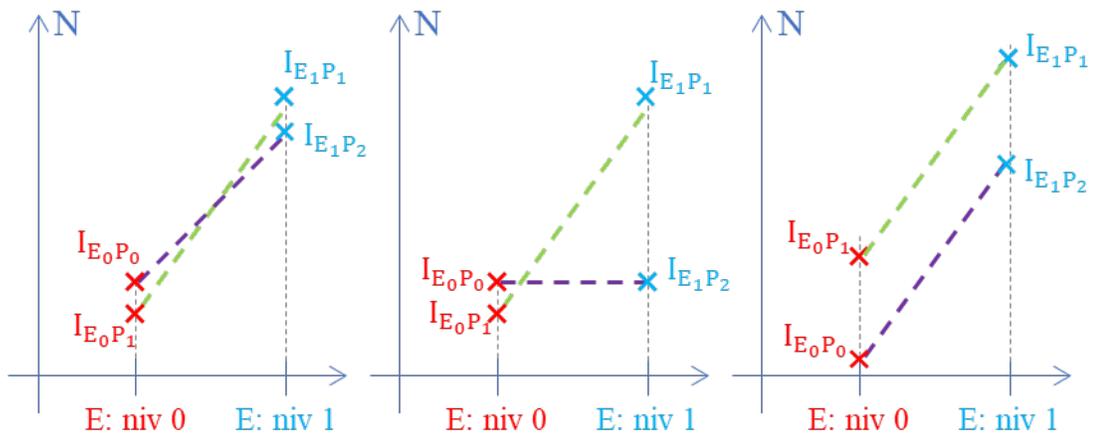
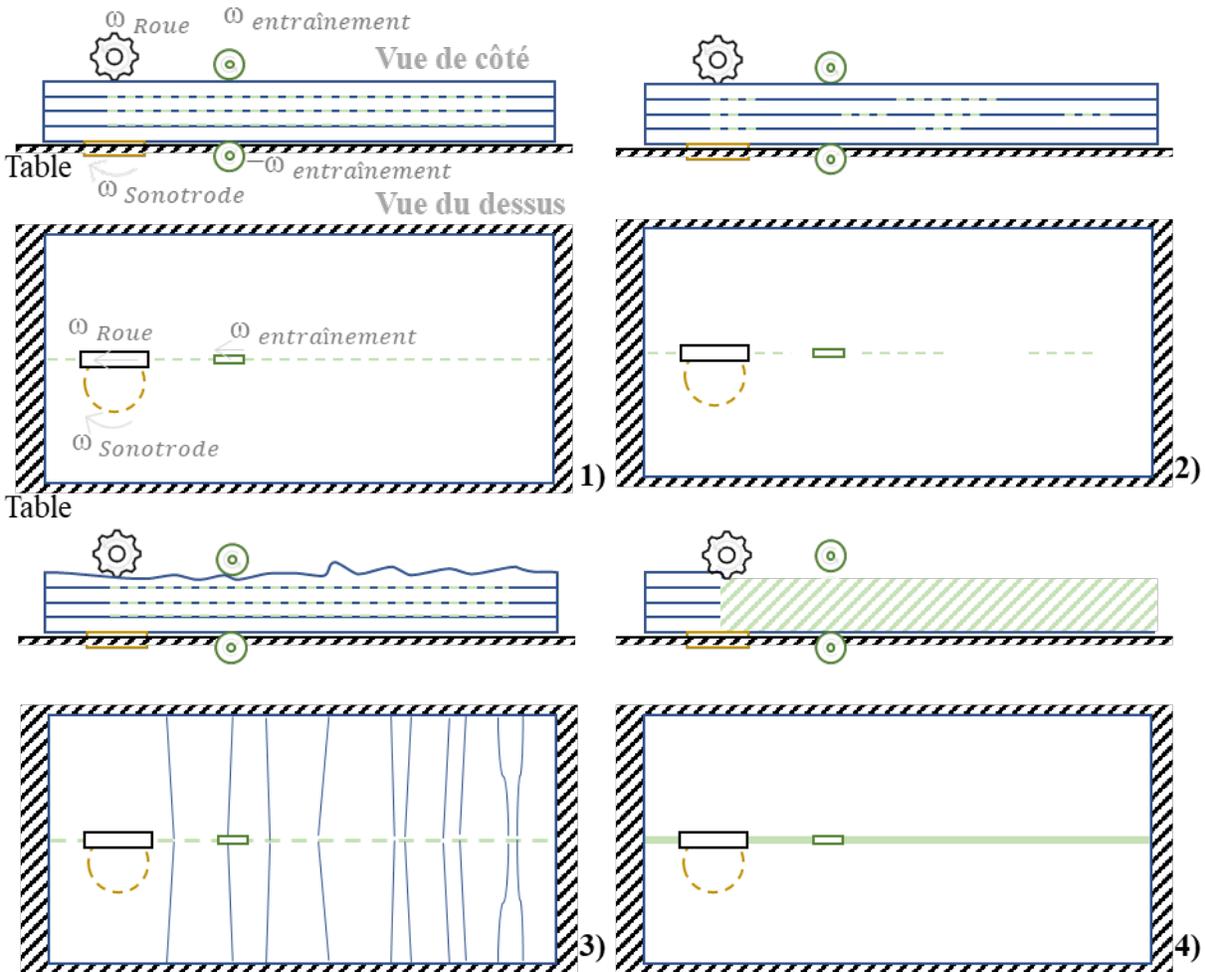


Figure 42 : Exemples de diagrammes d'interaction pour deux facteurs à deux niveaux

### 3.5 ANALYSE DE L'APPARENCE DES FERMETURES

Tout d'abord, on prend plusieurs photos des échantillons soudés pour les tests mécaniques (figures 38 à 40 et tableau 8). On identifie sur chaque photo les défauts présents sur les échantillons, avec entre autres les soudures incomplètes sur l'épaisseur du matériau (figure 43) ou sur la longueur de la soudure (figure 43), une trajectoire irrégulière, un arrachement de la matière (figure 43), des plis ou enfin la détérioration thermique du

plastique (Ageorges *et al.*, 2001 ; Darque-ceretti, 2016). Par la suite, on classe ces défauts en fonction de leur gravité, de leur impact sur la qualité du produit et enfin de leur fréquence d'apparition comme expliqué dans la figure 44 (Conselvan, 2017 ; Zhang *et al.*, 2005).



(1) cas idéal, (2) soudure incomplète et irrégulière, (3) tissage froissé et plissé par la soudeuse, (4) arrachement de matière par la roue

Figure 43 : Défauts visuels possibles

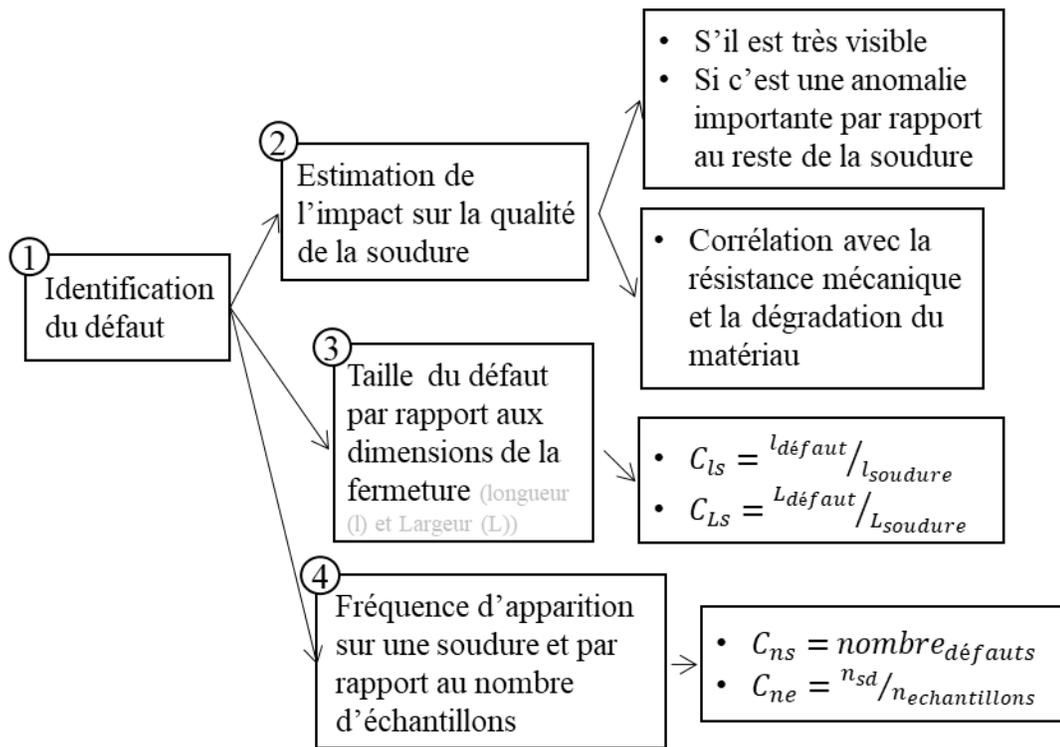


Figure 44 : Critères de classification des défauts

Lors de la prise des données, on prend les photos à trois moments distincts : avant soudure, avant test mécanique et après le test de résistance. Les résultats ainsi obtenus permettent de relier les conditions de soudure à leur aspect, donc de déduire les causes les plus probables de ces défauts (Han, 2005 ; Yam, 2010). D'après ce qu'on a vu dans les chapitres précédents, ce peut être : l'orientation du tissage par rapport à la géométrie des échantillons, la découpe des sacs, la mise en position des échantillons dans la soudeuse, le type de motif ou enfin la mise en position des échantillons lors des tests mécaniques. On se base sur les informations à propos du fonctionnement de la machine et le grand nombre d'échantillons soudés pour estimer des conditions propices aux meilleurs résultats et avoir le bon tempo pour utiliser le dispositif. On se concentre principalement sur la préparation des échantillons, leur amorce dans la machine, la gestion de leur trajectoire et le réglage de la machine. On décrit et explique dans le chapitre 4, le changement de paramètres entre les essais exploratoires et les échantillons des tests mécaniques pour améliorer la régularité du produit. Enfin, on compare

les résultats des tests mécaniques, c'est-à-dire, s'il y a une corrélation entre les cas de rupture et la présence de défauts dans la soudure en amont.

### **3.6 ANALYSE CHIMIQUE**

Cette partie traite de l'analyse microscopique du matériau et des soudures. Les manipulations ne sont pas accréditées par des normes et ne suivent pas un protocole de réalisation strict. Le but ici est de compléter l'analyse mécanique et visuelle par des informations supplémentaires sans que ce soit le plus gros enjeu de l'étude. On procède en trois phases avec d'abord l'identification de la composition et de la structure initiale des échantillons, puis la caractérisation des soudures et enfin l'identification des défauts et des zones dégradées dans les zones modifiées par le procédé.

Dans un premier temps on mène une analyse du matériau avant soudure. On définit la composition chimique du matériau, son organisation et sa structure et enfin ses caractéristiques initiales. On veut identifier les strates du sac, mesurer les dimensions et la régularité du tissage et du laminage. On détermine aussi les composants présents dans les échantillons, que ce soit les additifs, les espèces de polymère présentes et les contaminants. Ces échantillons vierges sont aussi utilisés comme référence pour voir ce que la soudure a modifié et altéré dans le plastique.

Pour la deuxième phase des analyses, on s'intéresse au matériau soudé. On regarde si la structure cristalline du matériau a été modifiée et si de nouvelles liaisons ont été créées. Puis on caractérise les soudures par leurs dimensions, l'étendue de la zone affectée thermiquement et par le mélange des strates dans la soudure. Enfin, on cherche à définir si une modification des paramètres de soudure provoque des changements significatifs dans les caractéristiques du matériau.

La troisième phase des analyses porte sur l'étude des défauts causés par le procédé, pour comprendre comment cela dégrade thermiquement et physiquement le matériau. On

s'intéresse aux zones arrachées, à l'homogénéité de la structure obtenue et enfin à la présence de zones oxydées et de cavités.

La comparaison entre le matériau vierge et les soudures se fait par rapport au tissage et au laminage extérieur. Dans le chapitre 2, on a vu que le laminage des sacs utilisés contient des colorants et comme on utilise des moyens de mesure optiques cela va influencer sur les résultats (Martin, 2009). On prend donc les mesures sur les zones des échantillons colorées en orange pour faciliter l'utilisation du microscope et des autres installations.

### **3.6.1 Méthode d'identification et d'analyse**

#### 3.6.1.1 Identification du matériau avant soudure

On commence par identifier les espèces chimiques présentes en majorité dans les échantillons, soit les types de polymères présents dans le tissage et dans le laminage. Pour cela, on procède à une analyse par calorimétrie du laminage et du tissage. Les pics de fusion et de recristallisation permettent de voir quelles chaînes carbonées sont présentes en majorité dans le matériau et si les structures cristallines sont homogènes. On cherche à identifier sur les calorigrammes les pics d'émission de chaleur lors du refroidissement ou les pics de température lors de la fusion pour identifier les polymères présents, puis si ces pics sont nets ou s'il y a des paliers ou des plateaux, significatifs de la présence de contaminants en trop grosses quantités ou de défauts de cristallisation si les cristaux sont trop gros. En ce qui concerne les additifs et les contaminants, ils sont déterminés par spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDX). Les spectres obtenus permettent de connaître les espèces chimiques présentes dans le matériau et en quelles proportions. On doit avoir une dominante de carbone puis plusieurs éléments présents en quantités significatives. Les pics les plus visibles signifieront que le matériau est enrichi avec un additif ou qu'il est contaminé par un polluant. Cela permet de dire s'il s'agit d'une espèce utilisée fréquemment en plasturgie ou d'une espèce inhabituelle signifiant que le matériau est contaminé par son environnement extérieur.

Par la suite, on fait des microscopies au microscope électronique à balayage pour visualiser la structure des échantillons et mesurer leur géométrie. On identifie les strates présentes dans le tissage et dans le laminage et on mesure leurs dimensions. Des prises de vue des surfaces du matériau permettent également de visualiser l'état de surface des échantillons et l'organisation de la matière. On s'attend à ce que le tissage et le laminage soient différents tant par l'orientation des grains de matière que par l'inclusion des additifs dans le matériau.

De plus, on fait des analyses par diffraction à rayons X (XRD), spectroscopie infrarouge (FT-IR) et Raman afin de définir un peu plus la structure microscopique des matériaux. Les spectres obtenus permettent de vérifier les espèces chimiques présentes et la structure cristalline déduite par calorimétrie, par EDX et par microscopie. Cependant, ces figures serviront avant tout de référentiel aux autres analyses pour comparer le spectre reflétant la structure initiale par rapport au spectre correspondant à la structure soudée.

#### 3.6.1.2 Analyse des effets de la soudure

Pour les analyses, on produit des échantillons pour des réglages identiques que pour les tests mécaniques. On fait varier le motif de soudure, le nombre d'épaisseurs soudées, l'écartement entre la roue et la sonotrode et la pression de soudure. La vitesse, la puissance et le type de sac sont maintenus constants. On suit le plan d'expérience dans le tableau 10, avec les soudures 1, 4 et 7 réalisées avec les mêmes réglages pour analyser la variabilité des résultats.

Tableau 10 : Plan d'expérience pour l'analyse microscopique

Échantillon	E écartement	P pression	V vitesse	O output	Motif	Épaisseurs
Laminage (zone orange)	X	X	X	X	X	X
Tissage (blanc)	X	X	X	X	X	X
Soudure 1	0,1 mm	0,4 MPa	6	Maximum (10)	Épais	2
Soudure 2	0,2 mm	0,4 MPa	6	Maximum (10)	Épais	2
Soudure 3	0,3 mm	0,4 MPa	6	Maximum (10)	Épais	2
Soudure 4	0,1 mm	0,4 MPa	6	Maximum (10)	Épais	2
Soudure 5	0,1 mm	0,2 MPa	6	Maximum (10)	Épais	2
Soudure 6	0,1 mm	0,6 MPa	6	Maximum (10)	Épais	2
Soudure 7	0,1 mm	0,4 MPa	6	Maximum (10)	Épais	2
Soudure 8	0,1 mm	0,4 MPa	6	Maximum (10)	Chevrons	2
Soudure 9	0,1 mm	0,4 MPa	6	Maximum (10)	Chevrons	4

On commence par une analyse de la géométrie des soudures avec des prises de vue au MEB. Cela permet de visualiser les zones soudées, de délimiter la ZAT et de faire une première comparaison entre le matériau avant et après soudage.

Par la suite, on compare les résultats obtenus par spectroscopie, DSC, XRD, et EDX entre les soudures et le matériau vierge. Cela permet de saisir comment le procédé a modifié la matière par rapport aux conditions initiales et à quel point ces modifications sont importantes. Ces observations permettent aussi de caractériser en général la géométrie des soudures : la profondeur des soudures, le contact intime, le degré de cicatrisation dans les couches et la zone affectée thermiquement. On enrichit notre analyse avec les spectres Raman et FT-IR pour toujours vérifier les autres mesures, mais aussi voir comment le matériau a été

modifié. On cherche à voir dans quelle ampleur la soudure transforme le matériau et si les réglages modulent énormément ces caractéristiques.

### 3.6.1.3 Étude des défauts et de la dégradation du matériau

Par la suite, on revient sur les défauts observés lors de l'analyse visuelle des soudures. Puisque le procédé implique simultanément une déformation mécanique du plastique avec la roue en plus de le souder alors il y a deux sources de dégradation possibles. Soit le matériau est trop écrasé et sollicité par la roue soit l'apport de chaleur est trop important et le plastique est dégradé thermiquement. On veut donc expliquer si les fragilités du matériau et les amorces de rupture viennent de l'incompatibilité des strates entre elles, d'un problème d'oxydation ou de fragilisation thermique du polymère (Vasile, 2000) ou enfin si les déformations subies provoquent de la cavitation dans le matériau (Pawlak *et al.*, 2014).

On utilise les images de microscopie pour identifier les zones dégradées, si la texture du matériau change et si on peut observer des cavités ou des bulles dans la ZAT. Si on observe des bulles et que le matériau n'est pas oxydé, alors il peut s'agir de cavitation mécanique parce que le matériau a été trop étiré. En revanche, une surchauffe du plastique peut causer des modifications similaires, donc il faut pousser l'analyse pour vérifier si les échantillons ont réagi chimiquement avec l'atmosphère extérieure. Les analyses spectrales permettent de déduire si les chaînes carbonées des polymères ont créé des liaisons avec l'oxygène présent dans l'air. Si oui alors le matériau est oxydé et devient rigide et cassant. Cependant, on peut aussi déduire des analyses que la dégradation est causée par une combinaison des deux facteurs de dégradation, si on n'est pas en mesure de préciser l'origine de ces défauts.

## 3.6.2 Matériel

### 3.6.2.1 Microscope électronique à balayage

L'analyse plus globale de la matière se fait grâce à un microscope électronique à balayage (MEB- EDX) montré dans la figure 45. Il s'agit d'un modèle de Hitachi (SU1510)

et qui permet l'observation à haute résolution et l'analyse semi-quantitative des échantillons observés. Le grossissement va de 5 à x 300 000 et convient aux matériaux solides, en poudre, minéraux et aux composés organiques, à des températures variables grâce à la platine chauffante utilisée en complément (Hitachi, 2008).



Figure 45 : Microscope électronique à balayage Hitachi SU1510

Ces machines permettent de faire des observations en surface et avec une multitude d'échelles. Cela permet de voir les zones abîmées et de voir la structure du mat à échelle des grains de matière. Avec cet équipement on est capable de voir s'il y a une mise en forme particulière des grains de matière et idéalement visualiser leur orientation et si le matériau est anisotrope.

Lors des analyses, on est à une distance d'observation de 4,7mm, dans une atmosphère à vide à 40 Pa, on utilise un détecteur BSECOMP et un voltage à 10 kV. Pour l'EDX, on est à une distance d'observation de 9 à 13,8 mm, on utilise un détecteur SE et un voltage à 20 kV.

### 3.6.2.2 Spectromètres et diffractomètres

Les trois dispositifs suivants permettent une analyse plus poussée des structures lamellaires et cristallines dans les polymères. On utilise un spectromètre Raman (Bruker 2017), un spectromètre FT-IR (PerkinElmer, 2005) et un diffractomètre à rayons X montrés dans la figure 46.



Figure 46 : (1) Spectromètre Raman ; (2) Spectromètre FT-IR ; (3) XRF portatif

Ces trois dispositifs d'analyse permettent de préciser la structure d'un matériau à une échelle plus réduite qu'avec un microscope. De manière générale, cela consiste à projeter une onde électromagnétique, que ce soit des rayons X, des infrarouges ou d'autres longueurs d'onde. Certaines parties de la chaîne du PP ou des structures cristallines vont réagir à cet apport énergétique et permettre de tracer des spectres d'émission ou de diffraction pour le troisième dispositif (Martin, 2009). Ces structures répondent à certaines longueurs d'onde et à certains niveaux d'énergie, c'est pour cela qu'on n'a pas les mêmes réponses avec ces trois dispositifs. Les spectres obtenus peuvent dans un premier temps être comparés à des données de référence pour identifier les pics d'émission observables. Dans un second temps, on compare les données expérimentales entre elles pour constater de l'intensité des changements de structure déduits des spectres.

Concernant le Raman, on utilise un laser avec une longueur d'onde de 785 nm, une ouverture de 50 x 1000  $\mu\text{m}$ , une puissance de 50mW, un temps d'intégration de 30s, pour quatre scans et un spectre qui va de 47  $\text{cm}^{-1}$  à 3500  $\text{cm}^{-1}$ . Pour le FT-IR, les réglages sont : ATR, un spectre de 2000 à 650  $\text{cm}^{-1}$ , une résolution de 2  $\text{cm}^{-1}$  et réalisé en quatre scans. Enfin pour le XRD, on fait une analyse en réflexion, pour un niveau d'énergie allant de 4,02 keV à 11,27 keV et enfin avec un maximum de divergence à 0,63.

### 3.6.2.3 Calorimètre électronique à balayage

On étudie les propriétés thermiques du matériau avec un calorimètre à balayage différentiel (DSC) de TA instruments (DSC Q2000) visible dans la figure 47. Cet outil mesure la transition vitreuse, la cristallisation froide, la fusion, la cristallisation, la stabilité du produit, les transitions de phase, la cinétique de polymérisation, la stabilité oxydative (TA instruments, 2012). On utilise cette installation pour identifier les conditions de fusion, de refroidissement et de cristallisation du matériau (Vite, 2009). De plus, c'est un moyen supplémentaire pour identifier les espèces présentes dans les sacs, en fonction des pics et des paliers de température qui seront atteints.



Figure 47 : Calorimètre DSC Q2000

Dans le chapitre qui suit, on présente et exploite les résultats obtenus grâce à la méthode présentée précédemment. On procède d'abord à un bilan des données obtenues selon les critères d'évaluation de l'étude. Ces données sont exploitées séparément en fonction de ces critères puis sont comparées, afin de donner une idée globale des fins de l'étude. Enfin, on discute des conclusions du projet par rapport aux publications antérieures.

Pour les analyses, on utilise un creuset en aluminium T zéro, on fait deux balayages de 25°C à 200°C, à une vitesse de 10°C/min et sous atmosphère d'azote à 50 ml/min.



## **CHAPITRE 4**

### **ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION**

Dans ce chapitre, on revient sur les données expérimentales obtenues selon la méthode et les équipements présentés dans le chapitre 3. Il y a des mesures de force, des photographies, des images de microscopie, des spectres Raman et FT-IR, des diffractogrammes et des calorigrammes. Cette diversité de données nécessite de fractionner l'analyse des résultats puis de les rassembler par la suite pour en faciliter la compréhension. Dans la première partie, on présente les résultats des tests selon chaque critère d'évaluation : la résistance mécanique, l'aspect des soudures et enfin leur microstructure. Les mesures sont analysées et exploitées séparément pour faire ressortir une interprétation propre à chaque critère d'évaluation. Dans la seconde partie, on confronte les résultats entre eux pour avoir le regard le plus complet possible sur le procédé étudié. On clôt l'étude avec une discussion des résultats, des idées d'amélioration de l'étude et un rapprochement avec les travaux antérieurs afin de situer le projet par rapport aux autres publications.

#### **4.1 PRESENTATION GENERALE DES RESULTATS**

Dans cette partie, on exploite d'abord les valeurs de résistance mesurées avec dans l'ordre les tests de chute et les tests d'arrachement. Ensuite, on fait l'analyse des photographies prises à partir des mêmes échantillons pour enfin passer à l'analyse microscopique du matériau et des soudures. Cela rassemble des images de microscopie, les spectres Raman et IR, les diffractogrammes et les calorigrammes. Au terme de cette partie, on a les résultats et interprétations des trois critères séparément, qui sont confrontés entre eux et discutés dans la seconde partie.

##### **4.1.1 Tests de résistance**

Les tests mécaniques rassemblent les tests de chute ainsi que les tests de cisaillement et d'arrachement. Les premiers résultats sont qualitatifs, ils permettent d'avoir une vision pratique de l'utilisation de la soudure US et de se placer dans un cadre d'utilisation concret.

Les tests de cisaillement et d'arrachement permettent d'avoir des valeurs numériques auxquelles relier la résistance des soudures et sont complémentaires aux premiers tests. Ils sont un moyen d'obtenir des données quantitatives, qu'on exploite par une analyse statistique. On tire de ces tests la résistance moyenne des soudures, une estimation de la variabilité des résultats, les maximums obtenus et l'effet des paramètres et leurs interactions sur les résultats.

#### 4.1.1.1 Tests de chute

L'évaluation de l'état des sacs est présentée en deux parties dans le tableau 11. Dans la partie gauche, l'état de chaque soudure est donné après le remplissage puis après le test de chute. Cela permet de situer plus précisément comment la soudure rompt et dans quelle mesure on peut être critique face aux résultats. Les soudures sont décrites suivant un code de couleur donné au chapitre 3 dans le tableau 9, qui permet de les discréditer par catégories. La proportion de ruptures, de soudures intactes ou des états intermédiaires sont calculées et rassemblées dans le tableau de droite. Il permet de voir quels phénomènes sont plus fréquents, s'il y a des anomalies et pour quels paramètres on a plus de ruptures ou au contraire plus de sacs intacts.

Tableau 11 : Résultats des tests de chute et analyse statistique

État de la soudure	Pas de rupture	Problème de soudure mineur	Ouverture avant test	Rupture sans ouverture	Rupture	État de la soudure	1 gousset ouvert	2 goussets ouverts	Rupture soudure interne
Légende						Légende	1G	2G	

N°	Chevrons		Épais		Fin	
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
1	2G	2G	1G	1G		
2	2G	2G	1G	1G		
3			1G	1G		1G
4			2G	2G	1G	2G
5	1G	1G				
6	2G	2G				
7	2G	2G		1G		
8	2G	2G	1G	2G		
9	2G	2G	1G	2G		
10	2G	2G		2G		
11			2G	2G	1G	2G
12			2G	2G	2G	
13		1G				
14	2G	2G				
15	2G	2G		2G		
16	2G	2G		2G		

	chevrons		épais		Fin	
	%	%	%	%	%	%
	6	0	62,5	19	81	44
	6	50	0	31	0	0
	25	25	0	0	0	0
	0	0	0	12	0	6
	0	6	0	0	0	0
	62,5	19	37,5	37,5	19	50
1G	6	12,5	31	25	12	6
2G	62,5	62,5	19	50	6	18

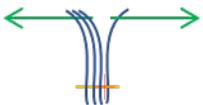
On constate que fréquemment les goussets se déploient et la soudure interne cède sans que le sac s'ouvre. Cependant, les sacs testés avec le motif fin sont plus stables qu'avec les deux autres roues selon cet axe d'analyse. Il apparaît aussi que les paramètres de soudure ont un impact sur la solidité des sacs, comme la vitesse et la pression qui jouent sur la quantité d'énergie transmise au matériau et sur la qualité de ce transfert énergétique. On obtient les meilleurs résultats communs aux trois motifs avec les paramètres : pression à 0,4 MPa et vitesse à la graduation 4 (minimum testé) sans influence significative de la puissance et de l'écartement. Les sacs sont mal soudés pour une pression à 0,2 MPa et une vitesse à la graduation 6 pour le motif à chevrons et le motif à pointillés épais.

#### 4.1.1.2 Tests d'arrachement et de cisaillement

En ce qui concerne les tests sur bandes, on procède à une analyse en trois temps. Comme décrit dans le chapitre 3, on considère d'abord la résistance moyenne des soudures, puis l'effet des réglages de la soudeuse et enfin l'impact de leurs interactions sur les mesures de force. Les moyennes et les extremums sont présentés dans le tableau 12, l'analyse des réglages se trouve dans le tableau 13 et enfin l'estimation des interactions entre les paramètres est résumée dans le tableau 14.

Dans le tableau 12, on constate que les résultats des tests de cisaillement sont meilleurs que ceux en arrachement et que les tests en arrachement avec deux bandes de chaque côté résistent plus que lorsqu'on sollicite uniquement la dernière épaisseur. Concernant les motifs de soudure, c'est le plus fin qui résiste le moins en cisaillement, les chevrons donnent de moins bons résultats pour l'arrachement de la dernière bande et le dernier motif est celui qui donne les meilleurs résultats globaux pour toutes les sollicitations. On remarque cependant que le maximum atteint en cisaillement a été obtenu avec les chevrons puisque l'échantillon n'a pas rompu lors du test pour les paramètres : écartement à 0,1mm, vitesse à la graduation 4 (minimum) et puissance à la graduation 7 (minimum).

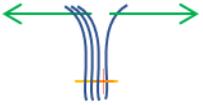
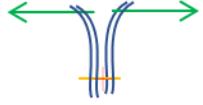
Tableau 12 : Analyse globale des tests de cisaillement et d'arrachement

	Motif	MAX (N)	MIN (N)	MOY (N)	$\sigma$ (N) Écart-type	$C_v$ (%)
Cisaillement 	Fin	434	244	414	50	12
	Épais	434	434	434	0,04	≈0
	Chevrons	434	434	434	0,04	≈0
Arrachement 	Fin	128	34	81	30	37
	Épais	166	26	83	38	45
	Chevrons	163	2	43	50	116
Arrachement 	Fin	157	12	113	35	30
	Épais	220	60	138	44	31
	Chevrons	178	25	82	41	50

En ce qui concerne le tableau 13, on voit que les différentes séries de tests donnent des résultats similaires. C'est le cas en ce qui concerne l'effet des paramètres sur la qualité des soudures. De manière générale, les paramètres les plus importants sont l'écartement (avec un impact positif : plus le serrage est grand plus la résistance est grande) et la vitesse (avec un impact négatif : plus on soude lentement plus la soudure résistera). Au contraire, l'output et la pression ont un effet limité sur les résultats, soit parce que les résultats entre les séries ne concordent pas soit parce que les résultats les plus visibles montrent le peu d'impact de ces deux paramètres.

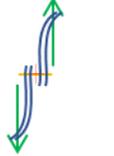
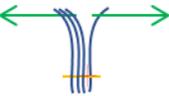
Tableau 13 : Analyse de l'impact des facteurs expérimentaux

Sigle	X	FAIBLE (+ ou -)	MOY (+ ou -)	FORTE (+ ou -)
Explication	Pas d'effet significatif du paramètre	Effet faible du paramètre	Effet moyen du paramètre	Effet fort du paramètre

Sollicitation	Motif	E Écartement	P Pression	V Vitesse	O Output
 Cisaillement	Fin	FAIBLE +	X	FAIBLE -	X
	Épais	MOY +	MOY +	MOY -	MOY -
	Chevrons	MOY +	MOY -	MOY -	MOY -
 Arrachement	Fin	MOY +	FAIBLE +	FAIBLE -	X
	Épais	FORTE +	FAIBLE +	MOY -	FAIBLE +
	Chevrons	FORTE +	FAIBLE +	FORTE -	FAIBLE -
 Arrachement	Fin	MOY +	FAIBLE +	MOY -	MOY -
	Épais	MOY +	FAIBLE -	MOY -	FAIBLE -
	Chevrons	MOY +	FAIBLE -	FAIBLE +	MOY +

Les résultats visibles dans le tableau 14 sont difficiles à exploiter, car ils sont très variables, mais on peut en faire ressortir plusieurs principes pertinents. Certaines interactions les plus marquées concernent l'écartement et la vitesse ainsi que l'écartement et la puissance (nommée Output dans les tableaux) avec des interactions moyennes ou fortes positives pour la plupart des résultats. Pour le reste, on suppose que l'écartement et la pression et la pression et la vitesse sont aussi interdépendants, mais les données sont trop variables pour se prononcer complètement.

Tableau 14 : Analyse des interactions entre les réglages de la soudeuse

Sigle	EP	EV	EO	PV	PO	OV	
Interaction entre deux paramètres	Écartement et pression	Écartement et vitesse	Écartement et Output	Pression et vitesse	Pression et output	Output et vitesse	
Sigle	X	FAIBLE (+ ou -)	MOY (+ ou -)	FORTE (+ ou -)	FORTE (+ ou -)	FORTE (+ ou -)	
Explication	Pas d'interaction entre les deux paramètres	Interaction légère entre les deux paramètres	Interaction Moyenne entre les deux paramètres	Interaction forte entre les deux paramètres	Interaction forte entre les deux paramètres	Interaction forte entre les deux paramètres	
Sollicitation	Motif	EP	EV	EO	PV	PO	OV
 Cisaillement	Fin	FAIBLE -	X	X	FAIBLE - +	FAIBLE - +	FAIBLE - +
	Épais	FORTE +	FORTE +	FORTE +	FORTE +	FORTE +	FORTE - +
	Chevrons	MOY +	FORTE +	MOY +	FORTE -	MOY -	FORTE - +
 Arrachement	Fin	FAIBLE +	MOY +	FAIBLE +	MOY +	FAIBLE +	MOY +
	Épais	FAIBLE +	MOY +	FAIBLE +	MOY +	MOY - +	MOY - +
	Chevrons	MOY +	FORTE +	MOY +	MOY -	MOY - +	MOY -
 Arrachement	Fin	MOY +	FAIBLE +	MOY +	MOY +	FAIBLE +	FAIBLE -
	Épais	MOY +	FORTE +	FORTE +	FORTE -	FORTE -	MOY -
	Chevrons	FAIBLE +	FAIBLE +	MOY +	MOY +	MOY - +	FAIBLE +

L'analyse de multiples échantillons selon les mêmes paramètres de soudure et testés selon les mêmes conditions pour étudier la répétabilité des tests d'arrachement permet de voir que la résistance globale et l'étalement des mesures varie en fonction du motif de soudure. Les deux motifs avec des pointillés donnent des données plus rapprochées avec un taux de variation de 9% et 12% tandis que les données du motif à chevrons varient beaucoup plus avec un taux de variation de 17%.

Tableau 15 : Mesures de variabilité des tests d'arrachement

Motif	Force max moyenne	$\sigma$	$C_v$
Chevrons	32 N	5,7N	17%
Épais	117,5N	10,8N	9%
Fin	52,4 N	6,4N	12%

Globalement, les résultats des tests mécaniques ont une certaine fiabilité si on les prend séparément, car ils sont très variables et ce peu importe le motif de soudure. En revanche, une analyse macroscopique de ces données permet de dégager une tendance significative pour la suite.

#### 4.1.2 Analyse visuelle

En ce qui concerne l'analyse de l'apparence des soudures, on procède en deux temps. Dans un premier temps, on identifie les défauts de soudure, on les ordonne et on sélectionne les plus graves et les plus fréquents. Puis, on classe les échantillons selon leur régularité et la gravité de leurs défauts afin de trouver quels facteurs d'application donnent les meilleures soudures.

##### 4.1.2.1 Classification des défauts

Les défauts visibles sur les échantillons concernent principalement la profondeur des soudures, la trajectoire suivie par la roue sur la machine, la présence de plis, une amorce de soudure difficile et enfin un arrachement de matière sur le matériau par la roue. Les figures qui suivent rassemblent ce qui a été observé (figures 48 à 52).

Parmi les photographies données dans la figure 48, les soudures sont très peu marquées autant que dans la photo 1 et 1' alors qu'à d'autres instants elles sont trop appuyées comme dans les photos 2 et 3 au point d'affiner le matériau, de le faire craqueler, de le trouser ou de

le rendre transparent comme l'illustrent les photos 4 à 7. De même, les défauts de trajectoire sont plus ou moins importants, les photos de la figure 49 montrent que la déviation va de 1 mm à presque 1cm à l'extrémité des soudures réalisées sur des sacs. De plus, il peut s'agir d'un simple angle de déviation ou alors d'ondulations autour de la ligne visée. En ce qui concerne l'amorce des soudures, cela s'étend en moyenne sur 20% de la longueur des soudures, et combine plusieurs problèmes tels qu'une déviation de la trajectoire, une soudure irrégulière telle qu'illustrée dans la figure 50, des plis ou un arrachement de matière. Cependant, le principal défaut rencontré dans cette zone est un arrachement de matière causé par le mouvement de la roue sur le plastique, qui est plus ou moins marqué sur les échantillons au même titre que la figure 51 le montre. Enfin, la figure 52 présente des cas d'échantillons plissés où la première couche est ondulée autour de la soudure ou alors où le plastique est froissé en périphérie du cordon de soudure.

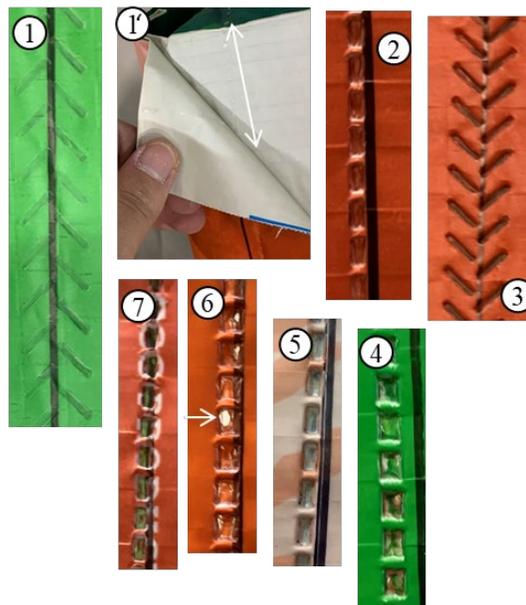


Figure 48 : Défaut 1 : la profondeur des soudures dans le matériau

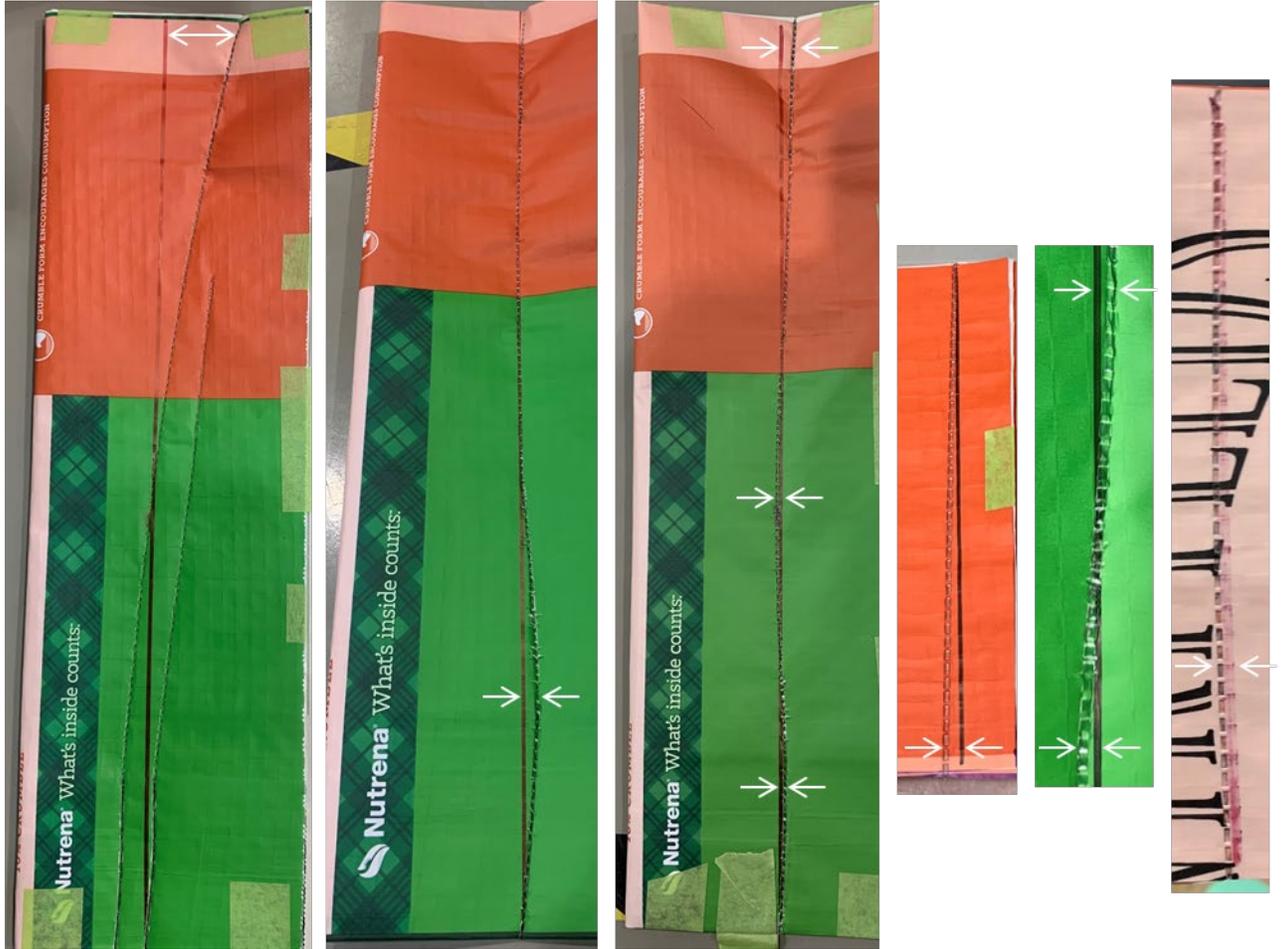


Figure 49 : Défaut 2 : trajectoire des fermetures

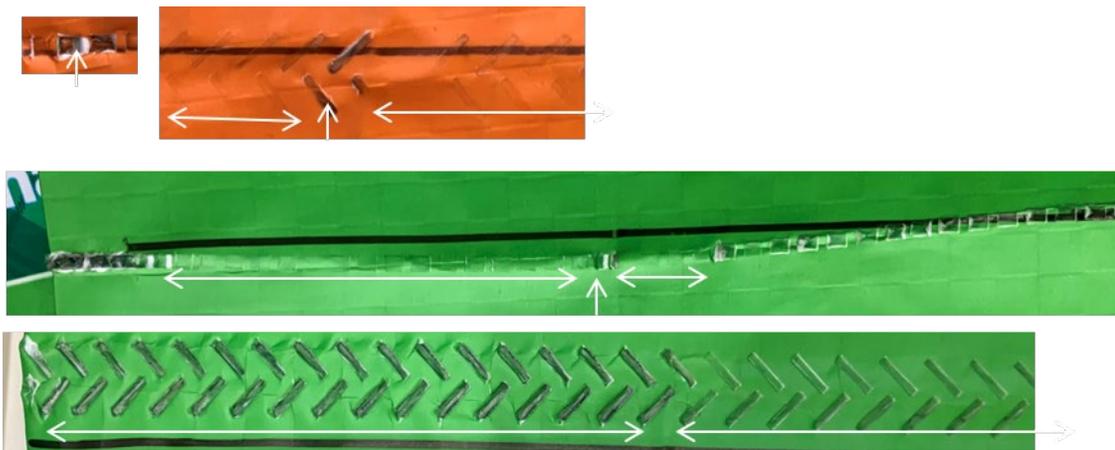


Figure 50 : Défaut 3 : Transition entre les goussets et le centre du sac



Figure 51 : Défaut 4 : Arrachement du plastique et amorce des soudures à la première extrémité des échantillons



Figure 52 : Défaut 5 : Plissement du matériau autour de la fermeture

Même si on les retrouve sur 30 % des échantillons, on néglige les problèmes de plissement et les défauts de trajectoire, car ils ne compromettent pas l'intégrité des soudures. En effet, tant que le motif est régulier et que les zones soudées sont peu affinées alors les sollicitations mécaniques sont également réparties sur la fermeture en plus de minimiser les amorces de rupture. On se concentre sur les problèmes d'arrachement qu'on retrouve dans 77% des sacs et 23% des bandes (figure 51), de soudabilité pour 40% à 50% des échantillons et les problèmes d'amorce des fermetures pour 77% des sacs et 23% des bandes.

#### 4.1.2.2 Interprétation de l'analyse visuelle

On a tout d'abord remarqué que la profondeur de la soudure joue un rôle dans la qualité de la fermeture. Les échantillons dont la soudure n'est pas assez appuyée sont ceux qui sont susceptibles de céder dès le remplissage ou à l'amorce d'une sollicitation. C'est en particulier le cas pour le motif à chevrons et les pointillés épais et surtout pour les réglages lorsque la vitesse est au plus haut et la pression au plus bas. Le fait que ces deux motifs aient une surface de contact deux fois plus grande implique que l'énergie transmise est dissipée dans une plus grande quantité de matière. Au contraire, un trop grand apport d'énergie a été remarqué en particulier pour le motif fin, au point où le motif des soudures est très en relief, la zone soudée très fine et rigide allant dans certains cas jusqu'à être transparents. On peut aussi remarquer ces défauts sur les deux autres motifs, mais avec des différences moins intenses entre les échantillons.

De plus, la majorité des échantillons présentent des défauts à l'amorce des soudures, qui se manifestent notamment par des zones d'arrachement allant de quelques mm à  $\frac{1}{4}$  de la soudure. C'est problématique pour les goussets, car c'est là qu'il y a le plus d'épaisseurs à souder et c'est une zone du sac très exposée aux chocs. Amener les sacs dans le mécanisme à la même vitesse linéaire que le point de contact avec la roue et la sonotrode représente un premier point d'amélioration à prendre en compte pour minimiser leur arrachement et donc moins les fragiliser.

Enfin, les résultats montrent globalement que la position d'équilibre entre une bonne soudabilité et un maintien de l'état du sac est difficile à trouver. Il y a peu de cas où on a à la fois une soudure uniforme sur toute l'épaisseur du matériau et à la fois pas d'arrachement ni de craquelures. Les soudures ayant des défauts de soudabilité, pour le motif à chevrons et le motif à pointillés épais ont été obtenues pour une pression à 0,2 MPa et la vitesse à la graduation 6 et la puissance à la graduation 7. Or, les plus gros défauts d'arrachement et d'amorce des soudures sont survenus globalement pour les mêmes réglages. Les échantillons avec des soudures trop appuyées correspondent à la vitesse, la pression et l'output à leur valeur maximale. C'est symptomatique d'un trop grand apport énergétique qui sollicite trop le matériau.

#### **4.1.3 Analyses microscopiques**

En ce qui concerne l'étude des soudures à échelle microscopique, on a un lot de résultats obtenus avec plusieurs dispositifs. Ces mesures sont difficiles à interpréter, car elles dépendent de plusieurs caractéristiques du matériau, tel que le type de structure observée, la tacticité du polypropylène, sa structure cristalline, la forme et l'orientation de ses structures lamellaires, la présence d'additifs, de contaminants, d'autres polymères ou de colorants et la façon avec laquelle les analyses sont réalisées. L'exploitation des résultats est donc plus difficile que pour les deux autres critères d'évaluation, car il est plus facile de mal interpréter les résultats et parce que les déductions dépendent de multiples influences. On base donc l'étude microscopique sur une comparaison entre les résultats des différentes analyses pour éviter les erreurs d'interprétation.

Dans un premier temps, on caractérise l'état initial du matériau. Cela concerne principalement sa composition chimique, sa structure microscopique et ses propriétés physiques. Dans une deuxième phase, on s'intéresse à la structure et aux propriétés des soudures et on confronte les soudures entre elles en fonction des paramètres de soudure. Enfin, on désigne les défauts de soudure qui ont été observés, que ce soit la zone affectée

thermiquement, des zones oxydées, des strates qui se sont plus ou moins bien mêlées ou des zones arrachées.

#### 4.1.3.1 État initial du matériau

Tout d'abord, on utilise les analyses par calorimétrie pour identifier les polymères présents dans le plastique. Puis, on passe aux analyses par énergie dispersive des rayons X (EDX) pour identifier cette fois les additifs et contaminants présents. Ensuite, on passe aux images de microscopie pour visualiser la structure du sac et l'organisation de sa matière. Enfin, on s'intéresse aux spectres obtenus par diffraction des rayons X (XRD), spectroscopie Raman et infrarouge (FT-IR). Les spectres sont tous disponibles dans l'annexe du mémoire.

Sur les calorigrammes, on remarque deux pics de fusion et de recristallisation typiques de deux polymères. Le plus gros pic est à plus de 160 °C comme dans la figure 53 : il correspond au polypropylène et comme la maille  $\alpha$  se distingue par une température de fusion entre 160°C et 175°C, il est très probable que ce soit la structure cristalline majoritaire dans l'échantillon. Le second pic est visible sur la figure 54, il est à 105 degrés et permet d'estimer que du polyéthylène à basse densité (LDPE) est présent dans le laminage. On a donc dans le tissage du PP en majorité et dans le laminage une quantité non négligeable de LDPE en plus du PP. C'est problématique, car ces deux matériaux n'ont pas la même température de fusion et une densité très différente. On peut donc difficilement les souder en même temps à moins d'en dégrader un en plus de ne pas pouvoir les mixer à cause de leur incompatibilité.

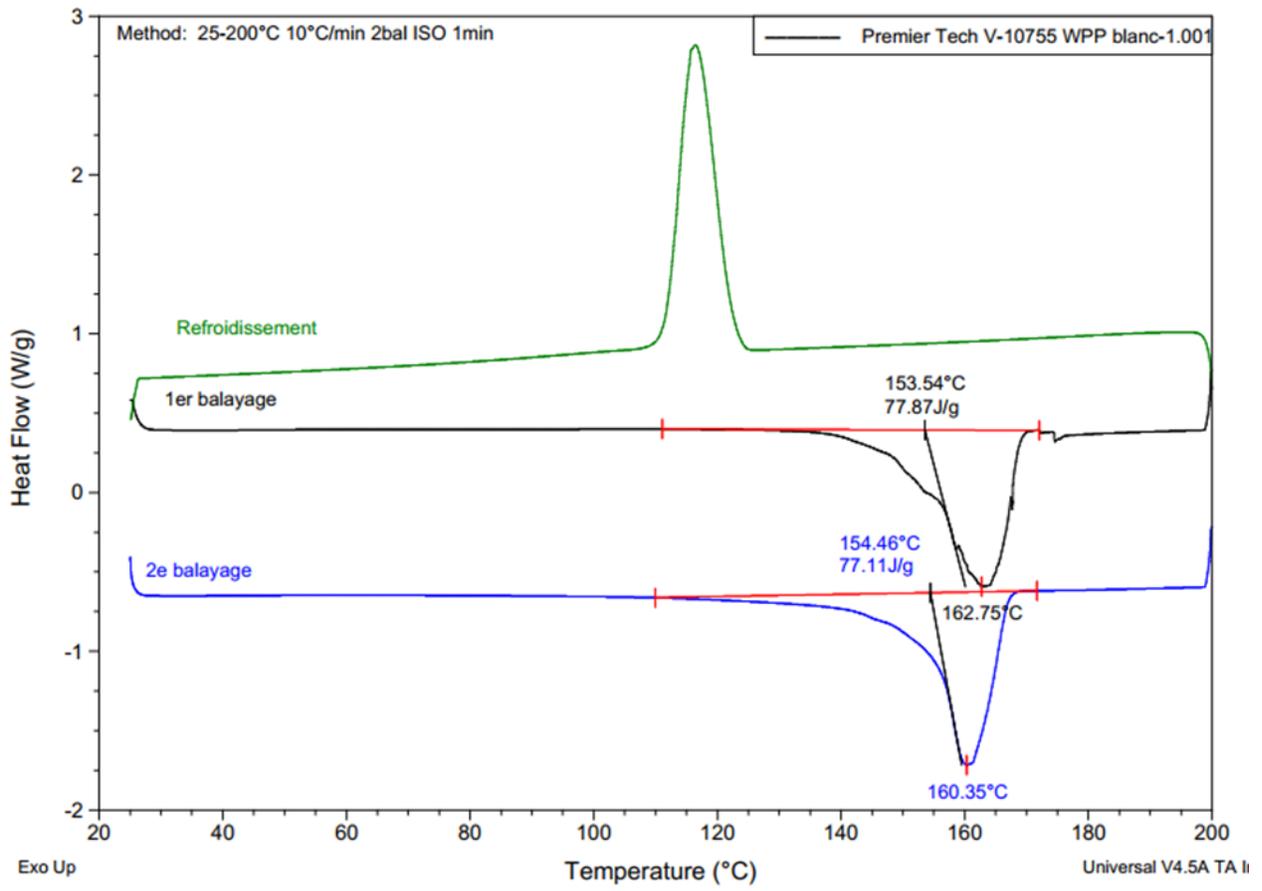


Figure 53 : Calorigramme de la partie tissée d'un échantillon non soudé

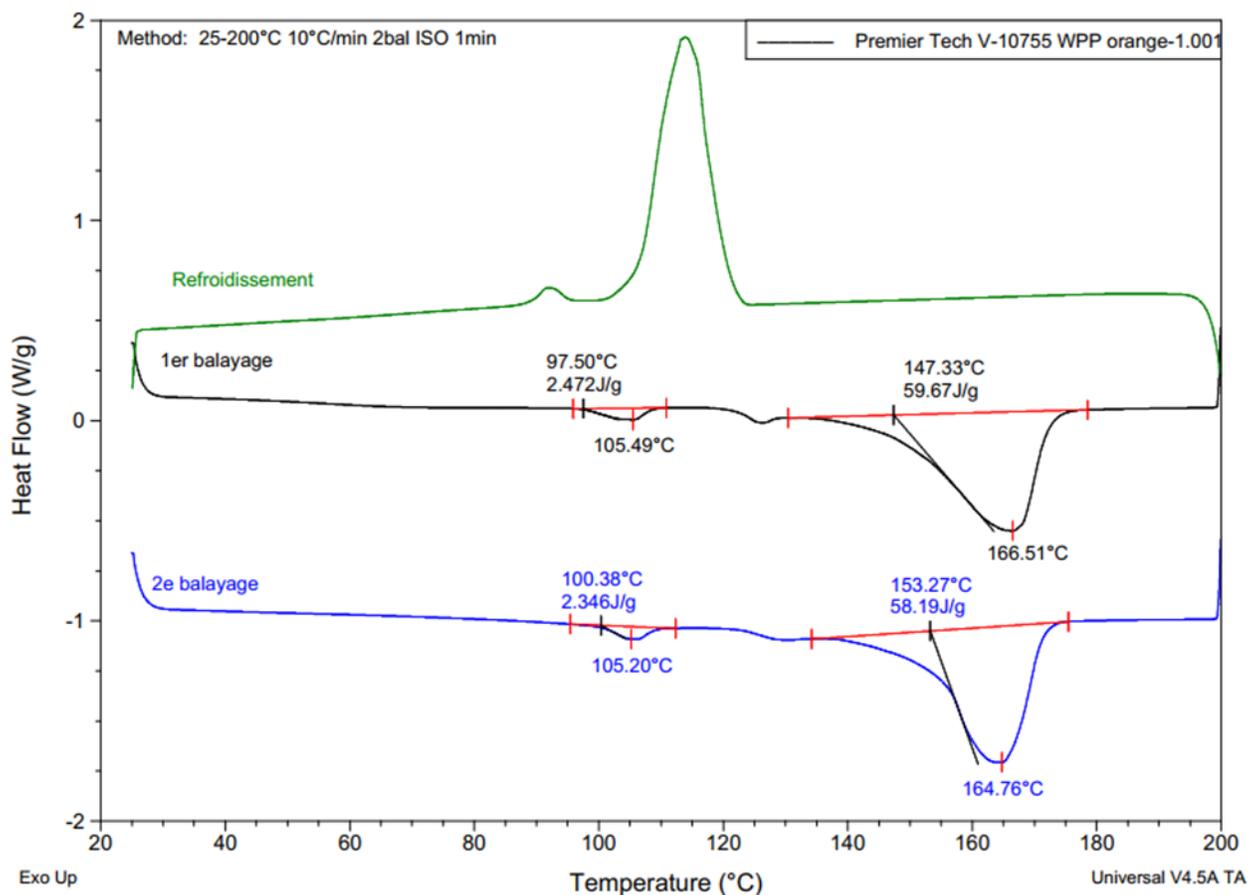


Figure 54 : Calorigramme de la partie laminée d'un échantillon non soudé

Avec les mesures par EDX représentées dans la figure 55, on précise encore la composition des sacs. On a à gauche l'analyse du tissage et à droite celle du laminage. On constate que le spectre de droite a la raie du calcium et de l'oxygène dans des intensités non-négligeables. Cela qui signifie probablement que le polymère contient du  $\text{CaCO}_3$  (carbonate de calcium), un additif fréquemment utilisé dans l'industrie pour blanchir le plastique. En ce qui concerne la zone laminée colorée en orange, on détecte un pic pour le silicium et pour l'oxygène, signe qu'il y a du  $\text{SiO}_2$  (dioxyde de silicium) en surface du matériau.

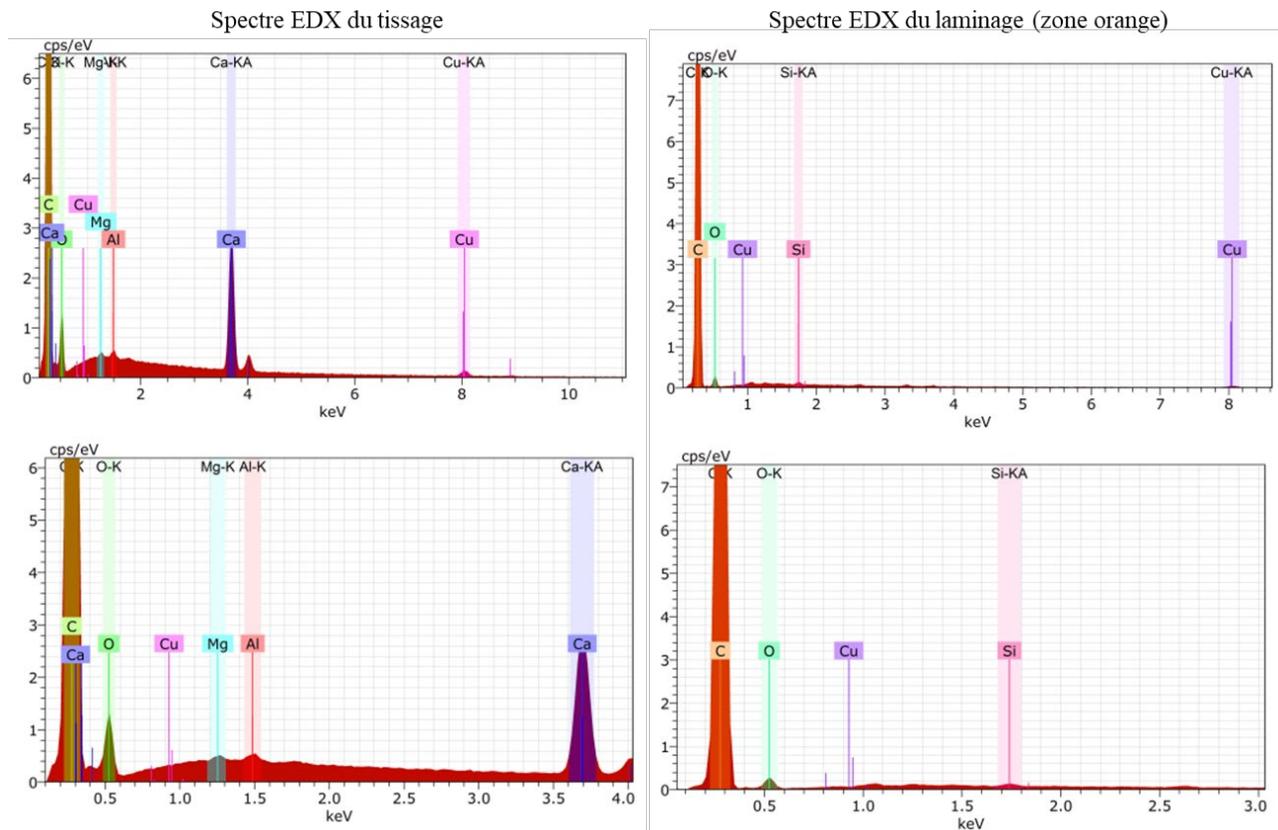


Figure 55 : Analyses par EDX de la composition des échantillons

En ce qui concerne les prises de vue au MEB, on voit sur la figure 56 la structure stratifiée du matériau, avec en haut un laminage constitué de deux couches de 35,7  $\mu\text{m}$  et en bas la structure tissée qui fait 48.3  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. Les prises de vues avec un grossissement de 100 fois montrent aussi que les deux strates n'ont pas la même structure. D'un côté, la figure 57 montre le polypropylène avec des inclusions de  $\text{CaCO}_3$  visibles en blanc sur les prises de vue. Les images montrent aussi que la matière est fortement orientée dans la direction des bandes avec des stries visibles sur les photos. Comme la géométrie des sphérolites du PP varie s'ils sont soumis à des déformations lors de leur mise en forme, alors il est très probable que les structures cristallines du tissage soient très étirées et non sphériques. La photo du laminage dans la figure 58 montre encore des dépôts de  $\text{SiO}_2$  en blanc et on remarque aussi que la matière n'est pas orientée selon une direction spécifique. Les grains du laminage et les structures cristallines sont alors plus susceptibles d'être

sphériques. De plus, une vue de coupe permet de voir à l'interface entre le tissage et le laminage une couche supplémentaire dont la composition est similaire au tissage, mais qui est en contact intime avec le laminage.

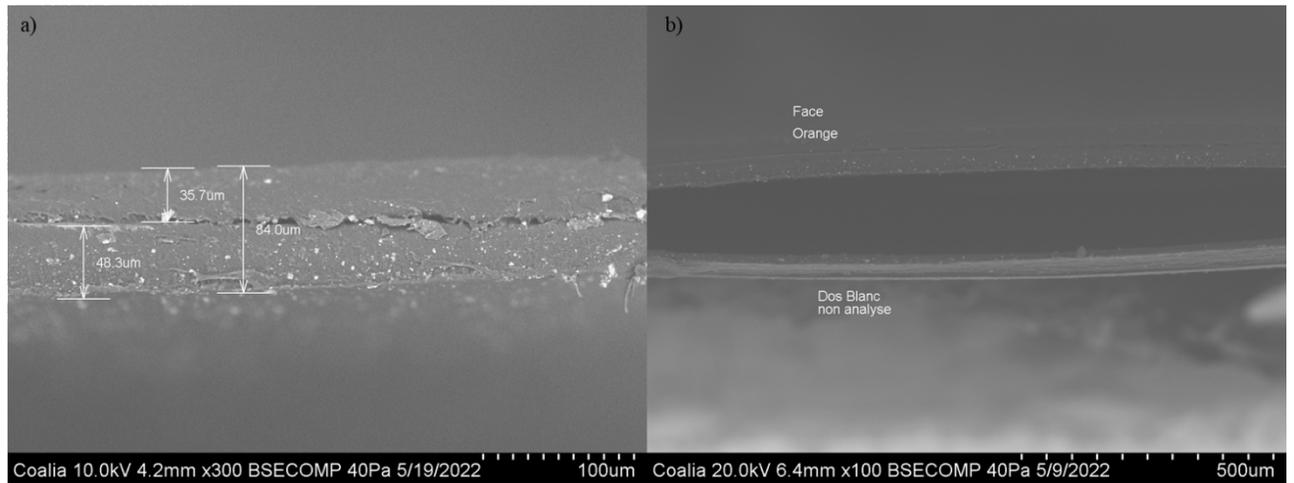


Figure 56 : Prises de vue au MEB d'un échantillon de sac (vue de coupe)

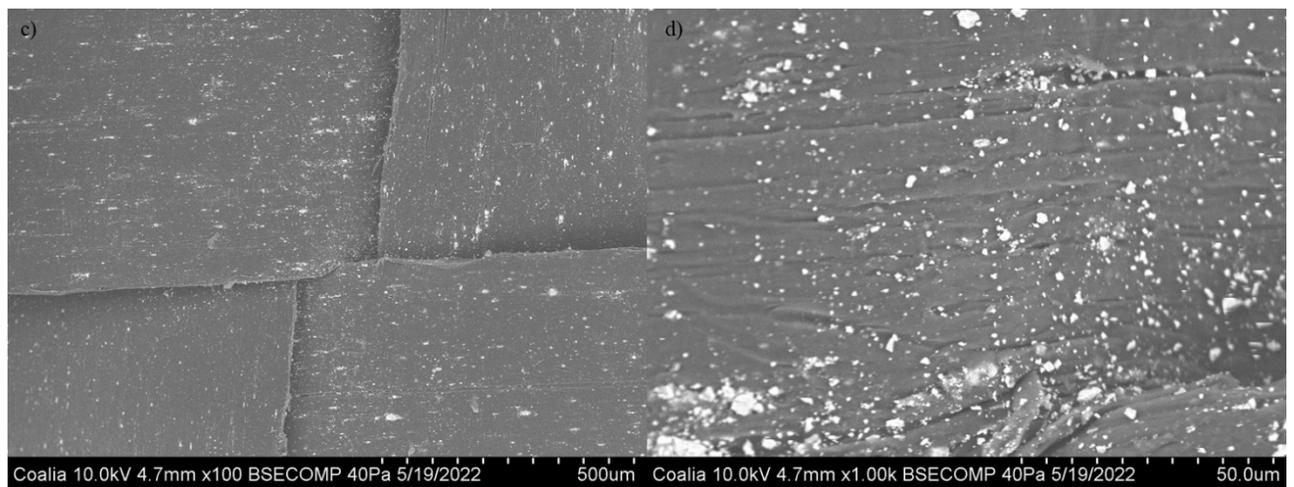


Figure 57 : Prises de vue au MEB d'un échantillon de sac (tissage en PP)

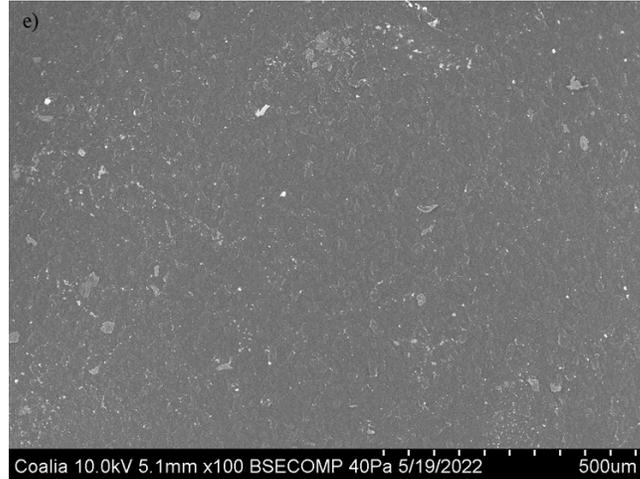


Figure 58 : Prise de vue au MEB d'un échantillon de sac (zone laminée orange)

En ce qui concerne les spectres XRD, les courbes sont disponibles en annexe du mémoire, mais on ne s'intéresse qu'aux pics d'émission pour l'exploitation des résultats. Pour celui du tissage, on retrouve les pics du PP avec en plus un pic intense à  $30^\circ$  et 4 petits pics à  $23^\circ$ ,  $31^\circ$ ,  $36^\circ$  et  $40^\circ$ . Ces cinq pics correspondent au  $\text{CaCO}_3$ . Le spectre XRD du laminage correspond aussi à un PP, mais ne contient pas de pic à  $30^\circ$ , mais deux autres pics à  $4^\circ$  et  $21^\circ$  qui peuvent correspondre au LDPE.

Pour finir, on exploite les spectres Raman puis IR pour le matériau non soudé, visibles dans l'annexe du mémoire. Pour les deux figures, la courbe orange correspond au laminage et la courbe verte correspond au tissage. Le spectre Raman du tissage correspond au spectre du polypropylène avec trois pics à  $299\text{ cm}^{-1}$ ,  $732\text{ cm}^{-1}$  et  $1102\text{ cm}^{-1}$  qui correspondent au  $\text{CaCO}_3$ . Sur le spectre du laminage, il y a plusieurs pics en plus que pour le tissage. Les principaux sont à  $761\text{ cm}^{-1}$ ,  $697\text{ cm}^{-1}$ ,  $1543\text{ cm}^{-1}$  et  $1609\text{ cm}^{-1}$  qui correspondent certainement au pigment présent dans le plastique puisqu'ils ne correspondent à aucun composant du laminage (LDPE,  $\text{SiO}_2$  et PP). Le spectre infrarouge du tissage correspond à celui d'un polypropylène, excepté pour un pic à  $860\text{ cm}^{-1}$  correspondant au  $\text{CaCO}_3$ . Le spectre infrarouge du laminage correspond majoritairement à un polypropylène, mais avec quatre pics supplémentaires. Un pic à  $1741\text{ cm}^{-1}$  correspond à une oxydation et les pics à

2849  $\text{cm}^{-1}$ , 732  $\text{cm}^{-1}$  et 720  $\text{cm}^{-1}$  sont très probablement liés au LDPE décelé avec les essais de calorimétrie.

#### 4.1.3.2 Structure soudée

On procède comme dans la partie précédente, c'est-à-dire avec des analyses successives au calorimètre, au diffractomètre, au microscope électronique à balayage, au spectroscope Raman et infrarouge. Pour commencer, les échantillons 2 et 3 indiqués dans le tableau 10 sont inexploitable, car les échantillons correspondants n'ont pas été assez soudés pour être analysés. On se concentre sur les mesures prises à partir des autres échantillons.

Les courbes obtenues au DSC, disponibles en annexe 1 du mémoire, montrent peu de différences à part des plateaux sur les deux pics principaux et des faibles pics d'enthalpie. Ces irrégularités sont symptomatiques de perturbations mineures dans la structure du matériau, puisque les strates sont mêlées et qu'avec la fusion et la recristallisation on peut trouver des cristaux plus gros et irréguliers par rapport au matériau initial. Les espèces présentes ne changent pas, donc la soudure n'affecte pas grandement la conformation des chaînes carbonées et leur structure cristalline.

En revanche, les prises de vue au MEB permettent de visualiser les soudures du dessus et de voir l'étendue de la zone soudée. On voit sur la figure 59 que la matière est poussée vers les extrémités par la roue et il y a une accumulation de matière autour de la soudure. De plus, les défauts entourés en rouge sur la figure 59 sont plusieurs amorces de ruptures sur le tour des soudures, qui se manifestent par des déchirures ou des cavités créées dans le matériau. Enfin, on voit sur la figure 60, dans les zones entourées en rouge, l'apparition de bulles par endroits, probablement générées à cause d'un trop-plein de chaleur transmis au plastique.



Figure 59 : Photographies au MEB d'échantillons soudés (exemples d'amorces de rupture)

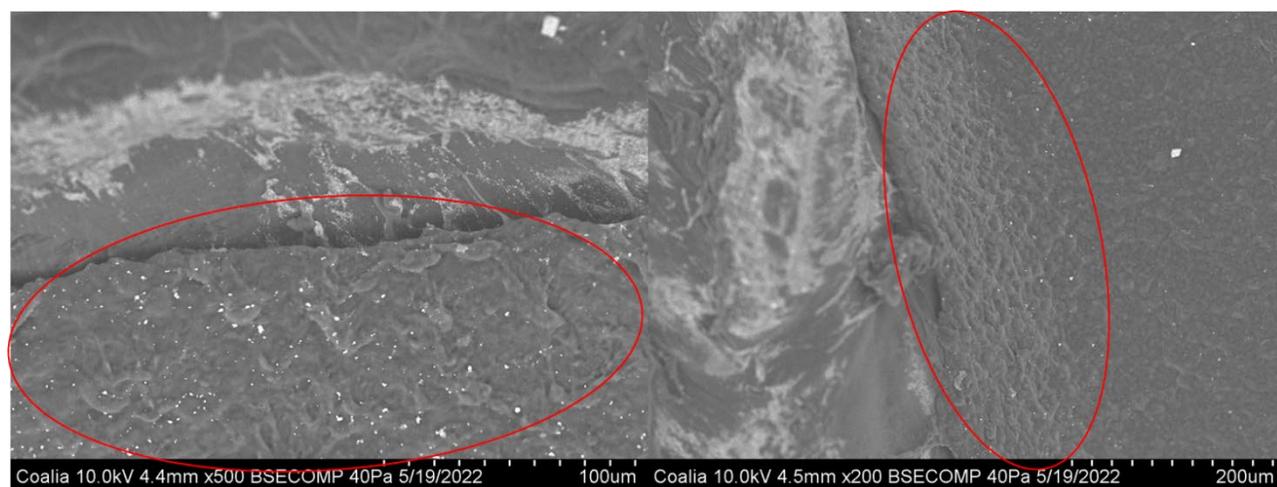


Figure 60 : Photographies au MEB d'échantillons soudés (exemples de zones dégradées)

Les spectres XRD des différentes soudures sont également dans l'annexe du mémoire. Ils sont tous semblables aux spectres combinés du tissage et du laminage, il est difficile d'interpréter les résultats au-delà de ce constat.

Les spectres Raman des soudures dans l'annexe ressemblent globalement au spectre du laminage, mais avec des intensités différentes. Il est difficile de tirer une conclusion à partir de ces résultats, puisque les intensités sont trop variables d'une analyse à l'autre. De

même, on ne peut rien déduire des courbes obtenues pour différentes épaisseurs, différentes pressions, comme dans les figures en annexe.

Sur les spectres infrarouges dans l'annexe du mémoire, on voit les analyses des échantillons 1, 4 et 7, soudés avec les mêmes paramètres. On considère qu'ils sont presque identiques et qu'ils révèlent les mêmes modifications dans le matériau : dans les trois courbes, le pic d'oxydation à  $1741\text{ cm}^{-1}$  s'est estompé alors qu'un pic à  $1595\text{ cm}^{-1}$  est visible à la place. Certaines liaisons chimiques ont changé lors de la soudure, mais le matériau n'a globalement pas changé sa conformation. Ensuite, on considère les spectres des soudures 4, 5 et 6, réalisées avec une pression de soudage différente. Pour les trois on retrouve le même phénomène que pour la courbe précédente, à la différence que le pic à  $1595\text{ cm}^{-1}$  est plus important pour la soudure 6, ce qui laisse croire que la structure chimique a été plus altérée avec une pression de soudage plus importante. En ce qui concerne les soudures 8 et 9 qui ont été réalisées avec le motif à chevrons, leurs spectres sont assez similaires aux soudures générées avec le motif à pointillés épais. Cependant, le pic à  $1741\text{ cm}^{-1}$  est toujours présent et le pic à  $1595\text{ cm}^{-1}$  n'est pas visible. On peut considérer que cela indique que la structure chimique est moins altérée avec le motif à chevrons qu'avec l'autre roue.

#### 4.1.3.3 Défauts

D'après les paragraphes précédents, plusieurs caractéristiques initiales du matériau et après soudure coïncident avec certains défauts structurels des soudures.

D'après les prises de vue au MEB montrées précédemment, les zones soudées sont désordonnées comparé à la structure initiale du matériau. Le passage de la roue sur la matière répartit inégalement le plastique dans la ZAT, avec des accumulations de matière sur les côtés. C'est en partie pour cette raison que les zones soudées sont fines, car la matière a été déplacée en périphérie de la soudure. De plus, les arêtes aiguës des roues ont détérioré mécaniquement le matériau en générant des amorces de rupture là où il y a des concentrations de contraintes. De plus, les prises de vue au microscope nous ont permis de visualiser que l'organisation et la régularité du PP est bouleversée dans la soudure car on ne retrouve pas

d'orientation franche du matériau, mais au contraire des zones anarchiques avec des bulles, des différences de texture et des cavités.

La conjonction de l'écrasement de la roue et de l'échauffement de la matière est à l'origine des défauts de structure dans le matériau. Cependant on n'a pas la capacité de dire si les bulles et cavités visibles dans la ZAT sont causées par une dégradation mécanique ou thermique, même si l'organisation du matériau et le rendu rigide des échantillons prouvent très probablement que le matériau est oxydé, on n'a pas la possibilité de le prouver.

## **4.2 DISCUSSION**

Dans la seconde partie de ce chapitre, on confronte les résultats de l'étude selon les trois critères d'évaluation. On commence par relier ce qu'on déduit des tests mécaniques par rapport à l'apparence des soudures. Par la suite, on compare l'analyse macroscopique à l'évaluation microscopique du procédé. On termine le chapitre par plusieurs pistes d'amélioration de l'étude et la comparaison des résultats du projet à ceux des travaux antérieurs.

### **4.2.1 Confrontation selon les trois critères d'évaluation**

#### **4.2.1.1 Tests de résistance par rapport à l'analyse visuelle**

On compare les interprétations des tests mécaniques et de l'analyse visuelle des soudures selon plusieurs axes. Cela comprend l'effet du motif, les paramètres les plus influents, les combinaisons de paramètres qui donnent les meilleures et les pires soudures.

Le design du motif joue un rôle fondamental dans la qualité des soudures, que ce soit pour leur résistance mécanique ou pour leur apparence. En effet, les résultats globaux indiquent qu'un motif fin va souder avec plus d'intensité qu'un motif plus large et étalé et qu'il faut trouver un équilibre entre avoir une soudure trop marquée qui risque de dégrader le matériau et un manque de soudabilité qui ne concentre pas assez l'énergie dans la matière.

Concernant l'effet des paramètres, une soudure pas assez marquée se voit et se ressent dans la résistance des fermetures. Il y a un minimum d'énergie et de pression à appliquer au matériau pour garantir un contact intime et un échauffement suffisant. Pour la machine, cela correspond à une pression de 0,4 MPa pour une épaisseur de contact de 1mm, la puissance au maximum et une vitesse de 0.2 m/s. Cependant, une fois qu'on parvient à bien souder les sacs, alors augmenter l'énergie de soudure en diminuant la vitesse et en augmentant la pression provoque peu d'améliorations jusqu'à ce qu'un point de rupture soit atteint et que le plastique se dégrade excessivement. De plus, les conditions de soudure sont affectées par les paramètres si l'écartement est trop réduit, que le motif est trop fin et que la vitesse de soudure est trop importante, alors le risque d'arrachement est très présent. De plus, si on amorce mal la soudure, si on l'arrache ou la fait dévier, cela se ressent dans la qualité de la soudure. En effet, si la fermeture doit rompre à un endroit ce sera sur une irrégularité ou à proximité.

En revanche, une soudure peu marquée au niveau des goussets et de la dernière couche est bénéfique à la résistance des sacs, même si cela signifie que les goussets vont se déployer et que la soudure interne va se rompre. Une telle situation garantit la bonne tenue du pli et de la soudure du dessus, ce qui permet de contenir le produit. De surcroît, cela permet d'avoir un matériau plus souple et qui sera moins sensible aux chocs à répétition.

#### 4.2.1.2 Analyse macroscopique par rapport à l'analyse microscopique

Les constats réalisés à chaque échelle de mesure corrélerent entre eux pour plusieurs aspects : cela implique le motif de soudure, les réglages de la machine et les défauts de soudure.

On sait en quoi le motif de la roue impacte la qualité de la fermeture : c'est son design qui détermine l'étendue de la zone soudée et les amorces de ruptures. Si le motif est réduit, alors l'énergie de soudure est concentrée sur une portion réduite du sac et on retrouve plus d'amorces de rupture. De même, un motif plus large bien orienté permet une modification du matériau moins brutale et une soudure plus uniforme et plus souple. Il est pertinent de

faire le compromis entre une bonne pénétration dans la matière comme pour les chevrons et un apport énergétique qui assure une soudure en profondeur, comme pour les motifs avec des pointillés.

Les résultats expérimentaux justifient également l'effet des paramètres sur les soudures. Une fois que le matériau est soudé, il ne faut pas augmenter l'énergie transmise à la matière. Certes, le matériau est davantage soudé et les strates compressées entre elles, mais cela implique aussi d'affiner la soudure sans en améliorer significativement la résistance. Au contraire, plus les réglages de la machine seront extrêmes et plus on risque de détériorer le matériau. De plus, l'aspect craquelé et fragile des soudures correspond aux zones soudées fortement qui ont été exposées à l'air ambiant lors du soudage. C'est cohérent avec les analyses microscopiques qui montrent que le plastique a réagi avec l'oxygène contenu dans l'air et s'est oxydé. C'est un phénomène à proscrire, car c'est ce qui rend le matériau fragile en surface et c'est pour cela qu'il faut un apport énergétique contrôlé dans le matériau.

On peut aussi estimer que les résultats globaux sont cohérents pour la différence de performances entre le test en cisaillement et en arrachement. D'un côté, on a un matériau très orienté, et de l'autre, un matériau à basse densité dont les grains de matière sont plus sphériques, ce qui peut expliquer la différence de résultats constatée. Puisque le LDPE fond à une température inférieure au PP, que sa matière est moins orientée et qu'il n'est pas tissé, alors il a une meilleure soudabilité que le tissage de PP. Cela explique que les zones tissées qui sont moins bien soudées que les zones laminées. De plus, la bande sollicitée lors du test d'arrachement sur la dernière couche est celle qui est directement en contact avec la sonotrode lors de la soudure, là où l'amplitude de l'onde transmise est la plus faible. C'est donc logique que la dernière bande soit moins bien soudée et donc que la soudure interne du sac ait tendance à rompre avant le reste de la fermeture.

## 4.2.2 Critique des résultats obtenus

### 4.2.2.1 Points d'amélioration

Pour améliorer la qualité des mesures, on peut commencer par limiter les sources d'erreur : faire attention à l'état initial des sacs, préparer les bandes avec plus de rigueur, mieux contrôler la mise en position des bandes entre elles. De même, les réglages peuvent être mieux mesurés et maîtrisés. En outre, les tests mécaniques sont encore à améliorer, que ce soit en changeant la cellule de charge ou en ralentissant la vitesse de traction de la machine de test sur bande. Il serait aussi pertinent d'être plus rigoureux pour les tests de chute et la prise des données pour l'analyse visuelle. De plus, les résultats sont moins visibles parce qu'il y a beaucoup de facteurs à tester comparativement au nombre de données qu'on pouvait obtenir lors du projet. Dans ce cas, la qualité des données et la visibilité des résultats sont aussi altérées par ce problème. Il faut soit diminuer le nombre de facteurs à étudier soit augmenter le nombre de données à produire pour gagner en précision.

Les manipulations et les prises de mesure sont aussi biaisées sous certains aspects, car elles sont faites manuellement. Comme ce sont des processus réalisés à la main, ils ne sont pas aussi répétables que cela pourrait être avec un système automatisé et contrôlé.

Travailler la conception de la soudeuse est aussi pertinent pour améliorer la répétabilité du processus et un meilleur contrôle des paramètres de soudure. La conception de la soudeuse peut aussi comprendre un moyen de réguler la température de refroidissement pour améliorer la cristallisation du PP. Enfin, on peut penser à protéger les échantillons de l'oxydation par un jet d'air contrôlé pauvre en oxygène et en eau.

En ce qui concerne la conception des sacs, il faut déjà être plus attentif à la compatibilité des strates entre elles, diminuer taille des fibres et adapter les réglages de la machine lorsqu'il faut souder les goussets. De plus, une meilleure connaissance de la composition des sacs utilisés permettrait d'avoir de meilleures données, notamment à propos des colorants contenus dans le laminage et de la régularité du tissage.

Pour approfondir l'étude, on peut explorer l'effet d'autres facteurs : la fréquence, la composition des sacs et un design du motif de soudure plus poussé. En particulier, on pourrait étudier la soudure des sacs avec un motif dont on peut contrôler les concentrations de contraintes.

#### 4.2.2.2 Comparaison par rapport aux travaux antérieurs

Le bilan de ce projet de recherche est cohérent avec les résultats des travaux antérieurs. Les conclusions sont similaires en ce qui concerne les facteurs d'application, la dépendance des soudures à la géométrie et à l'état de surface du joint de soudure, l'importance des ajustements dans le dispositif de soudure, l'effet des matériaux soudés et enfin l'environnement dans lequel on effectue les soudures.

Plusieurs projets de recherche arrivent à la même conclusion : que les facteurs d'application sont l'amplitude, la pression et le temps de soudure. Il faut atteindre l'amplitude de déformation maximale pour fournir le plus d'énergie à la matière. Il faut aussi augmenter le temps de soudure et la force de soudure pour avoir un joint de qualité. Cela revient aussi à préférer une faible fréquence de vibration, 20 kHz jusqu'à 15 kHz au mieux, car plus on diminue la fréquence de la vibration plus on peut augmenter son amplitude. De plus, la plupart des résultats montrent que pour avoir une bonne fermeture on doit atteindre un point de soudure optimal avant que la qualité de la matière diminue de façon abrupte. Donc dès qu'on arrive à un matériau soudé, il ne faut plus chercher à augmenter l'énergie de soudure par les paramètres (Conselvan, 2017 ; Daniels, 1965 ; Shi & Little, 2000 ; Tolunay *et al.*, 1983 ; van Oordt *et al.*, 2014 ; Zhang *et al.*, 2005).

Certains travaux concordent aussi avec le fait qu'un motif discontinu est favorable à une fermeture de qualité. Il faut aussi privilégier une surface de soudure étendue, sur le même plan de soudure et qui n'étale pas excessivement les vibrations dans le matériau. Comme tout, c'est une question d'équilibre entre la concentration de l'énergie de soudure dans le matériau et une répartition des sollicitations sur l'assemblage (Nguyen *et al.*, 2020 ; Seif & Nasr, 2016 ; Vujasinović *et al.*, 2007).

Les résultats de l'étude et les travaux antérieurs sont aussi cohérents en ce qui concerne l'impact de la géométrie de la zone à souder. Il faut privilégier un petit contact intime au début, sur une surface uniforme et contenue dans un même plan. De plus, une surface de contact rugueuse est bénéfique si elle augmente le coefficient de friction à l'interface. C'est pour cela que les zones tissées qui sont irrégulières et en relief sont moins soudées que les surfaces laminées (Mediana, 2018 ; Troughton, 2008).

En ce qui concerne les matériaux constitutifs des sacs, les analyses microscopiques et les travaux antérieurs s'accordent encore. Déjà le PP et le PE sont certes similaires en termes de structure, mais ont un point de fusion trop éloigné pour être compatible. De plus, les analyses ont montré que la soudure n'a pas permis de créer de nouveaux groupes chimiques dans le matériau à la différence des zones exposées à l'air à cause de l'oxydation. De plus, le procédé d'obtention du tissage et du laminage influence la structure microscopique du matériau et par conséquent la soudabilité du matériau. En effet, un matériau compact et étiré résiste mieux à l'oxydation, mais est moins réceptif à la soudure ultrasonique. Les additifs présents dans les échantillons dans les proportions où on les a retrouvés peuvent n'avoir aucun effet sur la soudure ou un effet bénéfique à la transmission des vibrations et aider à la mise en forme du matériau. De plus, les colorants sont certes gênants pour les analyses, mais ne perturbent pas la soudabilité des matériaux tant qu'ils ne migrent pas à la surface et ne perturbent pas la rugosité des interfaces qu'on souhaite souder (Bach *et al.*, 2012 ; Conselvan, 2017 ; Troughton, 2008).

Mentionnons également que les conditions de soudure sont influencées par l'exposition à l'eau, à la présence de moisissures ou lorsque le matériau est exposé à l'oxygène contenu dans l'air. En effet, lorsque le matériau est fondu, une petite baisse de température le fait se solidifier et cristalliser très vite. En plus de cela, le PP à l'état fondu est vulnérable aux perturbations extérieures causées par l'eau ou par l'oxygène qui le font figer et vieillir en surface. Ces nouvelles liaisons créées en surface sont à l'origine de ce changement de texture et des cavités dans la ZAT. Donc, il faut limiter l'exposition du matériau fondu à l'air ou à

l'eau et avoir un refroidissement le plus lent possible pour garantir une belle soudure (Boles, 2012 ; Troughton, 2008).



## CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans cette étude, on s'est intéressé au procédé de soudure ultrasonique pour fermer des sacs en polypropylène tissé. L'étude est originale parce qu'actuellement ce procédé n'est pas utilisé dans l'industrie pour cette application. Cette technologie est répandue notamment dans l'industrie de l'ensachage pour l'agroalimentaire pour de bonnes raisons. Ce type de dispositif est simple à comprendre, rapide, peu dangereux et peut produire des soudures de qualité à condition qu'il soit correctement utilisé. Puisque la soudure US est déjà démocratisée pour souder des structures régulières aux dimensions réduites, on veut pousser son potentiel à un contexte d'application plus compliqué. La problématique du projet consiste à étudier la pertinence de la soudure par ultrasons des sacs en WPP. Ils sont complexes à souder, car ils sont plus irréguliers, plus grands et sont soumis à des sollicitations mécaniques plus importantes.

Au terme du projet, on conclut que les sacs à gueule ouverte en WPP peuvent être globalement fermés par ultrasons selon les trois critères d'évaluation de l'étude. Les sacs testés résistent aux chocs, ont une apparence acceptable et ont une structure microscopique qui n'a pas été excessivement dégradée. Cela est possible à condition de contrôler les paramètres d'applications et de trouver un point de fonctionnement convenable. Le point majeur est qu'il est difficile de trouver l'équilibre entre tous les facteurs opératoires, que ce soit les réglages de la machine, le type de sac ou la mise en position de la zone à souder. Cependant, il apparaît que la qualité des soudures augmente si on augmente la puissance de soudage au maximum, on ralentit la vitesse de soudure et on soumet les épaisseurs à souder à une pression d'application suffisamment forte pour garantir le contact intime à l'interface. De plus, même si on parvient à souder correctement les matériaux du sac, leur composition et leur structure ne s'avèrent pas idéales. En effet, on a vu que les strates se soudent entre elles, qu'elles se mêlent difficilement et que la présence de deux polymères avec des températures de fusion espacées perturbe la soudure, que la mise en forme et l'orientation de

la matière dans les bandes ne sont pas optimales pour les souder. Même si on a pu constater des défauts de soudure, des zones oxydées et des surfaces trop sollicitées par le dispositif, on peut générer une soudure fonctionnelle même si elle n'est pas optimale.

Pour poursuivre l'étude, il serait pertinent d'aborder le problème en construisant un modèle théorique et de pousser l'étude et la conception d'un dispositif de soudure amélioré qui permettrait de mieux contrôler le procédé et d'éliminer les variations causées par les opérations manuelles. Le modèle permettrait de mieux comprendre l'importance des différents facteurs et de faciliter la conception du dispositif. La conception et la fabrication d'un prototype est certainement le meilleur moyen d'adapter le procédé aux besoins du secteur et de mieux maîtriser son fonctionnement. Cela permettrait également de pouvoir contrôler et mesurer les paramètres du procédé et de ne pas être limité par les équipements qui ne sont pas prévus pour des travaux de recherche industrielle. De plus, il est de bon ton d'améliorer la qualité des mesures, surtout en ce qui concerne la structure et la composition des échantillons. On peut notamment étendre l'expertise à une plus grande gamme de sacs WPP et aussi procéder à des analyses sur un matériau décomposé. Cela permet de séparer le comportement du tissage, du laminage, des colorants et des additifs.

## ANNEXE 1

Cette annexe contient les courbes obtenues pour l'analyse microscopique des échantillons et des soudures. Ces mesures servent à compléter les tests de résistance et l'analyse visuelle des échantillons en proposant une étude des soudures à une autre échelle. Il y a des courbes de calorimétrie, des spectres de XRD, des spectres Raman et enfin des spectres FT-IR. Les courbes sont traitées et exploitées dans la dernière partie du chapitre 4 de ce mémoire.

### Courbes de calorimétrie

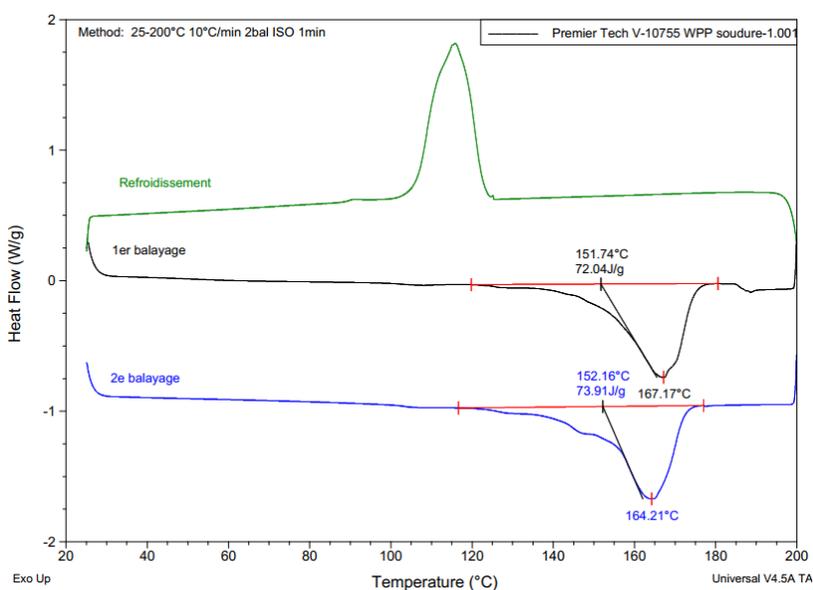


Figure 61 : Calorigramme de l'échantillon soudé 1

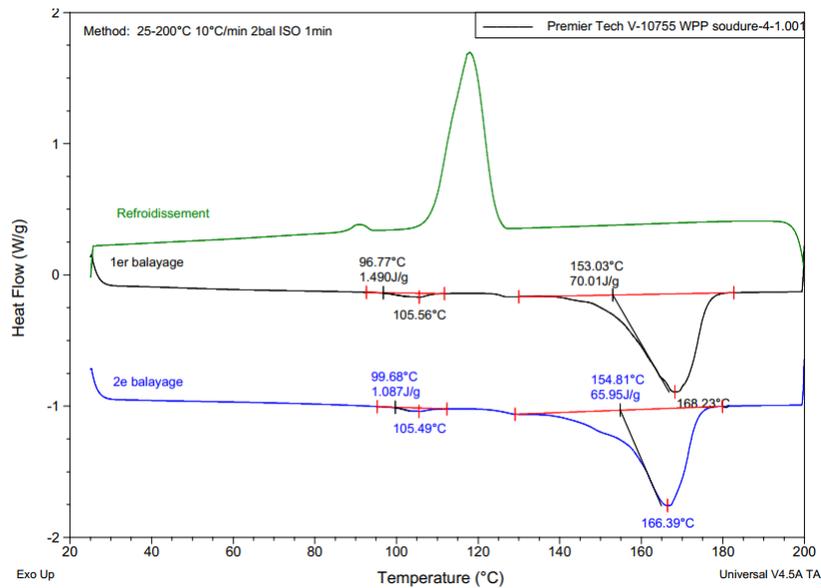


Figure 62 : Calorigramme de l'échantillon soudé 4

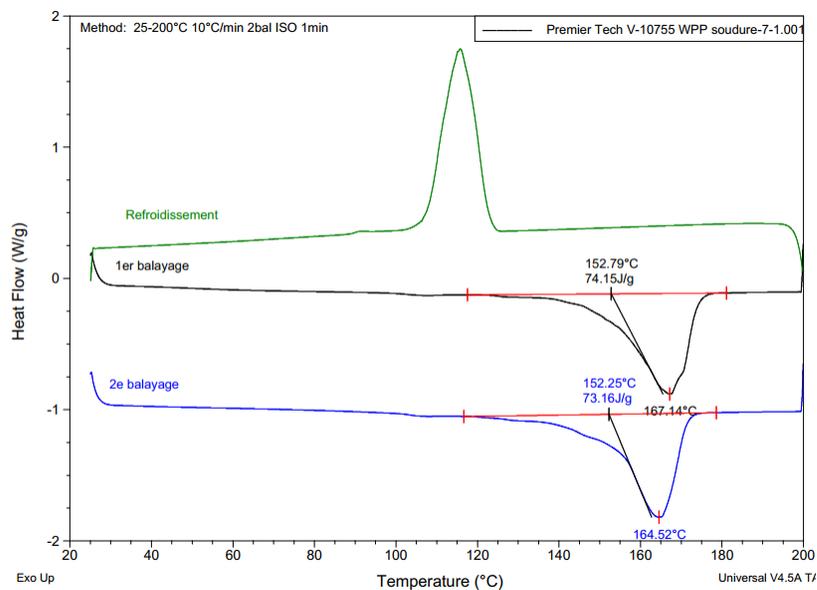


Figure 63 : Calorigramme de l'échantillon soudé 7



## Courbes de XRD

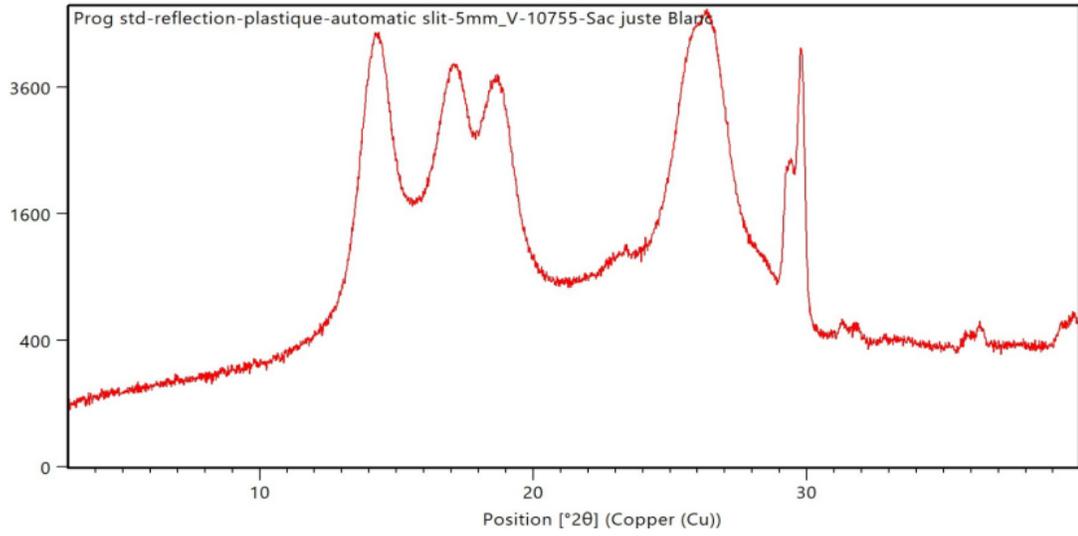


Figure 64 : Courbe XRD du tissage (avant soudure)

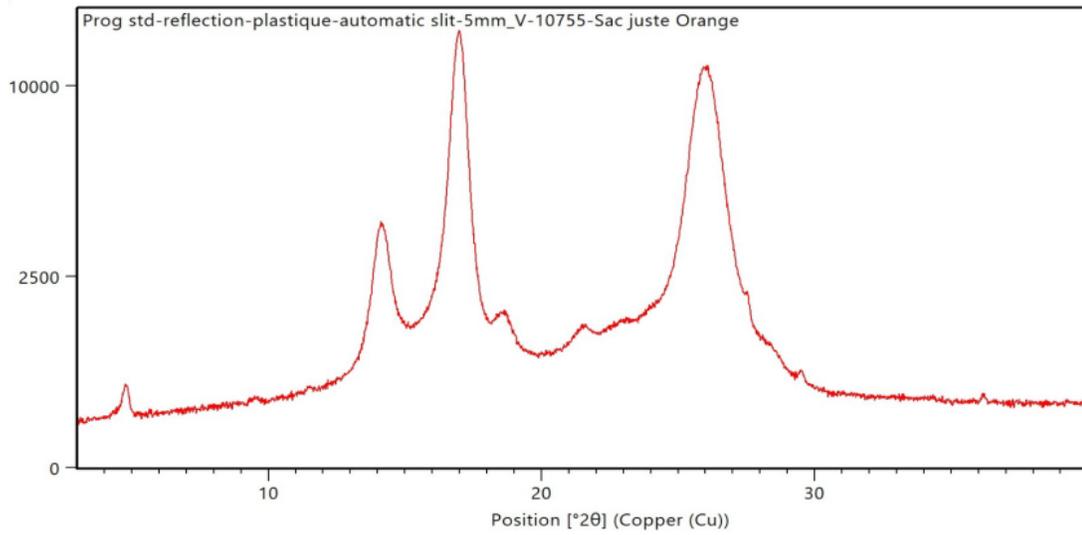


Figure 65 : Courbe XRD du laminage (avant soudure)

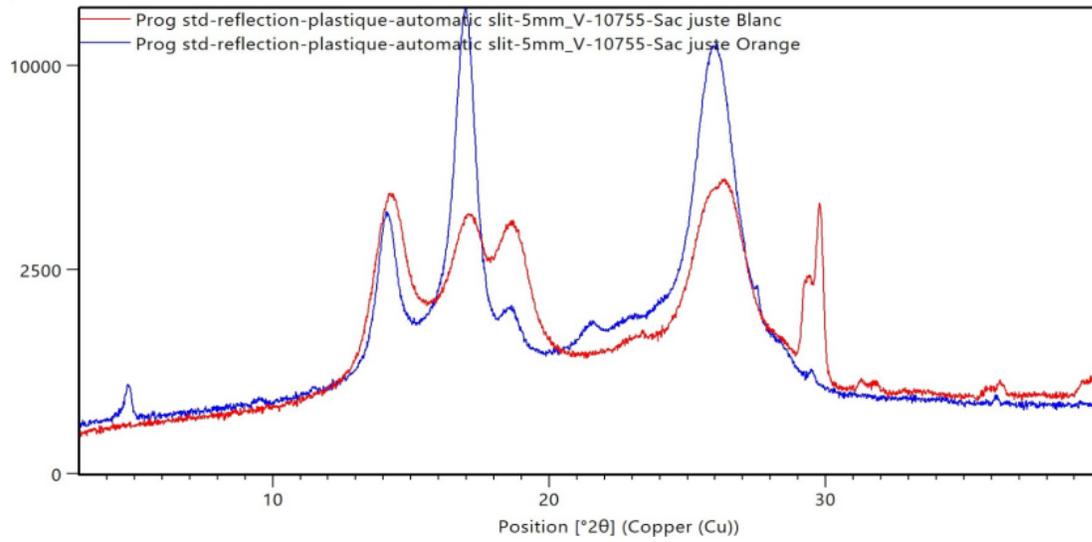


Figure 66 : Courbes XRD, courbe du laminage et du tissage (avant soudure)

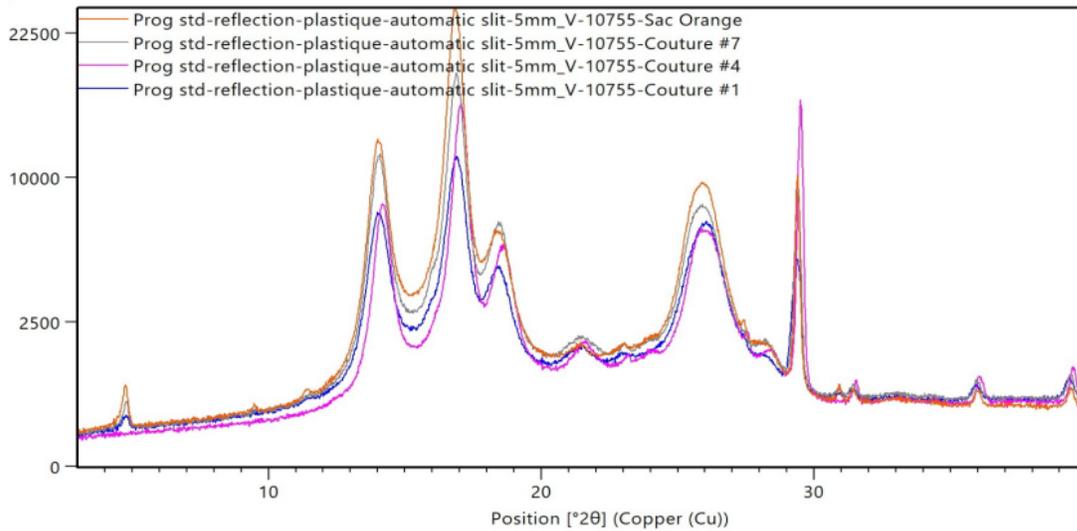


Figure 67 : Courbes XRD, soudures 1, 4, 7

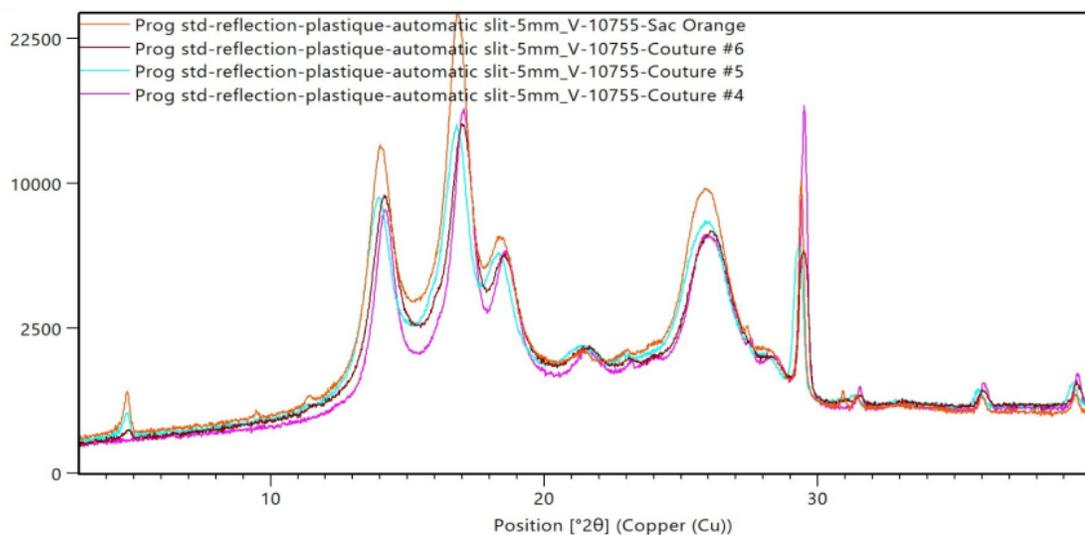


Figure 68 : Courbes XRD, soudures 4, 5, 6

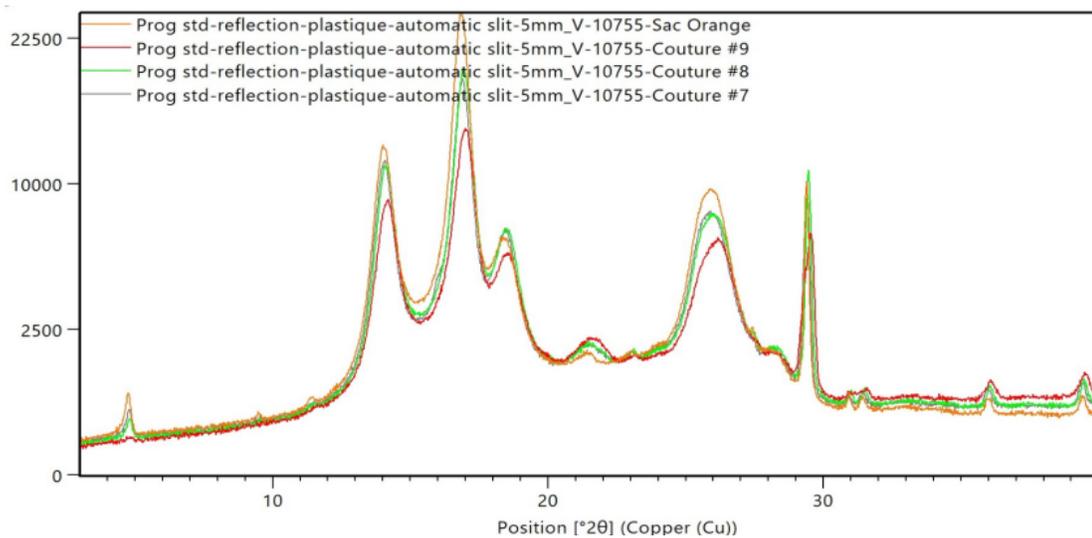


Figure 69 : Courbes XRD, soudures 7, 8, 9

## Spectres Raman

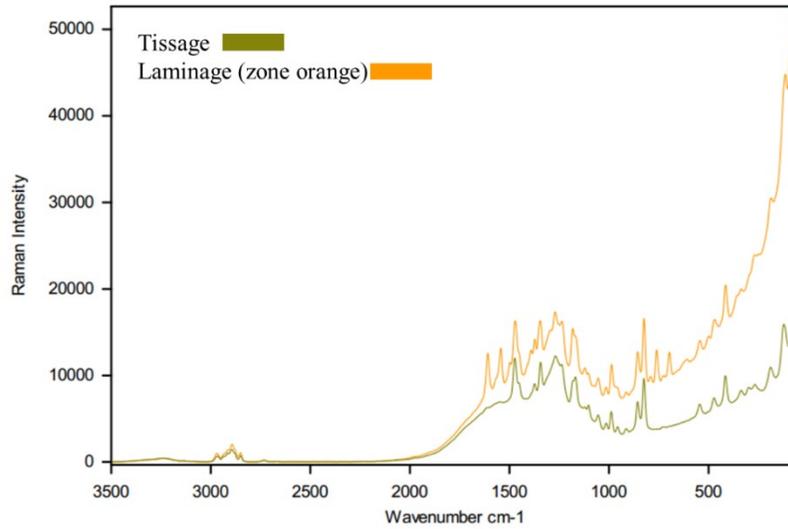


Figure 70 : Spectres Raman du tissage et du laminage (avant soudure)

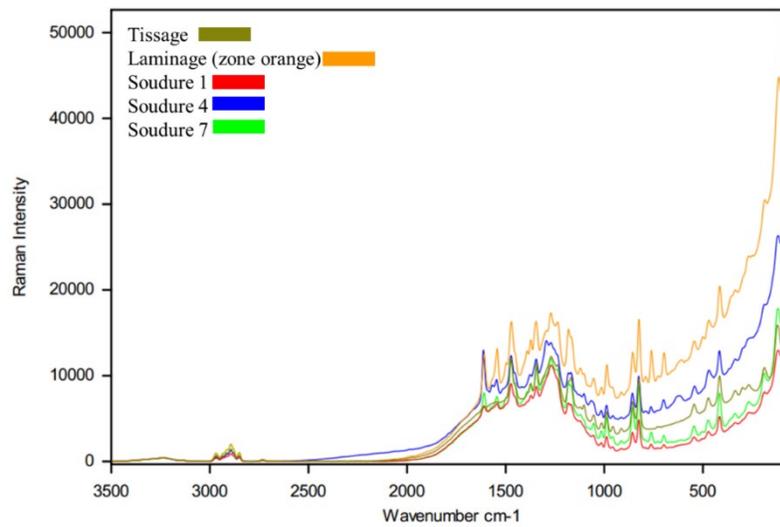


Figure 71 : Spectres Raman, soudures 1, 4, 7

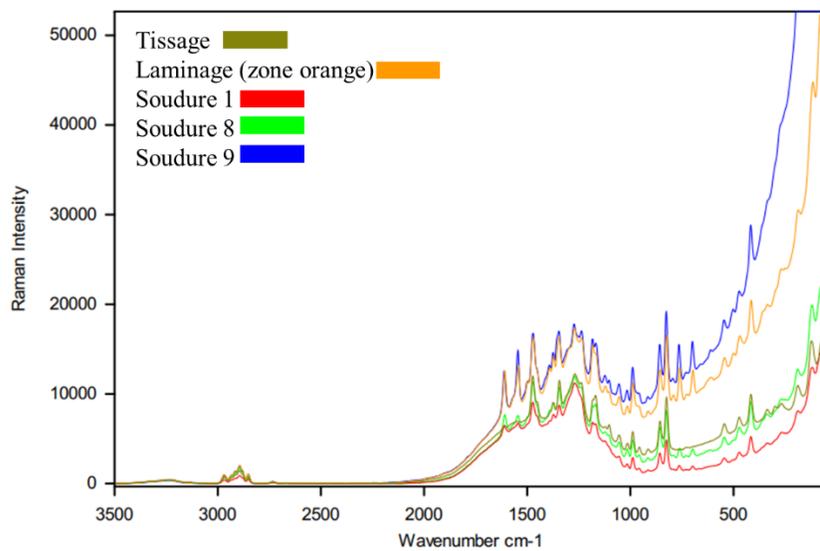


Figure 72 : Spectres Raman, soudures 1, 8, 9

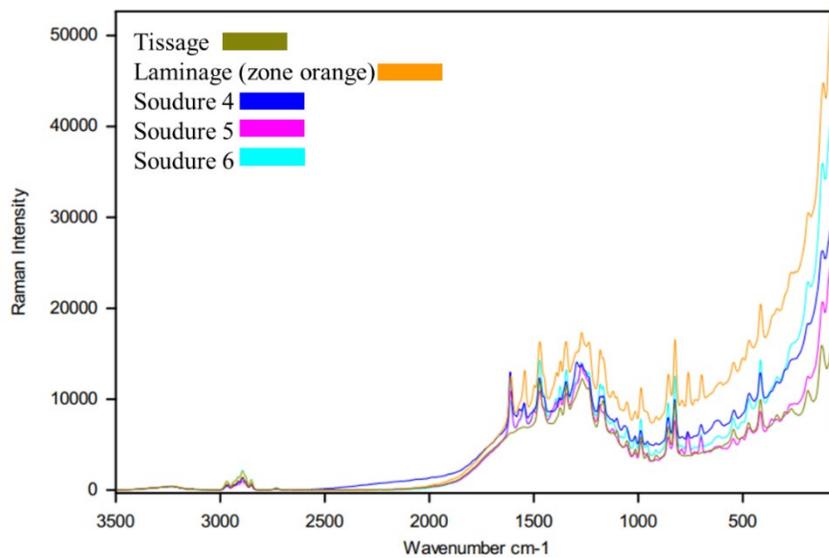


Figure 73 : Spectres Raman, soudures 4, 5, 6

### Spectres FT-IR

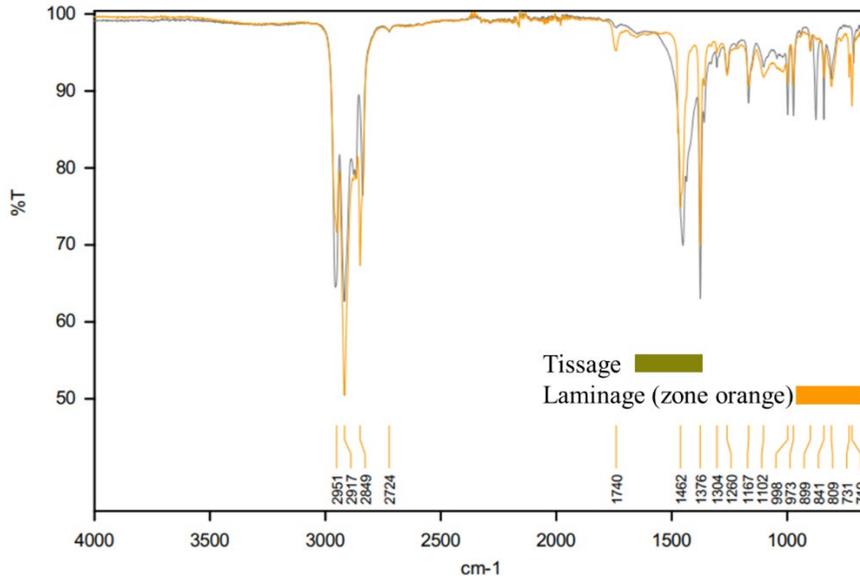


Figure 74 : Spectres FT-IR du tissage et du laminage (avant soudure)

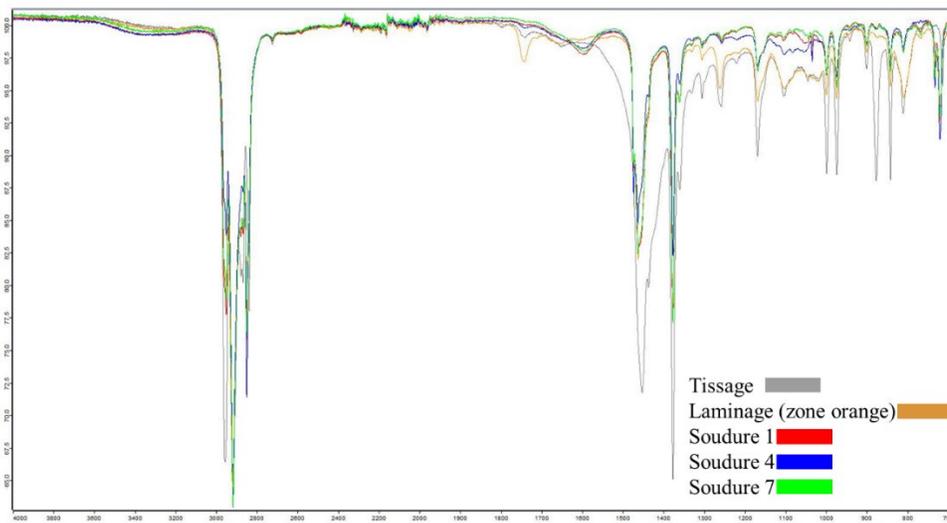


Figure 75 : Spectres FT-IR, soudures 1, 4, 7

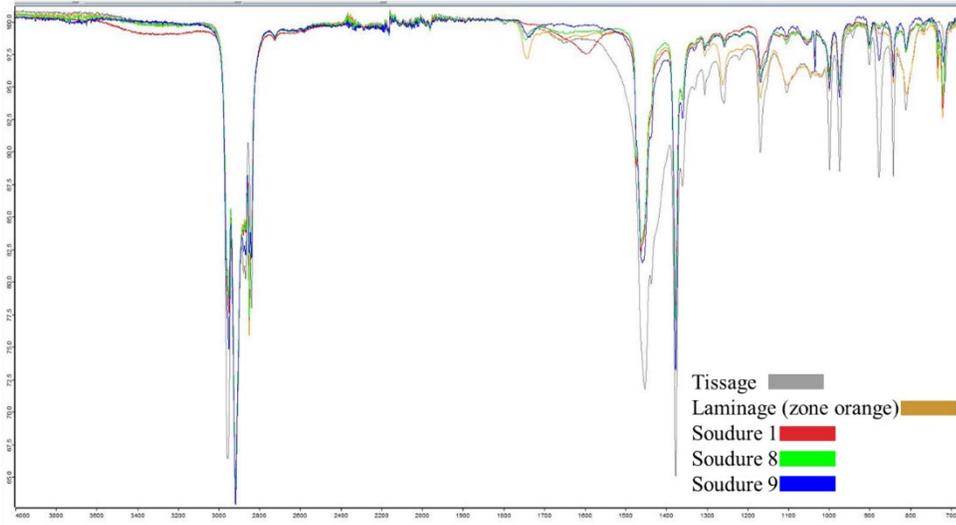


Figure 76 : Spectres FT-IR, soudures 1,8, 9

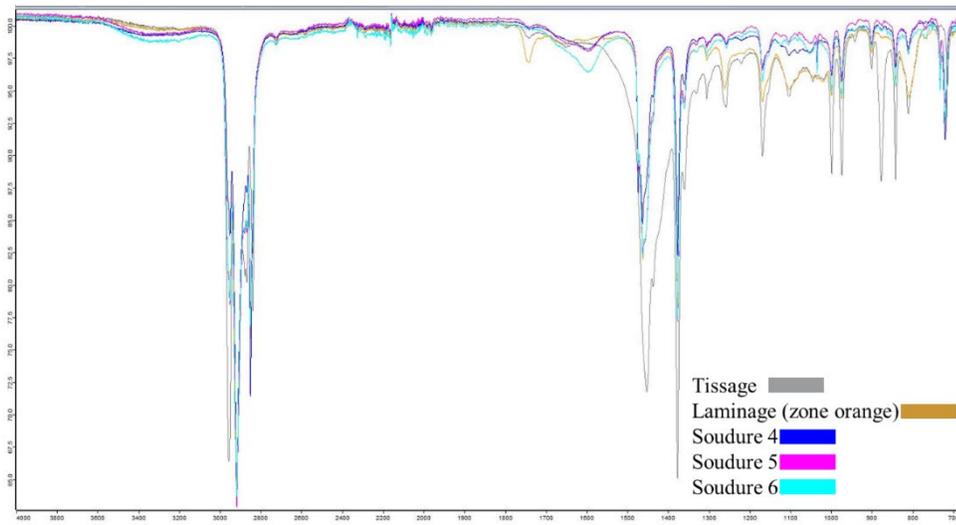


Figure 77 : Spectres FT-IR, soudures 4, 5, 6

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ageorges, C., Ye, L., & Hou, M. (2001). Advances in Fusion Bonding Techniques for Joining Thermoplastic Matrix Composites: a Review. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 32(6), 839-857.
- Akkerman, R. (2005). Laminate mechanics for balanced woven fabrics. *Composites Part B: Engineering*, 37(2-3), 108-116.
- Alcock, B., Cabrera, N. O., Barkoula, N. M., Spoelstra, A. B., Loos, J., & Peijs, T. (2007). The mechanical properties of woven tape all-polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(1), 147-161.
- American Society for Testing and Materials. (2022). Standard Test Method for Failure in Sewn Seams of Woven Fabrics (ASTM D1683).
- Amza, G., & Drimer, D. (1976). The design and construction of solid concentrators for ultrasonic energy. *Ultrasonics*, 14(5), 223-226.
- Asokan, V., & Prasanna, V. (2021). Optimization of ultrasonically welded High-density polyethylene with medium density polyethylene. SRM Institute and technology. <https://orcid.org/0000-0002-8778-3030>.
- Bach, S., Thürling, K., & Majschak, J. P. (2012). Ultrasonic Sealing of Flexible Packaging Films—Principle and Characteristics of an Alternative Sealing Method. *Packaging Technology and Science*, 25(4), 233-248.
- Benatar, A., & Gutowski, T. G. (1989). Ultrasonic welding of PEEK graphite APC-2 composites. *Polymer Engineering & Science*, 29(23), 1705-1721.
- Benatar, A. (2015). Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites. In *Power ultrasonics* (pp. 295-312). Woodhead Publishing.
- Bhat, G. S., Jangala, P. K., & Spruiell, J. E. (2004). Thermal bonding of polypropylene nonwovens: effect of bonding variables on the structure and properties of the fabrics. *Journal of Applied Polymer Science*, 92(6), 3593-3600.
- Bhatia, A. B. (1985). *Ultrasonic absorption: an introduction to the theory of sound absorption and dispersion in gases, liquids, and solids*. Courier Corporation.

- Bhudolia, S. K., Gohel, G., Leong, K. F., & Islam, A. (2020). Advances in ultrasonic welding of thermoplastic composites: a review. *Materials*, 13(6), 1284.
- Billon, N., & Bouvard, J. L. (2015). Propriétés et comportement mécanique des polymères thermoplastiques. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Blayo, A. (2007). Formulation des encres pour l'impression. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Boles, K. (2012). Examination of alternative fabric joining techniques compared to traditional sewing. *McNair Scholars Research Journal*, 5(1), 3.
- Brucker. (2017). Senterra II. <http://www.bruker.com/optics>
- Bueno, M. A. (2015). Tribologie des textiles – frottement, usure et propriétés mécaniques. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Caramaro, L. (2005). Fibres et fils à usage technique. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Chand, S., Bhat, G. S., Spruiell, J. E., & Malkan, S. (2001). Structure and properties of polypropylene fibers during thermal bonding. *Thermochimica Acta*, 367, 155-160.
- Chomon, P. (2006). Les complexes souples ou rigides utilisés en emballage. Ed. Techniques Ingénieur.
- Clark, J. P. (2013). The Versatility of Ultrasonic Energy. *food technology*, 67(1), 68-70.
- Combette, P., & Ernoult, I. (2005). Physique des polymères. Presses inter Polytechnique.
- Conselvan, A. (2017). Technology and innovation in food packaging. Mémoire de maîtrise, Université de Padoue. Archive [https://thesis.unipd.it/bitstream/20.500.12608/24726/1/Conselvan\\_Alberto\\_11062\\_11.pdf](https://thesis.unipd.it/bitstream/20.500.12608/24726/1/Conselvan_Alberto_11062_11.pdf)
- Cosme, D. M. (2013). La soudure par ultrasons (US) au quotidien. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Cosme, D. M. (2013). Choisir la soudure par ultrasons (US). Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Coulon, D. (2008). Matériaux d'emballage flexibles multicouches – modalités de choix et applications. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Crist, B., & Schultz, J. M. (2016). Polymer spherulites : A critical review. *Progress in Polymer Science*, 56, 1-63.

- CTAC Conseil de la transformation agroalimentaire et des produits de consommation (s.d.). Guide de l'emballage alimentaire.
- Daniels, H. P. C. (1965). Ultrasonic welding. *Ultrasonics*, 3(4), 190-196.
- Darque-ceretti, E. (2016). Étude et analyse des surfaces de polymères solides – propriétés physicochimiques. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- David, J., & Cheeke, N. (2017). Fundamentals and applications of ultrasonic waves (Ed. 2) CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com> (consulté en février 2022)
- Delaunay, Y. (1998), Sécurité des aliments et emballages. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Dridi, S. (2010). Essais de caractérisation des structures tissées. Thèses de école centrale de Lyon.
- Durling, E. W. (2009). Flexible packaging printing process overview. Consumer Packaging Solutions for Barrier Performance Course.
- Duval, C. (2004). Polypropylènes (PP). Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Emerson Industrial Automation – Branson. (2013). Ultrasonic Horn Catalog. <http://www.bransonultrasonics.com> (consulté en mai 2021)
- Espinoza Ori' as, A. A., & Renaud, J. E. (2004, January). An optimization study of the ultrasonic welding of thin film polymers. In International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Vol. 46946, pp. 75-84).
- Fayolle, B. (2005). Vieillessement physique des matériaux polymères. Ed. techniques de l'ingénieur.
- Fiscus, D., Doufas, A., & Datta, S. (2017). Polyolefins. In Springer Handbook of Petroleum Technology (pp. 1081-1116). Springer, Cham.
- Fischerbein Company. (s.d.). Les solutions pour la fermeture des sacs à gueule ouverte. <https://www.fischbein.com/brochures/> (consulté en juillet 2021)
- Foster, B. (s.d.). Adhesion in extrusion coating and laminating – the importance of machine variables. Mica corporation.
- Fournisam. (s.d.). Spécialisé dans divers types de pièces machine. Brochure commerciale. <https://fournisam.com/nos-produits/> (consulté en février 2021)

- Ghosh, S., & Reddy, R. (2009). Ultrasonic sealing of polyester and spectra fabrics using thermo plastic properties. *Journal of applied polymer science*, 113(2), 1082-1089.
- Gradys, A., Sajkiewicz, P., Minakov, A. A., Adamovsky, S., Schick, C., Hashimoto, T., & Saijo, K. (2005). Crystallization of polypropylene at various cooling rates. *Materials Science and Engineering: A*, 413, 442-446
- Grewell, D., & Benatar, A. (2007). Welding of plastics: fundamentals and new developments. *International polymer processing*, 22(1), 43-60.
- Han, J. H. (Ed.). (2005). *Innovations in food packaging*. Elsevier.
- Herrmann Ultrasonics. (2017). Ultrasonic welding technology – basics of packaging. <https://www.herrmannultraschall.com/fr/> (consulté en mars 2022)
- Herrmann Ultrasonics. (2017). HiQ The new generation of ultrasonic welding technology. <https://www.herrmannultraschall.com/fr/> (consulté en mars 2022)
- Herrmann Ultrasonics. (2019). Ultrasonic welding technology Fundamentals of nonwovens. <https://www.herrmannultraschall.com/fr/> (consulté en mars 2022)
- Hitachi. (2008). Introduction of hitachi SU1510. Brochure commerciale. [https://www.hitachi-hightech.com/us/product\\_list/](https://www.hitachi-hightech.com/us/product_list/) (consulté en septembre 2021)
- Humbe, A. B., Deshmukh, P. A., Jadhav, C. P., & Wadgane, S. R. (2014). Review of laser plastic welding process. *Int. J. Res. Eng. Technol*, 2, 191-206.
- Institut de Soudure (IA) Association. (2020). Assemblage des thermoplastiques et composites. [Présentation Powerpoint].
- International Organization for Standardization. (1984). Emballages – sacs – Essais de chute – partie 1 : sacs en papier (NF EN ISO 7965-1).
- International Organization for Standardization. (2000). Textiles – propriétés de déchirure des tissus – détermination de la force de déchirure des éprouvettes en forme de pantalon (NF EN ISO 13937-2).
- International Organization for Standardization. (2003). Systèmes de management de la mesure - exigences pour les processus et les équipements de mesure (ISO 10012).
- International Organization for Standardization. (2005). Mécanique des matériaux solide : textiles – atmospheres normales de conditionnement et d'essai (ISO 139).
- International Organization for Standardization. (2005). Textiles – Détermination de la résistance au glissement des fils de couture dans les tissus (ISO 13936 1,2,3).

- International Organization for Standardization. (2006). Matériaux métalliques – vérification des machines pour essais statiques uniaxiaux – Partie 1 : chaînes d'essai de traction /compression – vérification et étalonnage système de mesure de force (ISO 7500).
- International Organization for Standardization. (2013). Textiles – Propriétés de traction des tissus. Détermination de la force maximale et de l'allongement à la force maximale en utilisant la méthode de la bande (BS EN ISO 13934-1).
- Jolliet, O., Saadé, M., & Crettaz, P. (2010). Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan (Vol. 23). PPUR Presses polytechniques.
- Joly, G. (2005). Assemblage des thermoplastiques par soudage. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Joly, G. (2005). Soudage des thermoplastiques. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Jongbloed, B., Teuwen, J., Palardy, G., Villegas, I. F., & Benedictus, R. (2018, June). Improving weld uniformity in continuous ultrasonic welding of thermoplastic composites. In Proceedings of the European Conference on Composite Materials–ECCM (Vol. 18).
- Jongbloed, B., Teuwen, J., Benedictus, R., & Villegas, I. F. (2020). On differences and similarities between static and continuous ultrasonic welding of thermoplastic composites. *Composites Part B: Engineering*, 203, 108466.
- Jongbloed, B., Vinod, R., Teuwen, J., Benedictus, R., & Villegas, I. F. (2022). Improving the quality of continuous ultrasonically welded thermoplastic composite joints by adding a consolidator to the welding setup. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 106808.
- Karthik, T. (s.d.). Non-woven – process, structure, properties and applications. Woodhead Publishing india in textiles.
- Katayama, S. (Ed.). (2013). Handbook of laser welding technologies. Elsevier.
- Knack Packaging. (s.d.). Brochure commerciale. [http://www. Knackpackaging.com](http://www.Knackpackaging.com).
- Kovacevic, S., Ujevic, D., & Brnada, S. (2010). Coated textile materials. In *Woven fabric engineering*. IntechOpen.
- Kuttruff, H. (Ed.). (2012). Ultrasonics: Fundamentals and applications. Springer Science & Business Media.

- Labrosse, M. (1995). Plastiques. Essais normalisés : Essais physico-chimiques généraux. Ed. Techniques de l'ingénieur. Plastiques et composites, (A3520), A3520-1.
- Lau, O. W., & Wong, S. K. (2000). Contamination in food from packaging material. *Journal of chromatography A*, 882(1-2), 255-270.
- Lc Packaging. (2017). Woven polypropylene BOPP bags. Brochure commerciale. <https://www.lcpackaging.com/fr/> (consulté en janvier 2022)
- Lemaitre, J., Chaboche, J. L., Benallal, A., & Desmorat, R. (2020). Mécanique des matériaux solides-3e éd. Dunod.
- Le Neindre, B., Cancouët, P. (2009). Données des polymères. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Levy, A. (2010). Modélisation et simulation d'un écoulement sous vibration. Application au soudage par ultrasons de composites à matrice thermoplastique (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Nantes (ECN)).
- Levy, A., Le Corre, S., & Villegas, I. F. (2014). Modeling of the heating phenomena in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(7), 1361-1371.
- Liu, J., Zhang, Q., Zhang, B., & Yu, M. (2021). The Influence of the Roll-Laminating Process on the Bonding Quality of Polymer-Coated Steel Interface. *Coatings*, 11(4), 472.
- LyondellBasell Industries (s.d.). A guide to polyolefin extrusion coating. <http://www.LYB.com> (consulté en Janvier 2021)
- Martin, J. (2009). Etude par spectroscopie Raman du polypropylène isotactique au cours de sa déformation uniaxiale (Doctoral dissertation, Université Paul Verlaine-Metz).
- Mediana, M. (2018). Flexible Packaging Challenges Met with Ultrasonic Sealing Solutions. *Plastics Engineering*, 74(2), 12-15.
- Mehta, S. (2018). Rice packaging automation. Mémoire de baccalauréat, Université des sciences appliquées de Häme. <https://www.theseus.fi/handle/10024/154011>
- Mohamed, H. A., & Washburn, J. (1975). Mechanism of solid-state pressure welding. Article de journal, laboratoire Lawrence Berkeley. <https://escholarship.org/uc/item/12s2n08k>

- Mongan, P. G., Modi, V., McLaughlin, J. W., Hinchy, E. P., O'Higgins, R. M., O'Dowd, N. P., & McCarthy, C. T. (2022). Multi-objective optimisation of ultrasonically welded dissimilar joints through machine learning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33(4), 1125-1138.
- Monot, C., Vigié, J., Charlier, Q., Bras, J., Guérin, D., Harthong, B., & Caron, M. (2021). Ultrasonic welding of folding boxboards. *Bioresources*.
- MRB International. (s.d.). Brochure commerciale. <http://www.mrbinternational.com>. (consulté en mai 2022)
- Nase, M., Bach, S., Zankel, A., Majschak, J. P., & Grellmann, W. (2013). Ultrasonic sealing versus heat conductive sealing of polyethylene/polybutene-1 peel films. *Journal of applied polymer science*, 130(1), 383-393.
- Nguyen, T. H., Quang, Q. T., Tran, C. L., & Nguyen, H. L. (2017, October). Investigation the amplitude uniformity on the surface of the wide-blade ultrasonic plastic welding horn. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 241, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.
- Nguyen, T. H., Thanh, L. Q., Loc, N. H., Huu, M. N., & Nguyen Van, A. (2020). Effects of different roller profiles on the microstructure and peel strength of the ultrasonic welding joints of nonwoven fabrics. *Applied Sciences*, 10(12), 4101.
- Okada, M., Shin, S., Miyagi, M., & Matsuda, H. (1963). Joint mechanism of ultrasonic welding. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 4(4), 250-255.
- Olabisi, O., & Adewale, K. (Eds.). (2016). *Handbook of thermoplastics* (Vol. 41). CRC press.
- Olympus (2011). X-5000 portable XRF. <https://www.olympus-ims.com/innovx>. (consulté en août 2021)
- Pawlak, A., Galeski, A., & Rozanski, A. (2014). Cavitation during deformation of semicrystalline polymers. *Progress in polymer science*, 39(5), 921-958.
- PerkinElmer. (2005). Introducing the new PerkinElmer spectrum 100 FT-IR and FT-NIR spectrometers. <http://www.perkinelmer.com/lasoffices>. (consulté en août 2021)
- Phyllis LTD. (s.d.). PP woven bag production. <http://www.phyllis.com.tw>. (consulté en août 2021)
- Pierlot, T. (2011). *Welding technology for joining textile media*.
- Pillet, M. (2001). *Les plans d'expériences par la méthode Taguchi* (p. 250). Maurice Pillet.

- Potente, H. (1984). Ultrasonic welding—Principles & theory. *Materials & Design*, 5(5), 228-234.
- Qenos Pty Ltd. (s.d.). Extrusion coating and lamination – technical guide. [www.qenos.com](http://www.qenos.com).
- Rani, M. R., Prakasan, K., & Rudramoorthy, R. (2015). Studies on thermo-elastic heating of horns used in ultrasonic plastic welding. *Ultrasonics*, 55, 123-132.
- Régnier, G., & Le Corre, S. (2016). Modeling of thermoplastic welding. Article de journal, SAM Science Arts et Métiers. <https://sam.ensam.eu>
- Reyne, M. (1993). Emballages plastiques. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Reyne, M. (1998). Décoration et impression des surfaces en plastique. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Reyne, M. (2001). Procédés d'assemblage des plastiques. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Riedl, J. A. (2013). Process optimization: Ultrasonic welding of coextruded polymer film. Iowa State University, Graduate Theses and Dissertations, 13323.
- Ritesh Dua. (s.d.). Kamal Polypack Product Brochure. [www.kamalpolypack.com](http://www.kamalpolypack.com). (consulté en avril 2021)
- Rodts, T., Schmid, S. R., Selles, M. A., Pasang, T., & Sanchez-Caballero, S. (2019). Selective laser fiber welding on woven polymer fabrics for biomedical applications. *Materials Science and Engineering : C*, 94, 628-634.
- Sabre, R. (2007). Plan d'expériences – méthode de Taguchi. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Sancaktar, E. (1999). Polymer adhesion by ultrasonic welding. *Journal of adhesion science and technology*, 13(2), 179-201.
- Schultz, J. M. (1984). Microstructural aspects of failure in semicrystalline polymers. *Polymer Engineering & Science*, 24(10), 770-785.
- Seif, M. A., & Nasr, M. M. (2016). A comparative study of assembling methods of nonwoven bags traditional sewing vs welding seaming. *International Journal of General Engineering and Technology (IJGET)*, 5, 7-22.
- Sharma, T., & Alagh, P. (2021). Process and factor analysis in the manufacturing of woven polypropylene packaging textiles. *International Journal of Home Science* 2021; 7(2): 109-115

- Shi, W., & Little, T. (2000). "Mechanisms of ultrasonic joining of textile materials". *International Journal of Clothing Science and Technology*. Vol 12 No. 5, pp. 331-350. <https://doi.org/10.1108/09556220010377869> Download as RIS
- Shoh, A. (1976). Welding of thermoplastics by ultrasound. *Ultrasonics*, 14(5), 209-217.
- Silagy, D. (2005). Extrusion de film à plat : cast film. Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Singha, K. (2012). A review on coating & lamination in textiles: processes and applications. *American Journal of Polymer Science*, 2(3), 39-49.
- Sonobond ultrasonics (2015). SeamMaster high profile ultrasonic sewing machine. <https://www.SonobondUltrasonics.com> (consulté en décembre 2021)
- Suresh, K. S., Rani, M. R., Prakasan, K., & Rudramoorthy, R. (2007). Modeling of temperature distribution in ultrasonic welding of thermoplastics for various joint designs. *Journal of Materials Processing Technology*, 186(1-3), 138-146.
- TA instruments (2012). DSC Q2000 specifications. <http://www.tainstruments.com/products/microcalorimetry/differential-scanning-calorimetry/> (consulté en mars 2022)
- Tang, H., Hou, W., Hu, S. J., Zhang, H. Y., Feng, Z., & Kimchi, M. (2003). Influence of welding machine mechanical characteristics on the resistance spot welding process and weld quality. *welding journal-new york-*, 82(5), 116-S.
- Tolunay, M. N., Dawson, P. R., & Wang, K. K. (1983). Heating and bonding mechanisms in ultrasonic welding of thermoplastics. *Polymer Engineering & Science*, 23(13), 726-733.
- Troughton, M. J. (2008). *Handbook of plastics joining: a practical guide*. William Andrew.
- Tsujino, J., Hongoh, M., Yoshikuni, M., Hashii, H., & Ueoka, T. (2004). Welding characteristics of 27, 40 and 67 kHz ultrasonic plastic welding systems using fundamental-and higher-resonance frequencies. *Ultrasonics*, 42(1-9), 131-137.
- Van Oordt, T., Barb, Y., Zengerle, R., & von Stetten, F. (2014). Lamination of polyethylene composite films by ultrasonic welding: Investigation of peel behavior and identification of optimum welding parameters. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(10).
- Vasile, C. (Ed.). (2000). *Handbook of polyolefins*. CRC press.

- Vasile, C. (2000). Degradation and decomposition. *plastics engineering-new york-*, 59, 413-476.
- Vetron. (2019). Vetron Catalog. Brochure commerciale. <http://www.vetrontypical.com> (consulté en février 2021)
- Villegas, I. F. (2019). Ultrasonic welding of thermoplastic composites. *Frontiers in Materials*, 6, 291.
- Vite, M. (2009). Relations entre microstructure, propriétés mécaniques et résistance à la rayure du polypropylène injecté (Doctoral dissertation, Université de Savoie).
- Vujasinović, E., Janković, Z., Dragčević, Z., Petrunić, I., & Rogale, D. (2007). Investigation of the strength of ultrasonically welded sails. *International journal of clothing science and technology*.
- Yam, K. L. (Ed.). (2010). *The Wiley encyclopedia of packaging technology*. John Wiley & Sons.
- Wolf, R. (2010, April). A technology decision—adhesive lamination or extrusion coating/lamination. in *tappi place Conference 2010*.
- Yilbas, B. S., & Sahin, A. Z. (2014). *Friction welding: thermal and metallurgical characteristics*. Springer Berlin Heidelberg.
- Yousefpour, A., Hojjati, M., & Immarigeon, J. P. (2004). Fusion bonding/welding of thermoplastic composites. *Journal of Thermoplastic composite materials*, 17(4), 303-341.
- Zhang, H., Sherman, P., Boyd, R., Savitski, A., & Hefnawy, M. (2005). Implementation: Ultrasonic Sealing of Preformed Pouches in Production. *ohio state univ columbus*.

