

1.1. Contexte général :

1.1.1. Les méthodes d'assemblage par déformation plastique :

Les procédés d'assemblage par déformation plastique regroupent les méthodes d'assemblage de composants minces dont la tenue mécanique est assurée par leurs déformations et leur enchevêtrement. Ces procédés sont mis en œuvre à froid. Comme l'explique Roux [ROU11] en introduction de sa thèse, les assemblages mécaniques peuvent être créés avec apport d'un composant supplémentaire (Rivetage Figure 1-1 (a), rivetage auto poinçonneur Figure 1-1 (b)) ou sans apport de matière (Clinchage Figure 1-1 (c) et (d), sertissage Figure 1-1 (e) et (f)).

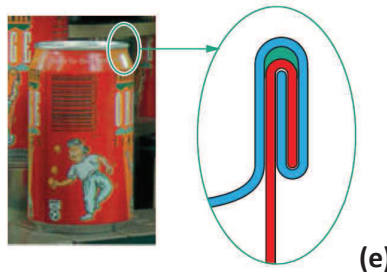
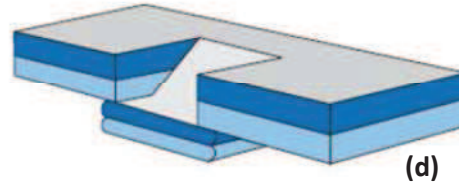
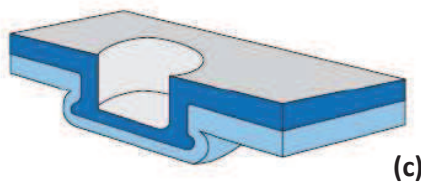
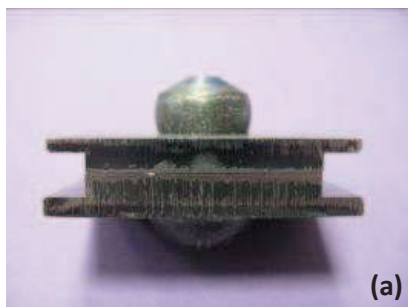


Figure 1-1 : Différentes techniques d'assemblage par déformation plastique : (a) rivetage, (b) rivetage auto poinçonneur (coupe), (c) clinchage à point rond, (d) clinchage à point carré [ROU11], (e) sertissage de tôles minces [BUI05], (f) sertissage de cosses électriques en fût ouvert.

Les assemblages par déformation plastique sont largement utilisés dans l'industrie, et notamment dans le secteur des transports. Par exemple, le nombre de rivets d'un Airbus A340 est de l'ordre de 1.500.000 unités. Certains modèles de voitures ont des caisses réalisées totalement en alliage d'aluminium. Les assemblages par déformation plastique sont alors largement utilisés et peuvent se compter par milliers. Le câblage d'un hélicoptère peut contenir 20.000 contacts électriques sertis sur câbles.

Comme le montre la Figure 1-2, le choix de la méthode d'assemblage se fait parmi un nombre conséquent de procédés et va faire l'objet, pour l'industriel, d'une réflexion basée sur un ensemble de contraintes.

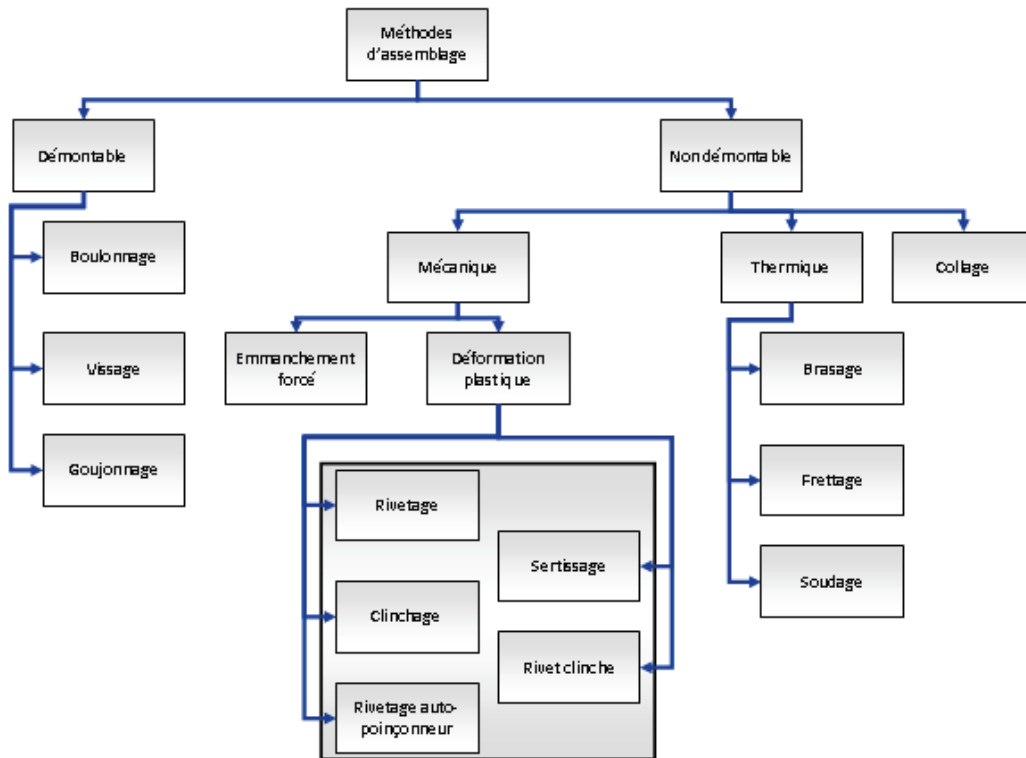


Figure 1-2 : Classification partielle des techniques d'assemblage [FAY08].

Pour faire ce choix, Fayolle [FAY08] a recensé un certain nombre de facteurs à analyser :

- la résistance à la rupture en statique et en dynamique du point d'assemblage,
- la facilité de mise en œuvre,
- la résistance à la corrosion,
- la durée du procédé d'assemblage [BAR00],
- l'utilisation de consommables,
- l'usure des outils,
- l'apparence du point d'assemblage,
- le coût de mise en oeuvre [VAR03],
- la possibilité de maintenance.

Le principal défi est d'optimiser la tenue de la liaison sous différents types de conditions (fatigue, arrachement, corrosion). La conception soignée des composants et la détermination des paramètres d'assemblages se traduisent finalement par une tenue mécanique en service optimale. En général, cet objectif est également lié à la réduction des coûts inhérents à la destruction des pièces et à leurs remplacements.

1.1.2. Le procédé de sertissage électrique :

1.1.2.1. Informations générales :

Deux technologies de sertissage vont être étudiées dans le cadre de ce travail : le sertissage sur câble en cuivre et le sertissage sur câble en aluminium, qui seront nommées technologie cuivre et technologie aluminium dans la suite du manuscrit.

Sertissage de la technologie cuivre :

Le sertissage de composants électriques tel qu'étudié dans nos travaux est un procédé d'assemblage par déformation plastique. Caractérisé par une mise en œuvre à froid, il est communément employé dans la réalisation des faisceaux électriques dans les secteurs du transport et de l'industrie. Le sertissage a une double fonction :

- Assurer une résistance mécanique maximale (résistance à l'arrachement du câble principalement).
- Assurer la continuité électrique (minimiser la résistance électrique et les discontinuités).

Les branchements entre câbles sont réalisés par l'intermédiaire de contacts mâles et femelles insérés dans des connecteurs plastiques ou métalliques. La Figure 1-3 présente deux exemples de connecteurs, avec 23 contacts chacun.



Figure 1-3 : Exemples de connecteurs employés dans le secteur des transports.

Dans la pratique, un contact en cuivre est écrasé sur une zone dénudée d'un câble pour réaliser une liaison mécanique et électrique. Les brins des câbles sont en cuivre chemisé de nickel. Dans le cadre de notre étude, le diamètre externe des contacts de cuivre est de l'ordre de 1.2 mm. Les brins mesurent de 0.115 mm à 0.25 mm en fonction de la jauge (ou référence). La Figure 1-4 permet de distinguer les différentes zones d'un contact. La zone sertie est le fût du contact, qui s'apparente à un cylindre creux.

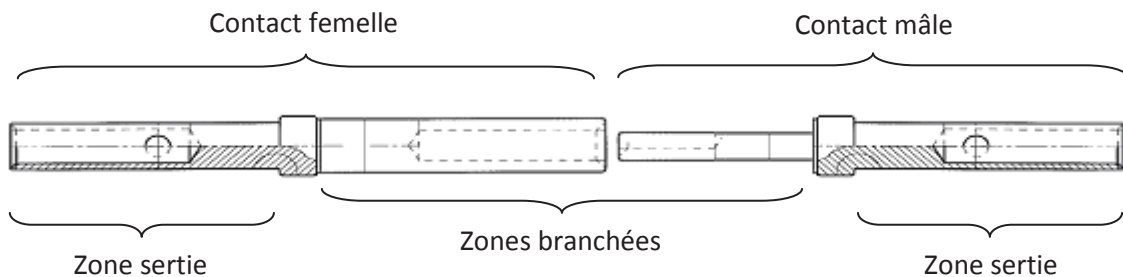


Figure 1-4 : Distinction des différentes zones d'un contact électrique.

La Figure 1-5 est un schéma de sertissage quatre points d'un contact mâle sur un câble. Quatre mors sont utilisés pour écraser le contact sur le câble.

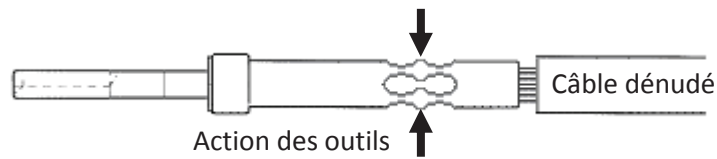


Figure 1-5 : Schéma de principe d'un sertissage de contact.

La Figure 1-6 permet d'observer les composants avant et après sertissage.

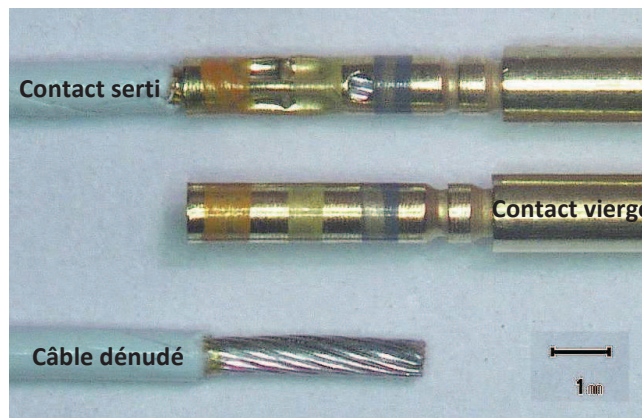


Figure 1-6 : Contact sertie sur câble Cu22 et composants vierges.

Sertissage de la technologie aluminium :

Pour certaines sociétés, comme Airbus, l'étude du sertissage va au delà de la maîtrise de la technologie cuivre. Pour diminuer les masses sur ses nouveaux appareils, la société utilise des câbles en aluminium. Au sertissage mécanique, proche de celui utilisé pour la technologie cuivre, on ajoute un sertissage dit d'étanchéité qui protège la liaison.

Pour effectuer les assemblages, deux sertissages sont réalisés en parallèle avec la même pince. Le premier est un sertissage électrique analogue à celui réalisé pour les contacts de la technologie cuivre. Le second sertissage, dit sertissage d'étanchéité, permet d'écraser l'extrémité du fût sur le câble encore gainé, afin d'empêcher l'oxydation du câble par contact avec l'air ambiant. Les deux zones serties sont représentées sur le schéma de la Figure 1-7.

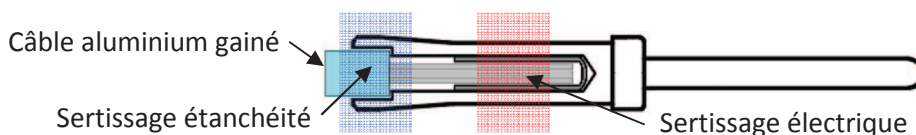


Figure 1-7 : Visuel d'un contact mâle de la technologie aluminium.

1.1.2.2. Moyens de sertissage actuels, méthodes de validation et limitations :

L'inventaire des moyens de sertissage actuels peut se résumer à deux types de dispositifs et à deux méthodes de validation des assemblages.

Le premier moyen de sertissage est la pince à sertir manuelle, dont le réglage de la profondeur de sertissage se fait manuellement en fonction du contact et du câble à sertir. Le positionnement de l'empreinte de sertissage s'effectue par la mise en place d'une butée mécanique (appelée positionneur) en fonction du contact à sertir. Le sertissage est ensuite réalisé en fermant la pince jusqu'en butée. Le seul moyen de valider la qualité d'un sertissage obtenu manuellement est un essai destructif. Cet essai consiste à mesurer l'effort de traction à rupture du câble sertir dans le contact.

La limitation des pinces à sertir manuelles réside dans le fait qu'aucun contrôle n'est réalisé en cours de sertissage. Outre les problèmes de sertissage pouvant être liés à la matière ou à l'usure de l'outil, on peut noter la forte dépendance des défauts à l'opérateur humain. Le réglage manuel se traduit par un risque d'erreur potentiel. Enfin, la vérification des sertissages effectués ne peut se faire que par un contrôle destructif.

Le second moyen de sertissage est le poste de sertissage automatique, dont le réglage de la profondeur de sertissage se fait automatiquement en fonction du contact et du câble à sertir. Le positionnement de l'empreinte de sertissage s'effectue également automatiquement par déplacement d'une butée mécanique en fonction du contact à sertir. Le sertissage est ensuite automatiquement réalisé par rotation d'un barillet excentrique commandé par un moteur. L'avantage de ce dispositif est l'acquisition en cours de sertissage des efforts sur certaines pièces du dispositif. Par conséquent, une mesure de l'effort maximal de sertissage est effectuée pour en valider la qualité.

La limitation des postes de sertissage automatique réside dans le fait que le dispositif doit être alimenté par une source d'énergie. Un dispositif d'accumulation d'énergie ou un cordon rendent la manipulation de l'outil peu aisée. Par ailleurs, les postes automatiques ne sont pas mobiles et incapables d'être emmenés dans toutes les zones d'accès difficile d'un aéronef. Enfin, le coût d'un tel outil proscrit la généralisation de son emploi.

Seul le développement d'un nouveau type de dispositif de sertissage manuel à contrôle intégré permettra la détection systématique et en temps réel de problèmes de sertissage, leur traçabilité (conservation en mémoire de toutes les données des contacts sertis sur avions) et la suppression des défauts. L'objectif est de pouvoir garantir la conformité de l'assemblage dès l'étape de sertissage et sans effectuer de test destructif.

1.1.2.3. Position du problème :

"Dans un hélicoptère, 99% des liaisons électriques sont faites par sertissage. Il y a environ 20.000 connexions par appareil. Une erreur tous les 10.000 sertissages (ce qui est peu) induit donc deux défaillances électriques potentielles (ce qui est beaucoup pour le client)."

C'est suite à ce constat que le groupe "Câblage" de l'entreprise Eurocopter (Groupe EADS) a eu la volonté de mettre en place un projet visant à trouver une solution fiable aux défauts de sertissage : une pince à sertir à contrôle intégré (PSI). Appartenant au groupe EADS, Airbus est confronté au même type de problème sur ses avions et est le deuxième partenaire industriel du projet. Enfin, la division spatiale de l'entreprise Thales a également souhaité intégrer le consortium. Pour cette entreprise, la problématique de la fiabilité des sertissages est d'autant plus importante qu'aucune maintenance ou réparation n'est possible une fois le satellite en orbite dans l'espace. Les contacts électriques sont les éléments critiques par lesquels transitent les signaux électriques et la puissance, fonctions vitales du satellite. Par conséquent les exigences qualités sont extrêmes et n'autorisent aucun défaut qui pourrait se transformer en panne.

Outre les acheteurs industriels finaux présentés dans le paragraphe précédent, le projet PSI se caractérise par la participation financière du ministère de l'industrie et du conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur, ainsi que par la participation d'un grand nombre de partenaires, à savoir :

- L'entreprise Labinal, sous-traitant historique d'EADS dans le domaine du câblage, aura notamment pour mission de réaliser les campagnes d'essais de sertissage et d'arrachement à l'aide des prototypes de pinces conçus. Chargés de la fabrication de certaines parties du câblage, les employés de cette entreprise sont des utilisateurs futurs de la pince à sertir électronique.

- L'entreprise QMT aura pour mission de concevoir et de fabriquer les prototypes, en tenant compte du cahier des charges strict mis en place avec l'ensemble des partenaires.

- Trescal et le CETIM se positionneront sur le marché de l'étalonnage et de la vérification des pinces à sertir à contrôle intégré. Pour cela, il sera nécessaire de déterminer une méthode d'étalonnage fiable et efficace de la pince. L'objectif secondaire est d'initier les démarches d'amélioration dans le domaine de la métrologie. Plus spécifiquement, le CETIM s'engage résolument vers une démarche de collaboration avec des porteurs de projets pour développer des produits ou procédés innovants.

- L'institut ISM (Institut des Sciences du Mouvement) effectuera des recherches dans le domaine des troubles musculo-squelettiques (TMS) et de l'ergonomie des composantes Homme/système. Son rôle est de donner des préconisations pour le développement d'une pince dont l'ergonomie minimise l'apparition de tels troubles.

- Le Centre de Mise En Forme des matériaux (CEMEF) de l'école Mines Paristech effectuera des recherches dans le domaine de la simulation numérique du procédé de sertissage et de l'arrachement de contacts sertis.

1.1.3. Les objectifs du projet PSI :

Le projet PSI (pour Pince à Sertir à contrôle Intégré) vise à développer un outil permettant de détecter et d'identifier les problèmes de sertissage pour un couple contact/câble donné. Le concept repose sur l'intégration à la pince à sertir d'éléments de métrologie permettant de déterminer des courbes de type effort/déplacement pendant le sertissage. Les courbes ainsi obtenues seront traitées afin de déterminer la conformité du sertissage et le cas échéant, de diagnostiquer la nature du défaut. La détermination de la validité du sertissage permettra alors de faire le contrôle systématique de tous les contacts sertis sans effectuer de test destructif.

La pince doit permettre de reconnaître automatiquement le couple contact/câble. Elle doit également distinguer les erreurs de réglages et effectuer la traçabilité des opérations de sertissage, le tout dans un environnement de fabrication et d'exploitation. Enfin, l'un des objectifs du projet est de trouver une solution permettant d'étalonner et de calibrer simplement et de manière peu onéreuse les pinces à sertir à contrôle intégré. Tous ces travaux permettraient de conclure sur le potentiel d'industrialisation d'une telle pince exigeant robustesse, fiabilité, simplicité et ergonomie.

On peut donc décomposer le projet en 3 grandes thématiques :

- L'étude et la réalisation de démonstrateurs de pince à sertir à contrôle intégré.

- Le développement de méthodes d'étalonnage et de calibration de la pince.

- L'analyse des relevés de sertissage dans le but de déterminer des courbes enveloppes de sertissages considérés comme valides. La simulation du procédé de sertissage et de l'arrachement de contact serti permettrait de valider la viabilité d'études numériques en lieu et place de longues campagnes d'essais. C'est dans le cadre de ce dernier point que s'inscrit mon travail de thèse.

1.1.4. Les différents prototypes du projet :

1.1.4.1. La SCT : Smart Crimping Tool :

La SCT (pour Smart Crimping Tool) est une pince à sertir mise au point pour valider la faisabilité du projet. Sa conception et sa fabrication sont donc antérieures à la date de début du projet PSI.

Les solutions technologiques retenues permettent à cette pince de fournir des relevés d'efforts au niveau de chaque mors (en Newtons) en fonction de leurs déplacements respectifs (en millimètres). Cependant, la mise au point des capteurs nécessaires à l'acquisition de ces données a été chère et n'autorise pas une industrialisation telle quelle de la pince. De plus, sa taille imposante et son poids limitent l'utilisation de cet outil sur les chaînes de production.

La Figure 1-8 permet de comparer les dimensions de la SCT avec une pince manuelle mécanique utilisée aujourd'hui sur les chaînes de production. La miniaturisation des composants n'était pas l'objectif de la mise au point de ce prototype.

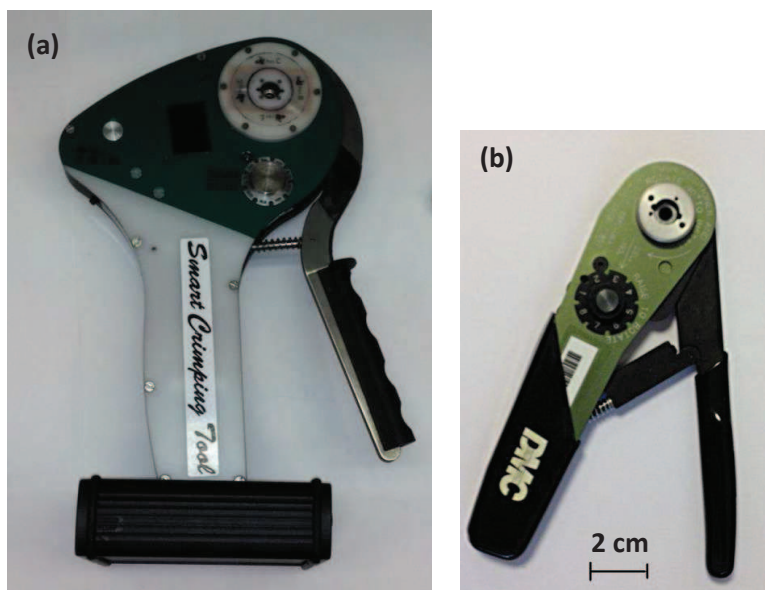


Figure 1-8 : Smart Crimping Tool (SCT) (a) et pince à sertir classique (b).

Nos simulations auront pour objectif de modéliser le sertissage de contacts électriques. Elles se limiteront au système Contact-Câble-Mors. Le fait que ce prototype fournisse directement des relevés de type Force/Déplacement est donc un réel avantage. La Figure 1-9 est un graphique donnant un exemple de relevés bruts obtenus avec la SCT. La course totale du mors est représentée, ce qui permet de constater que les capteurs font l'acquisition d'efforts résiduels (~80N) avant même la mise en contact des mors avec le contact électrique.

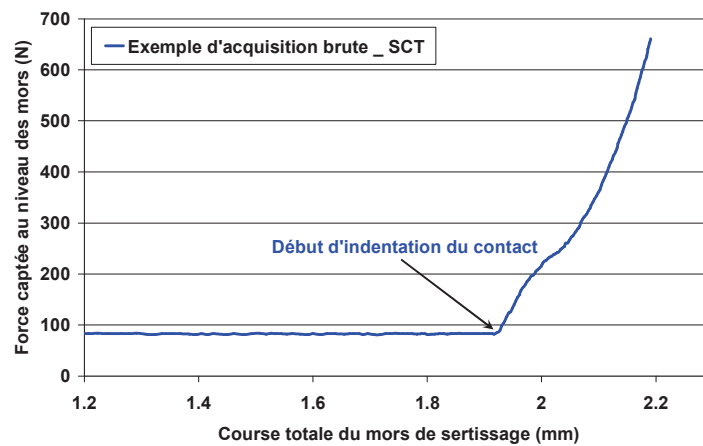


Figure 1-9 : Relevés bruts d'efforts de sertissage obtenus avec la SCT.

1.1.4.2. La PSB : Pince à Sertir Basique :

La PSB (pour Pince à Sertir Basique) est un prototype issu des trois années du projet PSI. Directement impactées par les problématiques de coût d'achat futur de la pince industrielle, les solutions technologiques d'instrumentations sont différentes de celles retenues pour la SCT.

La PSB est équipée d'un premier capteur mesurant l'angle entre les deux manches. Ce capteur de déplacement LVDT est repéré sur la photographie (a) de la Figure 1-10. Un second capteur, intégré au manche mobile, permet de mesurer le couple (en N.m) lors de la fermeture de la pince. Enfin, un boîtier externe permet d'alimenter électriquement le prototype et de traiter les données acquises.

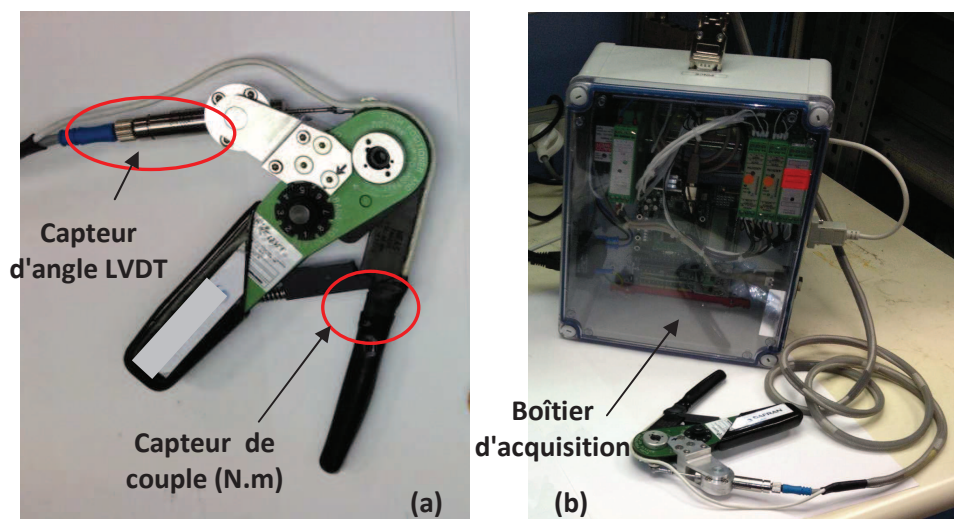


Figure 1-10 : Pince à Sertir Basique (PSB) - Prototype issu du projet.

Le fait que ce prototype fournisse des relevés de type couple/angle est problématique pour nos comparaisons futures entre résultats de simulations et relevés de sertissages expérimentaux. Les ingénieurs ayant travaillé sur la mise au point de cette PSB ont donc déterminé une loi de levée. Cette formule permet de convertir les données acquises par les capteurs en données de type force/déplacement.

La Figure 1-11-(a) est un graphique montrant un relevé brut obtenu avec la PSB. La course totale angulaire du manche est représentée, ce qui permet à nouveau de constater que les capteurs font l'acquisition d'efforts résiduels (et non constants cette fois ci) avant même la mise en contact des mors avec le contact électrique. La Figure 1-11-(b) permet de voir l'équivalent des données angle/couple de la Figure 1-11-(a) en terme de force/déplacement, via la loi de levée. Les efforts résiduels et non constants avant début d'indentation sont toujours présents.

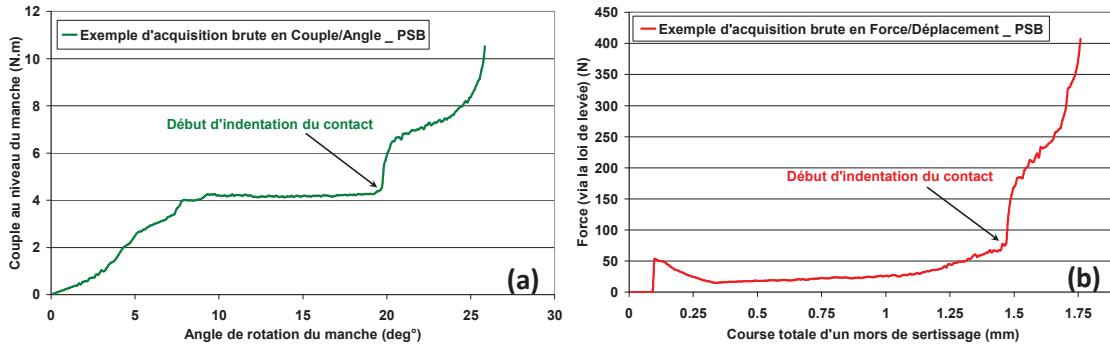


Figure 1-11 : Relevés bruts (a) de couple de sertissage obtenus avec la PSB et (b) d'efforts de sertissage obtenus par intermédiaire de la loi de levée.

1.2. Travaux antérieurs sur le sertissage de contacts électriques :

L'objectif de ce paragraphe est de synthétiser les travaux antérieurs et résultats associés sur la thématique du sertissage de contacts électriques. Ce travail de synthèse permettra d'orienter le travail de mise au point des simulations de sertissage.

Comme l'explique Abbas [ABB02], la plupart des connaissances acquises sur le sujet sont empiriques. Les articles de Butler ([BUT96a], [BUT96b], [BUT97a], [BUT97b], [BUT98]), publiés dans la revue professionnelle Wiring Harnesses News, sont une base d'étude intéressante. Butler présente, par exemple, les différentes presses de sertissage utilisées au cours de l'histoire ou quelques techniques employées dans la détermination de la qualité d'un sertissage. En revanche, la plupart des sources d'informations fiables se trouvent dans les cahiers des charges des industriels, et sont donc difficiles d'accès car confidentielles.

1.2.1. Etudes de l'aspect mécanique du procédé d'assemblage :

En 1967, une étude mécanique est réalisée par Hayner [HAY67]. L'objectif est de montrer l'impact de certains paramètres sur la tenue à l'arrachement de contacts sertis. Outre les problématiques matériaux ou de forme des mors, Hayner aborde notamment l'impact du réglage de la profondeur d'indentation.

La Figure 1-12 est un graphique sur lequel sont représentés les niveaux d'efforts d'arrachement atteint pour différentes profondeurs d'indentation. En abscisse est représentée la distance entre deux mors opposés. Ainsi, on retrouve les sur-sertissages sur la partie gauche du graphique et les sous-sertissages sur la partie droite du graphique. Le type de rupture est également mentionné dans chaque cas : glissement (Wire pull out) pour un sous-sertissage et rupture du câble dans la zone de sertissage (Wire breakage in crimp area) pour un sur-sertissage.

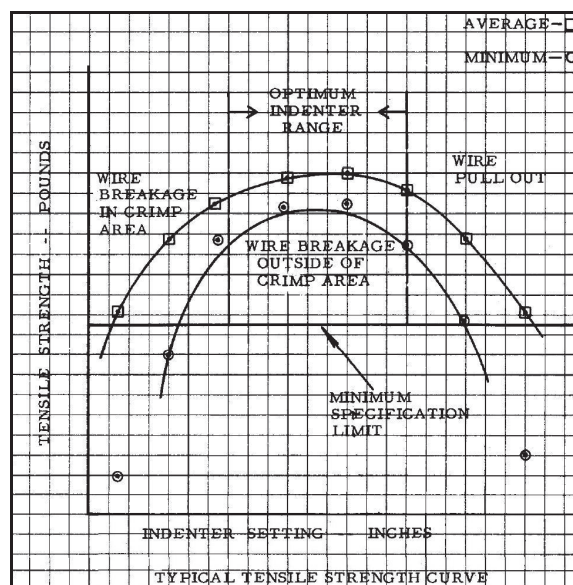


Figure 1-12 : Impact de la profondeur d'indentation sur la tenue à l'arrachement de contacts [HAY67].

Hayner conclut déjà en 1967 sur l'existence d'une profondeur optimale pour laquelle les efforts d'arrachement sont les plus importants (extremum de la parabole). Il explique que, dans l'intervalle d'indentation optimal, la rupture du câble intervient en dehors de la zone de sertissage. Cela prouve que le sertissage est plus résistant que la tenue à l'arrachement du câble seul.

Par conséquent, cette problématique d'optimisation du sertissage électrique est ancienne. Cependant, les outils numériques disponibles au début des années 70 n'étaient pas suffisamment puissants pour apporter une aide dans la compréhension et l'optimisation de tels assemblages.

1.2.2. Etudes de simulations numériques du sertissage électrique :

Ce paragraphe va permettre de présenter les travaux d'origines académiques portant sur la modélisation du procédé. La première étude numérique du procédé de sertissage de contacts électriques date de 1995, avec les travaux de Kugener [KUG95]. Cette étude a été réalisée en 2D, avec des maillages simplifiés. Un unique corps déformable modélise le câble et sa gaine. Depuis, les importants développements des logiciels de calculs ont permis d'aboutir à des modèles en configuration 3D assez représentatifs du procédé, à l'image de ceux d'Abbas [ABB02] en 2002 et de Zhmurkin [ZHM08] en 2008. L'objectif de ce paragraphe est de présenter quelques études numériques effectuées sur le procédé de sertissage de contacts électriques. Cela permettra d'identifier les principales difficultés numériques et d'examiner les différentes hypothèses simplificatrices proposées.

La Figure 1-13 et la Figure 1-14 présentent les deux types de sertissage étudiés dans les différents travaux présentés : le sertissage sur contact à fût ouvert (ou "open barrel") et le sertissage quatre points sur contacts cylindriques. Les illustrations sont extraites des travaux respectifs de Zhmurkin [ZHM08] et Lorrière [LOR03]. La géométrie des contacts et la mise en œuvre de l'assemblage sont différentes.

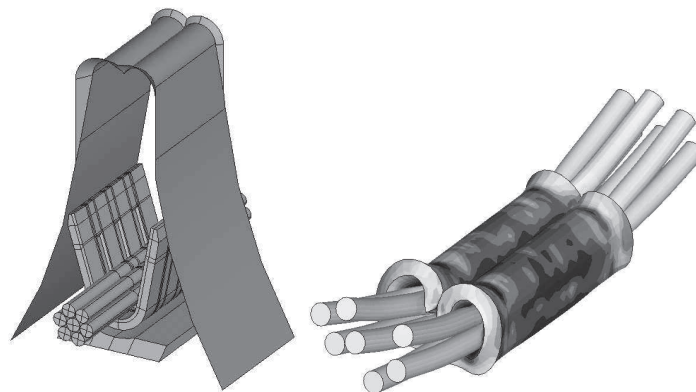


Figure 1-13 : Mise en donnée de sertissage sur contact à fût ouvert [ZHM08].

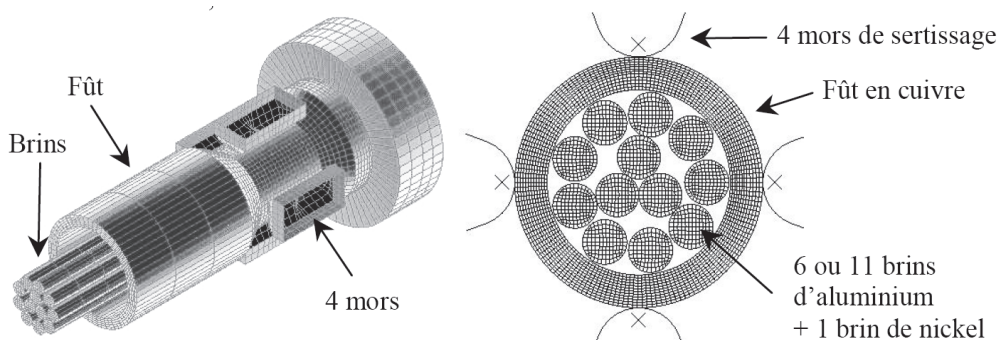


Figure 1-14 : Mise en donnée de sertissage quatre points sur contact cylindrique aéronautique [LOR03].

1.2.2.1. Représentation 2D d'un problème résolument tridimensionnel :

La simulation du procédé de sertissage en 2D a toujours posé le problème de savoir si il est préférable d'utiliser des éléments faisant l'hypothèse des contraintes ou des déformations planes. Après réflexion, la volonté de ne pas bloquer l'allongement virtuel de la matière dans la troisième direction a poussé bon nombre de scientifiques à faire l'hypothèse des contraintes planes. Ainsi, Kugener [KUG95] est le premier à faire ce choix en simulant le sertissage de contact de type "open barrel" (fût ouvert). De son côté, Morita [MOR96], bien que s'inspirant des travaux de Kugener, fait l'hypothèse des déformations planes uniquement.

Il faudra attendre les études de Villeneuve [VIL96] puis de Lorrière [LOR03] pour découvrir que le sertissage est un procédé qui, dans la réalité, peut se décomposer à la fois en contraintes et en déformations planes. Lorrière ira même jusqu'à comparer deux simulations (une par hypothèse) pour vérifier l'impact sur les relevés d'efforts et sur les profils de sertissage. Suite à l'obtention des courbes de la Figure 1-15, il conclura que l'hypothèse des déformations planes engendre un blocage de la matière et une surestimation logique des efforts. A l'inverse, l'hypothèse des contraintes planes permet une bonne corrélation des relevés d'efforts simulés avec les efforts expérimentaux, mais sous-estime le remplissage des vides de matière entre les brins pour des sertissages à faible course des mors.

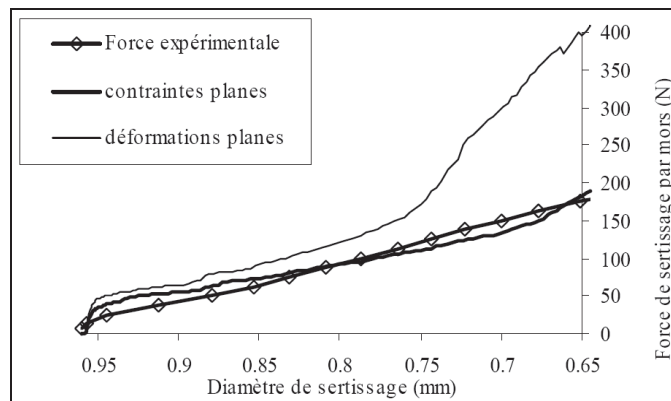


Figure 1-15 : Effort exercé par un mors de sertissage avec les modèles contraintes et déformations planes explicites et effort mesuré expérimentalement [LOR03].

Dans son manuscrit de thèse, Abbas aborde également la problématique de l'hypothèse de résolution en 2D. Il conclut également que l'hypothèse des déformations planes n'est pas appropriée à la simulation du sertissage car il faut laisser la possibilité à la matière de s'extruder hors du plan. Pour justifier cela, il explique qu'un sertissage automobile en fût ouvert est considéré "bon" lorsque la section du câble est réduite d'au moins 15%. Le principe de conservation de la matière permet de postuler que la matière doit donc s'écouler hors du plan. Pour illustrer ses travaux, Abbas a comparé les profils des modèles en contraintes et en déformations planes. Cette comparaison est visible sur la Figure 1-16.

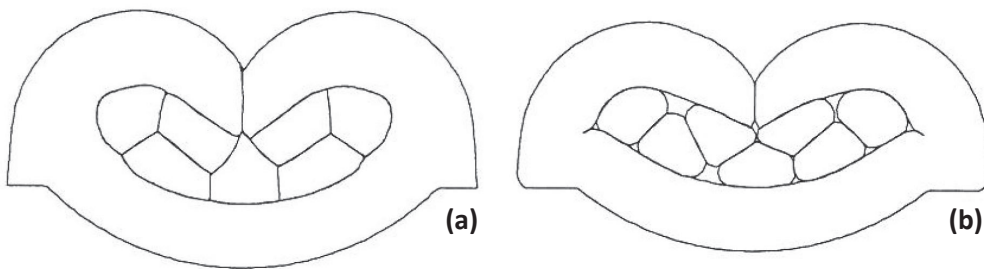


Figure 1-16 : Effet du choix de l'hypothèse bidimensionnelle en dynamique explicite : déformations planes (a) et contraintes planes (b) [ABB02].

Abbas postule que l'hypothèse des déformations planes se traduit par un comportement plus rigide de la structure. Une fois les vides entre brins comblés, le calcul s'arrête. Le recours à l'hypothèse des contraintes planes en 2D est à nouveau privilégié.

1.2.2.2. Formalisme de résolution du problème mécanique :

Le sertissage est un problème quasi statique mais fortement non linéaire, notamment en raison des problèmes de contact entre brins et fût et de la déformation plastique des composants. Ainsi, les logiciels utilisés pour résoudre ce type de problème s'appuient sur deux types de formalisme de résolution. Le formalisme implicite est très robuste pour un problème fortement non linéaire de type géométrique et physique. Par contre, il est souvent présenté comme peu efficace pour des problèmes de contact multi objets complexes. Ainsi, le choix d'une résolution explicite est préféré par de nombreux scientifiques ([KUG95], [ABB02], [ZHM08] et [MOR96]). La Figure 1-17 présente les résultats de simulations de Kugener, avec une comparaison réussie entre simulation et sertissage expérimentaux. L'algorithme explicite consiste à calculer l'état d'un système à l'instant t en prenant en compte son état à un instant t' antérieur ($t' < t$). Il semble ainsi plus simple à utiliser et permet de gérer simplement les événements de contact. Il peut donc sembler le mieux adapté à la simulation du sertissage.

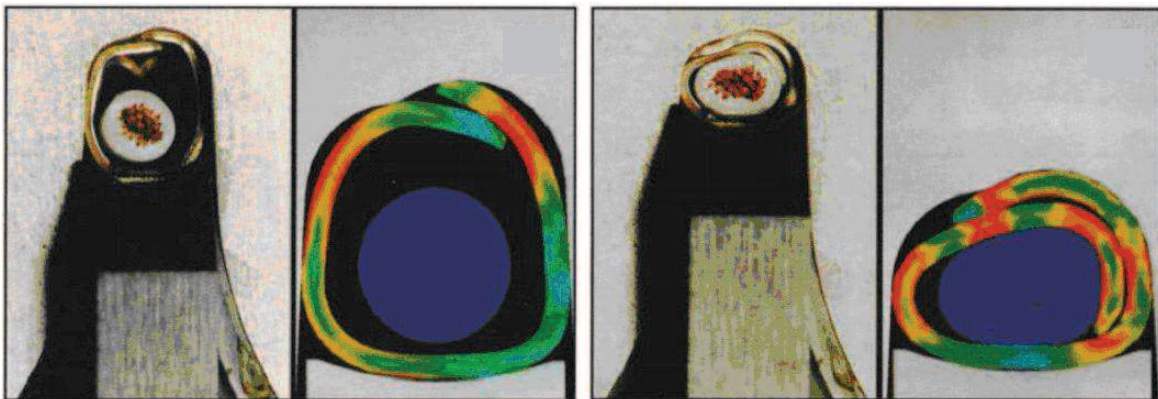


Figure 1-17 : Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation (formalisme explicite) [KUG95].

En élargissant notre recherche bibliographique à des travaux de mécanique numérique plus généraux, on se rend compte que de nombreux auteurs émettent des conclusions sur le formalisme à privilégier. Par exemple, Rachik [RAC98] a expérimenté avec succès l'utilisation de schémas explicites d'ordre élevé dans le cadre de problèmes mécaniques instables faisant intervenir des non linéarités géométriques.

Il est intéressant de noter l'étude de Lorrière [LOR03] qui, bien que déjà convaincu que la résolution du problème sera meilleure avec un modèle explicite, effectue la comparaison des

résultats obtenus avec des modèles explicite et implicite. Il conclut que, de par sa nature fortement non linéaire (non linéarités géométriques, de comportement matériaux, liés à la présence de contact entre brins), la simulation de sertissage sera plus facilement résolue à l'aide d'un algorithme explicite.

1.2.2.3. Complexité géométrique des mises en données :

La difficulté à gérer des géométries et des maillages complexes est directement régie par la puissance du logiciel de calcul utilisé. Ainsi, l'évolution des mises en données depuis 1995 a été importante. Initialement en 2D, avec un nombre très limité d'objets, les simulations sont dorénavant capables d'intégrer des pièces 3D, des géométries complexes et des maillages extrêmement raffinés dans les zones importantes de l'étude. En 1995, Kugener [KUG95] propose une simulation de sertissage de contact à fût ouvert en créant un unique corps déformable pour simuler le câble et sa gaine. Pour rendre son modèle cohérent avec la réalité, il a dû diminuer le module d'Young du matériau fictif constituant le corps par rapport à ceux du câble.

En 2003, Lorrière [LOR03] présente dans un article une étude 3D du sertissage quatre points, et conclut que la simulation 3D est le seul moyen de simuler le sertissage correctement. Ce modèle, représentant une technologie aluminium, est composé de 8 corps déformables et 4 outils rigides. La Figure 1-18 permet d'observer la zone sertie et les différents corps déformables.

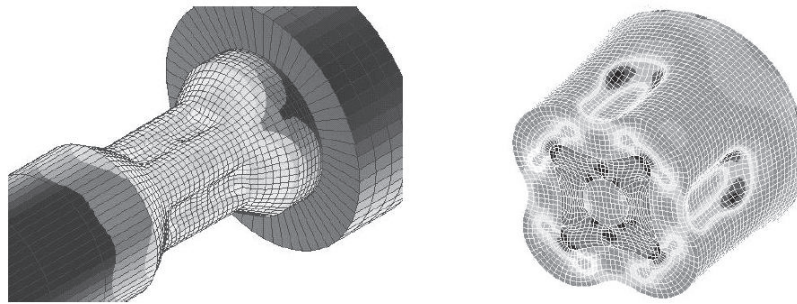


Figure 1-18 : Zone de sertissage du câble et coupe au niveau de la strie du mors [LOR03].

En 2006, Ogihara [OGI06] ira même jusqu'à simuler les 41 brins d'un câble serti dans un contact à fût ouvert.

1.2.2.4. Paramétrage des interactions et du frottement :

Dans un modèle multi domaines, la gestion des interactions entre les objets est un point critique. Pour simplifier la résolution des calculs, toutes les études présentées ici ont utilisé des brins droits. Cette simplification permet de conserver un modèle proche de la réalité du procédé, avec toutefois une importante réduction du nombre d'interactions.

Dans l'ensemble des études, le coefficient de frottement correspondant à une loi de Coulomb se situe entre 0,1 et 0,3. Cette valeur correspond à un frottement entre deux métaux non lubrifiés. A première vue, le choix de telles valeurs se justifie donc facilement. Aucune étude de sensibilité à ce paramètre n'a été présentée.

L'unique question qui persiste est donc de savoir si l'utilisation d'un contact frottant classique se justifie, ou si l'on peut utiliser un contact collant qui permet de minimiser les temps de calculs. D'après Ogihara [OGI06] et Zhmurkin [ZHM08], l'utilisation d'un contact collant peut également se justifier par la prise en considération du concept de soudure à froid. Pour justifier leurs dires, ils évoquent les travaux de Mroczkowski [MRO95]. Celui-ci a montré que l'extrême compaction de

la matière lors du sertissage pouvait engendrer la création de liaisons atomiques entre les objets, créant ainsi une seule et même entité.

Comme cela a été mentionné lors de la présentation des deux technologies de sertissage (1.1.2.1), les brins de cuivre sont chemisés avec une faible couche de nickel. L'épaisseur de nickel est de l'ordre de 0.013 mm. Par conséquent, l'impact de ce matériau sur la résistance mécanique a été supposé négligeable dans le cadre de la thèse. En revanche, on peut supposer que l'influence première de ce chemisage se fera sur les paramètres de lois de frottement entre les corps déformables. Une attention particulière sera donc apportée à l'étude des phénomènes de frottement.

1.2.2.5. Etude du retour élastique de la matière :

Le retour élastique est un phénomène physique dont l'amplitude dépend essentiellement des propriétés du matériau. Dans un procédé d'assemblage tel que le sertissage, où la tenue de l'ensemble câble/contact dépend du contact entre les corps, la prise en compte de ce phénomène devient essentielle.

Kugener [KUG95] n'aborde absolument pas cette thématique. L'auteur a totalement négligé ce phénomène. A l'inverse, les autres études liées à la simulation du sertissage ont toutes évoqué ce sujet. Certaines études ([ZHM08], [MOR96], [VIL96]) ont mis en évidence une surestimation du retour élastique des simulations numériques par rapport au retour élastique observé expérimentalement. Ainsi, plusieurs méthodes ont été appliquées pour réduire le retour élastique. La première méthode, notamment utilisée par Villeneuve [VIL96], consiste à modifier la courbe reliant contraintes et déformations de la matière lors de la déformation plastique en égalisant la pente à zéro. Ainsi, lorsque il y a déchargement, l'amplitude de retour élastique RE_0 est réduite par rapport à l'amplitude RE , comme le montre le schéma de la Figure 1-19. Cette solution n'est pas acceptable d'un point de vue mécanique.

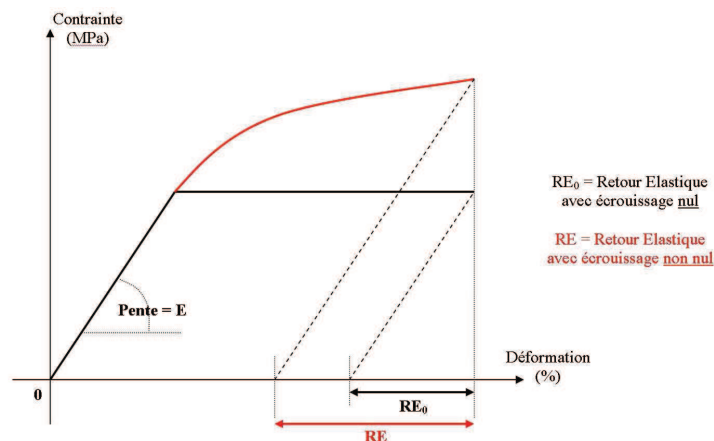


Figure 1-19 : Schéma expliquant l'intérêt de diminuer la pente de l'écroissage [VIL96].

Néanmoins, l'auteur précise dans son étude qu'une pente d'écroissage nulle (déformation parfaitement plastique) engendre des instabilités de calculs. Il sous estime donc la pente, en conservant une légère croissance des efforts. En utilisant cette méthode, il y a inévitablement un impact sur les relevés d'effort, mais l'étude de Villeneuve [VIL96] ne compare jamais relevés d'efforts expérimentaux et relevés d'efforts issus de la simulation. Les seules comparaisons entre résultats de simulations et d'expériences se font par comparaison des profils de contacts sertis.

Toujours dans l'optique de diminuer l'amplitude du retour élastique, Morita [MOR96] proposera d'effectuer numériquement un maintien en compression de l'ensemble pour que la relaxation de la

matière engendre une diminution des contraintes internes avant déchargement, et donc du retour élastique. Cependant, on peut mettre en doute le bien fondé de ce maintien, qui n'est alors plus représentatif de la durée réelle du sertissage. Le procédé est en réalité très court, et il n'y a aucun maintien sur la chaîne de production. La Figure 1-20 présente le modèle de sertissage mis au point par Morita. On y observe le décollement du câble et du contact dû au retour élastique simulé.

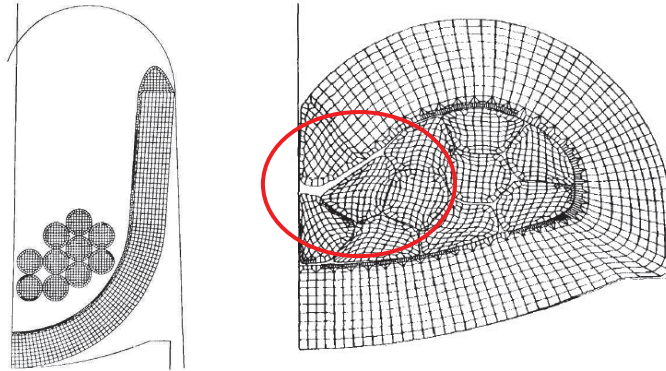


Figure 1-20 : Modèle de sertissage de Morita avec prise en compte du retour élastique [MOR96].

Le phénomène de soudure à froid évoqué par Mroczkowski [MRO95] pourrait expliquer les différences de valeur de retour élastique entre les simulations et la réalité. Par l'expérience, Zhmurkin [ZHM08] a d'ailleurs obtenu la preuve de ce phénomène. La Figure 1-21 présente les coupes de deux contacts à fûts ouverts sertis sur câble. Le premier sertissage a été réalisé avec un contact et un câble classiques. Après sertissage, aucun vide ne s'est formé entre les objets, malgré le retrait des outils. La seconde image a été obtenue en réduisant de manière intentionnelle l'adhésion. Du silicone a été appliqué sur les objets. Un écart est apparu entre les différents brins et le contact après suppression de l'action des outils.

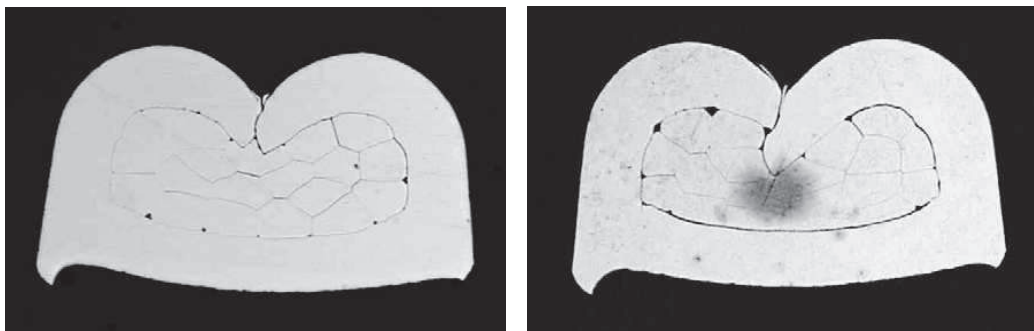


Figure 1-21 : Profils de contacts sertis sans silicone (à gauche) ou avec silicone (à droite) anti-adhésion [ZHM08]

1.2.2.6. Comportement mécanique des matériaux :

La loi de comportement d'un matériau exprime la contrainte en fonction de la déformation. La réalisation d'essais mécaniques normalisés permet de remonter aux paramètres de cette loi. Si les échantillons ne peuvent pas être mis sous forme d'éprouvettes normalisées, on peut remonter aux paramètres en réalisant une identification par analyse inverse, comme a pu le faire Fayolle [FAY08] dans le cadre de sa thèse.

L'étude des travaux antérieurs a permis de montrer que la plupart des calculs ont été réalisés avec des lois de comportement extrêmement simplifiées. La majeure partie des études référencées précédemment n'utilise pas de loi de comportement avec une méthodologie claire pour

l'identification des paramètres. Pour le domaine élastique de la courbe Contraintes/Déformations, toutes utilisent les modules d'Young fournis par les fournisseurs du matériau. Pour le domaine plastique, les études les plus précises définissent l'évolution des contraintes par une succession de droites, sans fournir d'explications sur l'origine des données.

Seuls les travaux de thèse d'Abbas [ABB02] sur le sertissage de contacts automobiles font mention de la réalisation d'essais de traction sur des feuillards de cuivre utilisés dans la fabrication des contacts. Ces essais lui ont permis d'obtenir une courbe contrainte/déformation qu'il a ensuite intégrée au logiciel Abaqus® pour mener à bien ses simulations. Pour le comportement des brins de cuivre, Abbas explique qu'*il est quasi impossible de faire des tests de traction sur des brins qui ont des diamètres de 0.25 mm, voire 0.18 mm*. Il a donc opté pour l'utilisation des données fournies par les fabricants de câble.

Le manque de données matériaux réside en grande partie dans la difficulté de réaliser des essais mécaniques sur échantillons de si petites dimensions. Pourtant, la connaissance précise de ce comportement mécanique est indispensable pour réaliser des simulations numériques prédictives du sertissage et de la tenue mécanique.

1.2.3. Conclusion sur la recherche bibliographique :

Cette étude bibliographique a montré qu'il est impossible de simuler efficacement le procédé de sertissage par un modèle 2D en faisant l'hypothèse des déformations planes. Cette impossibilité est d'autant plus vraie dans notre étude car chaque simulation de sertissage sera suivie d'une simulation de tenue mécanique faisant intervenir le troisième axe d'étude.

Le logiciel Forge® sera utilisé dans le cadre de cette thèse. Ce logiciel est basé sur un formalisme de résolution mécanique implicite. Bien que l'ensemble des auteurs privilégie l'usage d'un formalisme de résolution explicite, la gestion efficace des problèmes de contact de ce logiciel est démontrée et aura l'avantage de permettre de réaliser des simulations réalistes.

Dans le cadre de modèles fortement multi domaines, le paramétrage des interactions sera étudié avec attention. La détermination des coefficients de frottement entre les différents corps déformables devra être précise et méthodique. Nous devrons également faire preuve de méthode lors de la caractérisation des matériaux de nos différents échantillons, afin de s'assurer de la précision des résultats de simulations numériques.

1.3. Objectifs du travail de thèse et plan du manuscrit :

L'objectif final de la thèse est de disposer de simulations numériques capables de reproduire, avec une grande précision et un temps de calcul contenu, le procédé de sertissage et la tenue mécanique de contacts sertis. Ces travaux numériques seront basés sur le logiciel Forge®, dédié à la simulation de la mise en forme des métaux. Pour alimenter nos mises en données, une caractérisation des matériaux sera réalisée, en utilisant les dispositifs expérimentaux disponibles au Centre de Mise en Forme des Matériaux. L'analyse des résultats de simulations de sertissage et des simulations de tenue mécanique devra permettre de conclure sur la fiabilité de l'outil de simulation. Les niveaux de criticité de paramètres géométriques, matériaux ou procédés seront étudiés. L'utilisation du logiciel Forge® devra également permettre de valider, à terme, les courbes enveloppes d'efforts de sertissage mise aux point expérimentalement par les partenaires du projet.

En comptant ce premier chapitre d'introduction, le mémoire de thèse est divisé en cinq chapitres. Le second chapitre concernera la réalisation des essais mécaniques en vue de caractériser les paramètres rhéologiques des lois de comportement des matériaux de nos échantillons de types contacts et brins. La présentation détaillée des moyens expérimentaux sera abordée, ainsi que l'analyse des forces et faiblesses associées à chaque dispositif. La synthèse des courbes expérimentales pour chaque échantillon sera également faite.

Le troisième chapitre sera en partie consacré à la réutilisation des données expérimentales acquises au second chapitre en vue de déterminer les valeurs des paramètres rhéologiques. Le concept de l'analyse inverse sera présenté, puis l'analyse des résultats sera effectuée. Une fois les paramètres rhéologiques déterminés, on présentera dans la dernière partie de ce chapitre la méthode employée pour valider les lois de comportement matériaux.

La méthode de mise au point des simulations de sertissage fera l'objet de la première partie du quatrième chapitre. Les modèles des deux technologies de sertissage, à savoir la technologie cuivre et la technologie aluminium, seront présentés successivement. La vérification des géométries pour la mise au point des maillages, l'analyse des paramètres de frottement pour la prédiction précise des phénomènes de contact, ainsi que la détermination des profondeurs d'indentation effective ou des cinématiques d'outils, feront partie intégrante de ce chapitre. Sa seconde partie sera réservée à la présentation des résultats des simulations de références et des discussions associées.

Le début du cinquième chapitre présentera le concept de courbes enveloppes de sertissage, et permettra de faire le lien entre les travaux de thèse et les attentes industrielles. L'ensemble des configurations de sertissage, plus ou moins critiques au regard des normes des partenaires industriels, seront présentées et analysées. Les simulations de tenue mécanique associées seront également exploitées, dans le but de vérifier le comportement du logiciel Forge® et les prévisions numériques.

Finalement, le bilan des travaux réalisés et les perspectives ouvertes seront abordés en conclusion.