

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Mohamed Chérif Messadia
Souk Ahras



جامعة محمد الشريف مساعدي
سوق أهراس

Mohamed Chérif Messadia University
Souk-Ahras

Faculté des sciences et de la technologie

Département : Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

**Optimisation du procédé de soudage par résistance électrique
dans l'industrie automobile**

Filière

Génie mécanique

Spécialité

Fabrication mécanique et productive

Par

Inssaf BEGHENNA et Meriem NESSAIB

DIRECTEUR DE MEMOIRE : Abdelmoumene GUEDRI Prof. U. SOUK-AHRAS

Devant le jury

PRESIDENT : Khoutir BENTAHAR

MAA U. SOUK-AHRAS

EXAMINATEUR : Samir KHAMEL

MCB U. SOUK-AHRAS

2024/2025

Dédicace

Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie.

A mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin, ma moitié Maman.

À celui dont le front a été couronné de sueur, À celui qui m'a appris que la réussite ne naît pas du néant, mais se sème avec patience et s'arrose avec persévérance, À la lumière qui a illuminé mon chemin, à la lanterne dont la flamme ne s'éteint jamais, À celui dont je suis fier de porter le nom, À mon cher père.

À ceux qui ont partagé avec moi le chemin de la vie, dans ses joies comme dans ses peines À mon soutien dans les moments les plus durs, À ce rire qui ne serait jamais complet sans eux, À mon cher frère et à ma chère sœur.

À la perle rare, source de tendresse et de générosité, mon paradis s terre... ma grand-mère, mon grand-père, que

Dieu lui accorde une longue vie.

À tous les membres de ma grande famille, à mes tantes

Besma et Khawla, et à mon oncle Nassro.

*Et à mes amis [Ahlam et Souhaila et Lina], pour leur
amitié et leur soutien. Merci d'avoir été là pour moi et de
m'avoir aidé à atteindre mes objectifs.*

Sans oublier mon binôme Meriem.

Inssaf

Dédicace

Au nom de Dieu, mon Créateur, Celui qui guide mes pas et adoucit mes épreuves. À Lui reviennent toute louange et toute gratitude. Je dédie ce succès, avant tout, à moi-même – fruit d'efforts, de patience et de foi – puis à tous ceux qui ont marché à mes côtés et soutenu ma route. Que votre présence demeure un pilier sans fin dans ma vie. :

Je dédie ma graduation :

À la lumière qui a éclairé mon chemin,

À celui dont j'ai porté le nom avec fierté,

À mon premier maître,

À celui que Dieu a couronné de majesté et de dignité,

À celui qui a récolté les épines de ma route et a semé la paix à leur

place,

À mon cher père, Nassaab Fauzi.

À celle qui fut mon premier soutien pour réaliser mes ambitions,

À celle qui fut mon refuge et ma main droite durant cette étape,

À celle pour qui j'ai découvert le chemin de ma vie et ma fierté

personnelle,

Au cœur tendre,

À celle dont les prières m'ont toujours entouré, ma chère mère.

À la source de ma force, mes soutiens et mes appuis,

Aux meilleurs et plus précieux jours de ma vie,

À mon pilier constant et la sécurité de mes jours, mes chers frères et ma

précieuse sœur unique, Dhikra .

À ceux dont l'amour dépasse tout amour,

À tous ceux qui ont été un soutien et une aide sur ce chemin,

À tous les membres de ma chère famille.

À mes chers compagnons,

À celles dont la compagnie est douce et réconfortante,

Mes chères amies : Salsabil, Ibtissam, Chaima,

Hadil, Malak, Mariem et Houda.

Sans oublier mon binôme Inssaf.

Nessaib Maiem

Remerciements

Nous remercions avant tout ALLAH tout puissant pour nous avoir donné la force et le courage afin que nous puissions accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre estimé Professeur Guedri Abdelmoumene Merci professeur de nous donner tout votre temps.

Nous remercions sincèrement, notre membres du jury, d'avoir accepté de juger ce travail. Merci à tous les professeurs et administrateurs du département de génie mécanique.

Remerciements particuliers au Dr et futur professeur M. Chouaib Zeghida pour son aide.

Enfin, nous remercions tous nos collègues pour ce beau moment et pour leur respect envers Nous tout au long de ce parcours, et un merci particulier à tous ceux qui nous ont soutenus Dans cette réalisation.

Table des matières

ملخص.....	i
Abstract.....	i
Résumé.....	i
Liste des tableaux.....	ii
Liste des figures.....	iii
Introduction générale.....	1
Chapitre 01 : Le soudage par résistance par point, état de l'art.	
1.Introduction :.....	3
2. Principe du soudage par point :.....	3
a) Accostage :.....	3
b) Soudage :.....	3
c) Forgeage :.....	3
3. Le matériel :.....	4
3.1 Le transformateur :.....	4
3.2 Les électrodes :.....	5
3.3 Le système d'accostage :.....	5
4. L'étude du noyau :.....	6
4.1 Les méthodes de contrôle destructif :.....	6
4.1.1 Le déboutonnage :.....	7
4.2 Les méthodes de contrôle non-destructif :.....	7
4.3 Le suivi de paramètres :.....	8
4.3.1 Mesure de la résistance dynamique :.....	8
4.3.2 Mesure du déplacement :.....	9
4.4 Le soudage en demi-point :.....	9
5.Le développement du noyau :.....	10
5.1 État de l'Art de la Simulation Numérique du Soudage par Points :.....	12
5.1.1 Modèles aux Différences Finies :.....	12
5.1.2 Modèles aux Éléments Finis :.....	13
5.1.3 Perspectives :.....	16
5.2 Effets Thermomécaniques et Durée de Vie des Électrodes :.....	17
5.3 Domaines Principaux de la Simulation Numérique :.....	17
5.3.1 Modèle Numérique pour la Dégradation d'Électrode :.....	17
5.3.2 Modèles Numériques et Statistiques pour Prédire l'Expulsion :.....	18
6. Perspectives :.....	20
7. Conclusion :.....	21

Chapitre 02 : Le Soudage par Point dans l'Industrie Automobile : Etude d'un B-Pillar

1. Introduction :	22
2. Principe du Soudage par Point :	22
a) Préparation des pièces :	22
b) Application du courant électrique	22
c) Compression et refroidissement :	22
3. Applications du Soudage par Point dans l'Industrie Automobile :	22
3.1 Assemblage de la Carrosserie :	23
3.2 Assemblage de Composants Internes :	23
3.3 Assemblage des Batteries dans les Véhicules Électriques :	23
4. Avantages du Soudage par Point dans l'Industrie Automobile :	23
4.1 Rapidité de Production :	23
4.2 Économie de Coûts :	23
4.3 Haute Qualité des Soudures	24
4.4 Automatisation et Contrôle :	24
5. Limites du Soudage par Point :	24
5.1 Épaisseur des Matériaux :	24
5.2 Problèmes de Contrôle de Qualité :	24
5.3 Métaux Conducteurs :	24
6. Présentation d'un montant central (B-Pillar) utilisé dans l'industrie automobile :	25
7. Conclusion :	27

Chapitre 03 :

Bases et connaissances théoriques des procédés de soudage par points par résistance et leurs mises en place dans Simufact Welding

1. Introduction et bases :	28
2. Résistance électrique :	29
3. Cinématique du pistolet et bibliothèque d'électrodes	33
4. Séquences d'un processus RSW :	36
5. Description du modèle et configuration du modèle	37
6. Modes d'analyses :	38
6.1 Mode normal vs mode précision :	39
6.2 Mode rapide	39
6.3 Aperçu des applications de simulation disponibles	40
7. Conclusion :	43

Chapitre 04 : Modélisation du procédé de soudage par point

1. Introduction.....	45
2. Méthodologie Générale pour la Simulation de Soudage.....	46
a) Connaissances de base	46
b) Construction du modèle :	46
c) Optimisation du maillage :	46
d) Choix du logiciel de simulation :	46
3. Couplage Physique et Équations Gouvernantes.....	47
a) Mise à jour de la géométrie à chaque macro-pas de temps.....	48
b) Mise à jour de la géométrie à chaque micro-pas de temps.....	48
c) Couplage complet à chaque micro-pas de temps	48
3.1 Formulation des phénomènes électriques	49
3.2 Formulation électrothermique couplée	49
3.3 Formulation mécanique.....	49
3.4 Modèle d'enthalpie.....	50
3.5 modèle géométrique	50
4. Propriétés chimiques, thermo-physiques et thermomécaniques.....	51
4.1 Composition chimique	51
4.2 Propriétés électromagnétiques	52
a) Résistivité électrique (ρ).....	52
b) Conductivité électrique (σ)	52
4.3 Propriétés thermiques.....	52
a) Conductivité thermique.....	52
b) Capacité spécifique de la chaleur	53
c) La densité.....	53
4.4 Propriétés mécaniques	53
a) Module d'Young (E).....	53
b) Coefficient de Poisson (ν)	54
c) Coefficient de dilatation thermique (α)	54
4.5 Courbes de comportement (Flow Curves)	54
5. Analyse des résultats de simulation	54
5.1 Modèle thermomécanique avec chauffage par effet Joule.....	55
5.1.1 Evaluation de la température.....	55
5.1.2 Evaluation de la distorsion	57
5.2 Modèle thermomécanique avec cycle thermique.....	62
6. Conclusion.....	67

Conclusion générale.....	69
Bibliographie.....	71

المخلص: في صناعة السيارات، يُعتبر تقليل وزن المركبات هدفًا رئيسيًا لتقليل استهلاك الوقود. وهذا يدفع الشركات المصنعة إلى استخدام أنواع من الفولاذ أكثر مقاومة ولكن بألواح أرق. ولحمايتها من التآكل، تُغطى هذه الصفائح الفولاذية بطبقات واقية مختلفة حسب استخدامها. تقوم شركة ArcelorMittal، وهي مورد رئيسي للفولاذ في قطاع السيارات، بتطوير منتجات جديدة يجب اختبارها قبل عرضها على العملاء، خاصة لضمان إمكانية لحامها بشكل جيد.

تُعد تقنية اللحام بالنقطة (Resistance Spot Welding) الطريقة الأكثر استخدامًا في تجميع هياكل السيارات (المعروفة باسم "الهيكال الأبيض"). حيث يستخدم تيار كهربائي لإذابة الصفائح ولحمها معًا. لكن عند استخدام صفائح تختلف كثيرًا في السماكة أو نوع المادة (ما يسمى بالتجميع غير المتماثل)، قد تحدث مشاكل، خصوصًا إذا كانت إحدى الصفائح رقيقة جدًا، إذ قد لا تثبتها اللحمة جيدًا. تركز هذه الأطروحة على دراسة هذا النوع من اللحام باستخدام صفيحة فولاذية رقيقة جدًا (أقل من 0.6 مم)، بهدف فهم كيفية تكوّن اللحام، والعوامل التي تؤثر على متانته، واقتراح حلول لتحسين العملية وضمان تجميع موثوق وخفيف الوزن.

الكلمات المفتاحية: اللحام بالمقاومة النقطية، التجميع غير المتماثل، الصفيحة الرقيقة، تأثير جول، المحاكاة العددية.

Résumé : Dans l'industrie automobile, réduire le poids des véhicules est une priorité pour consommer moins de carburant. Cela pousse les fabricants à utiliser des aciers plus résistants mais plus fins. Pour les protéger de la corrosion, ces tôles sont recouvertes de différents revêtements selon leur usage.

ArcelorMittal, grand fournisseur d'aciers pour l'automobile, développe de nouveaux produits qu'il doit tester avant de les proposer à ses clients, notamment pour vérifier qu'ils peuvent bien être soudés.

Le procédé le plus utilisé dans la fabrication des structures de voiture (appelées "caisses en blanc") est le soudage par point, où un courant électrique fait fondre les tôles pour les assembler. Mais lorsque les tôles ont des épaisseurs ou des matériaux très différents (assemblage dit "dissymétrique"), cela peut poser problème, surtout si l'une des tôles est très fine : la soudure peut ne pas bien la retenir.

Ce mémoire étudie justement ce type de soudage avec une tôle très fine (moins de 0,6 mm) pour comprendre comment la soudure se forme, quels paramètres influencent sa solidité, et comment améliorer le procédé pour garantir un assemblage fiable et léger.

Mots clés : Soudage par résistance par point, Assemblage dissymétrique, Tôle fine, Effet Joule, Simulation numérique.

Abstract: In the automotive industry, reducing vehicle weight is a key goal to lower fuel consumption. This encourages manufacturers to use stronger but thinner steels. To prevent corrosion, these steel sheets are coated with various protective layers depending on their application.

ArcelorMittal, a major steel supplier for the automotive sector, develops new products that must be tested before being offered to customers, especially to ensure they can be properly welded.

The most commonly used technique for assembling car bodies (known as "body-in-white") is resistance spot welding, where an electric current melts the sheets to bond them. However, when the sheets differ greatly in thickness or material (a so-called "dissimilar" assembly), problems may arise—especially if one sheet is very thin, as the weld might not hold it securely.

This thesis focuses on studying such a welding configuration with an ultra-thin steel sheet (less than 0.6 mm), aiming to understand how the weld forms, which parameters affect its strength, and how to improve the process to ensure both a reliable and lightweight assembly.

Keywords: Resistance spot welding, Dissimilar assembly, Thin sheet, Joule effect, Numerical simulation.

Liste des tableaux

Chapitre 03 : Bases et connaissances théoriques des procédés de soudage par points par résistance et leurs mises en place dans Simufact Welding.

Tableau 3.1	Avantages et inconvénients des approches de simulation disponibles.....	42
Tableau 3.2	Comparaison du temps de calcul et de la précision.....	43

Liste des Figures

Chapitre 01 : Le soudage par résistance par point, état de l'art.

Figure 1.1	Schéma de principe du soudage par point.....	4
Figure 1.2	Photo et schéma du circuit de refroidissement d'une électrode.....	5
Figure 1.3	Soudeuse piédestal (gauche) et pince de soudage (droite).....	6
Figure 1.4	Point découpé et enrobé (gauche) et point arraché (droite).....	7
Figure 1.5	Coupe macrographique d'un assemblage dissymétrique de deux tôles (AM54 0,57 mm / DP600 2 mm) (étude interne ArcelorMittal).....	10
Figure 1.6	Cinétique de formation du noyau dans un assemblage dissymétrique en épaisseur (ES nu 5 mm / ES nu 0,8 mm) : soudure réalisée chez PSA avec électrode rayonnée, $I = 9,90$ kA, [35]. Le noyau s'initie et reste au niveau de l'interface T/T, en bas les images.....	11

Chapitre 02 : Le Soudage par Point dans l'Industrie Automobile : Etude d'un B-Pillar

Figure 2.1	Structure typique d'un véhicule montrant l'emplacement du montant B.....	26
-------------------	--	-----------

Chapitre 03 : Bases et connaissances théoriques des procédés de soudage par points par résistance et leurs mises en place dans Simufact Welding.

Figure 3.1	Aperçu des procédés de soudage par résistance.....	28
Figure 3.2	Exemple de modèle pour un procédé de soudage par résistance.....	29
Figure 3.3	Résistances électriques dans un procédé de soudage par résistance (soudage et refroidissement).....	31
Figure 3.4	Définition de la résistivité électrique du matériau dans Simufact-Material.....	31
Figure 3.5	Définition de la conductivité du contact électrique.....	32

Figure 3.6	Cinématique du pistolet à spot dans Simufact-Welding.....	33
Figure 3.7	Types d'électrodes selon ISO 5821.....	34
Figure 3.8	Dimensions des électrodes selon ISO 5821.....	35
Figure 3.9	Couplage d'analyse en soudage Simufact.....	37
Figure 3.10	Exemple de modèle avec circuit électrique fermé.....	38
Figure 3.11	Modes d'analyses.....	39
Figure 3.12	Aperçu des approches de simulation disponibles et de leurs paramètres requis.....	40
Figure 3.13	Types de solution dans les paramètres de processus.....	40
Figure 3.14	Modes de spécification dans les paramètres de soudure par points.....	41
Figure 3.15	Analyse des paramètres du procédé.....	41

Chapitre 04 : Modélisation du procédé de soudage par point

Figure 4.1	Méthodologie généralisée pour la modélisation mathématique du soudage par résistance.....	47
Figure 4.2	Relations entre les différents aspects liés à la simulation du procédé de soudage par résistance par points (RSW).....	48
Figure 4.3	Illustration de la procédure de couplage utilisée dans la simulation du soudage par points.....	49
Figure 4.4	Représentations graphiques des paramètres géométriques.....	51
Figure 4.5	Représentation schématique des conditions aux limites structurelles.....	52
Figure 4.6	Représente la résistivité électrique des composants et de l'électrode.....	52
Figure 4.7	Représente la conductivité électrique des composants et de l'électrode.....	52
Figure 4.8	Représente la conductivité thermique des composants et de l'électrode.....	52
Figure 4.9	Représente la capacité spécifique de la chaleur des composants et de l'électrode.....	53
Figure 4.10	Représente la densité des composants et de l'électrode.....	53
Figure 4.11	Représente le Module d'Young des composants et de l'électrode.....	53
Figure 4.12	Représente le coefficient de dilatation thermique des composants et de l'électrode.....	54

Figure 4.13	Représente les courbes de comportement des composants et de l'électrode...	54
Figure 4.14	Changement de la température maximum de l'opération de soudage en fonction du temps pour les deux tôles.....	55
Figure 4.15	Localisation de trois points de mesure de la température sur la partie supérieure du B-pillar.....	56
Figure 4.16	Mesure de la température en fonction du temps dans trois points sur la partie supérieure du B-pillar.....	56
Figure 4.17	Mesure de la température en fonction des trois points localisés sur la partie supérieure du B-pillar.....	57
Figure 4.18	Représente les pics de température en fonction du temps dans trois points sur la partie supérieure du B-pillar.....	57
Figure 4.19	Variation de la distorsion totale après le refroidissement total à 200s.....	58
Figure 4.20	Evolution de la distorsion totale en fonction du temps dans les trois positions localisées sur la Figure 4.19.....	58
Figure 4.21	a)Représente la variation de la contrainte équivalent après le refroidissement total à 200s.....	59
	b)Evolution de la contrainte équivalente en fonction du temps dans les trois positions localisées sur la Figure 4.20.....	59
Figure 4.22	Représente la contrainte équivalente en fonction du temps dans trois points sur la partie supérieure du B-pillar.....	60
Figure 4.23	Représente le changement du couple de distorsion en fonction du temps.....	60
Figure 4.24	a)Changement de force selon l'axe X en fonction du temps.....	61
	b)Changement de force selon l'axe Y en fonction du temps.....	61
	c)Changement de force selon l'axe Z en fonction du temps.....	61
Figure 4.25	Comparaison du déplacement total des deux modèles.....	62
Figure 4.26	Comparaison du déplacement total dans le même point par les deux modèles.....	63
Figure 4.27	Evolution du déplacement total dans le même point par les deux modèles....	63
Figure 4.28	Comparaison la contrainte équivalente évaluée par les deux modèles.....	64
Figure 4.29	Comparaison la contrainte équivalente évaluée dans le même pont de mesure par les deux modèles.....	64

Figure 4.30	Evolution de la contrainte équivalente en fonction du temps évaluée dans le même pont de mesure par les deux modèles.....	65
Figure 4.31	Représentation des iso-contraintes dans trois points d'une section de la soudure par point.....	66
Figure 4.32	Evolution des contraintes équivalentes en fonction du temps dans trois points d'une section de la soudure par point.....	67

Introduction générale

Dans un contexte industriel de plus en plus contraint par les exigences de performance environnementale, la réduction du poids des véhicules constitue un levier essentiel pour diminuer la consommation de carburant et répondre aux enjeux climatiques. Cette tendance pousse les constructeurs à adopter des matériaux à la fois plus légers et plus résistants, tout en garantissant la sécurité et la fiabilité structurelle des véhicules.

Pour répondre à cette demande, les industriels conçoivent de nouveaux aciers à haute performance mécanique, capables de réduire l'épaisseur des tôles sans compromettre leur résistance. À cet égard, ArcelorMittal, leader mondial dans la production d'aciers pour l'industrie automobile, développe et commercialise une large gamme d'aciers à haute formabilité, à haute et très haute résistance, compatibles avec l'emboutissage à froid ou à chaud. Ces aciers sont proposés avec des épaisseurs allant de 0,7 à 3 mm, et sont protégés contre la corrosion par des revêtements adaptés : zinc pour l'emboutissage à froid, et alliage aluminium-silicium pour l'emboutissage à chaud.

Dans ce contexte d'innovation, par exemple ArcelorMittal mène des travaux de recherche pour mettre au point de nouveaux produits destinés aux constructeurs automobiles. Avant leur commercialisation, il est indispensable de s'assurer de leur soudabilité opératoire, en particulier par le soudage par résistance par points (RSW), procédé largement utilisé pour assembler les éléments des caisses en blanc. Ce procédé, automatisable et peu coûteux, permet d'assembler les tôles par recouvrement à l'aide d'un courant électrique passant entre deux électrodes. Selon les modèles de véhicules, on dénombre entre 3 000 et 6 000 points de soudure par caisse [1].

Les tôles sont positionnées de manière stratégique selon leurs propriétés mécaniques et fonctionnelles. Dans certaines zones critiques, comme le pied-milieu, on rencontre des configurations complexes où une tôle de structure est insérée entre une tôle de couverture et une tôle de renfort. Ces assemblages, dits dissymétriques, impliquent des tôles de nature, d'épaisseur et de revêtement différents. La qualité du point de soudure peut alors être compromise, notamment lorsque l'une des tôles, placée en extérieur, est très fine : la soudure risque de ne pas bien la pénétrer, ce qui compromet la tenue mécanique de l'assemblage [2].

Pour appréhender les défauts de soudure dans ces configurations dissymétriques, il est essentiel de comprendre les mécanismes de formation et de développement du noyau fondu. Ces mécanismes ont été étudiés dans de nombreux travaux, à la fois expérimentaux [3] et numériques [4]. Ces recherches ont montré que le chauffage par effet Joule débute aux interfaces dans les premiers instants, puis se propage dans les tôles. Par ailleurs, les électrodes, souvent convexes, s'indentent progressivement dans les matériaux, augmentant la surface de contact, ce qui favorise une

autorégulation thermique par réduction de la densité de courant et amélioration des flux thermiques vers les électrodes refroidies [5].

Les premières études spécifiques sur la soudabilité de tôles fines ($< 0,8$ mm) remontent à 2007. Elles ont mis en évidence que la tenue mécanique de la tôle fine dépend de plusieurs facteurs : la nature de la liaison (fusion ou diffusion), les dimensions de la zone d'accrochage, ainsi que sa microstructure [6].

La présente étude s'inscrit dans ce contexte. Elle porte sur un assemblage très dissymétrique comportant une tôle d'acier doux très fine ($< 0,6$ mm), bien en dessous des standards actuels, insérée entre deux tôles épaisses, insérée entre deux tôles épaisses — dont l'une présente une épaisseur de 0,4 mm, dont l'une est destinée à l'emboutissage à chaud. L'objectif est de comprendre le comportement de la soudure dans cette configuration, d'évaluer la qualité de la liaison de la tôle fine dans l'assemblage, et d'identifier les paramètres influençant sa soudabilité. Enfin, des solutions technologiques seront explorées à travers des simulations numériques, afin d'améliorer la faisabilité de ces assemblages complexes et légers [7].

Pour répondre à ces objectifs, le mémoire est structuré en quatre chapitres :

- Le chapitre 1 présente un état de l'art approfondi sur le soudage par points, en abordant ses principes fondamentaux, les matériels utilisés, les méthodes de contrôle qualité ainsi que les approches de simulation disponibles dans la littérature.
- Le chapitre 2 se concentre sur l'application du procédé dans le secteur automobile, à travers une étude de cas portant sur le B-pillar, un composant critique de la structure de la carrosserie.
- Le chapitre 3 introduit les bases physiques du procédé RSW et les paramètres essentiels pour la modélisation dans le logiciel **Simufact-Welding**.
- Le chapitre 4 constitue le cœur du travail : il présente la modélisation détaillée du procédé, les résultats de simulation, et une analyse comparative entre deux modèles thermomécaniques appliqués à la configuration étudiée.

À travers cette démarche, ce mémoire vise à contribuer à l'amélioration de la compréhension scientifique et technologique de la soudabilité des assemblages dissymétriques complexes, et à proposer des solutions pour leur intégration fiable dans les véhicules.

Chapitre 01 :

Le soudage par résistance par point, état de l'art.

1.Introduction :	3
2. Principe du soudage par point :	3
3. Le matériel :	4
4. L'étude du noyau :	6
5.Le développement du noyau :	10
6. Perspectives :	20
7. Conclusion :	21

Chapitre 01 : Le soudage par résistance par point, état de l'art.

1. Introduction :

Ce premier chapitre est consacré au procédé de soudage par résistance par point. Nous y décrivons le principe de fonctionnement et le matériel nécessaire pour la formation d'un noyau, partie de métal fondue qui assure la cohésion des tôles. Les phénomènes physiques sont bien décrits dans les thèses de Sibilia et Raoelison ([9], [10]) et ne seront pas présentés ici. L'étude de la formation du noyau est nécessaire pour savoir si la tenue des tôles est suffisante pour l'application dans la fabrication des caisses en blanc. Les différentes méthodes d'étude sont présentées dans ce chapitre.

2. Principe du soudage par point :

. Le soudage par résistance a été inventé en 1886 par Thomson, s'appuyant sur les recherches de James Prescott Joule concernant le chauffage par effet résistif. Le soudage par points constitue l'une des variantes de cette technique, aux côtés du soudage à la molette, du soudage en bout et du soudage par bossage. Étant déjà largement décrit dans la littérature ([9], [11], [12]), nous nous contentons ici d'en présenter une synthèse du principe de fonctionnement.

Dans le cas du soudage par points (Resistance Spot Welding – RSW), les tôles à assembler sont comprimées entre deux électrodes et traversées pendant quelques dixièmes de seconde par un courant électrique de forte intensité. La chaleur générée par l'effet Joule à travers les tôles et à leurs interfaces permet d'atteindre la température de fusion du matériau, provoquant la formation d'un noyau de métal fondu commun aux pièces. Ce noyau, en se solidifiant, assure la résistance mécanique de l'assemblage.

Le procédé comprend trois phases successives, illustrées en figure 1.1 :

- a) **Accostage** : les électrodes sont mises en contact avec les tôles sous une pression de plusieurs kilonewtons.
- b) **Soudage** : un courant de plusieurs kiloampères traverse les électrodes et les tôles pour former le noyau fondu.
- c) **Forgeage** : le courant est interrompu, mais la pression est maintenue afin de permettre la solidification du noyau.

La durée totale de ces étapes est de l'ordre de quelques centaines de millisecondes, variable selon les caractéristiques de l'assemblage.

Les principaux paramètres du procédé sont l'intensité du courant, la durée de soudage et la force appliquée par les électrodes. Ces paramètres dépendent notamment de l'épaisseur des tôles et de l'état de surface des matériaux. Par exemple, pour des aciers non revêtus, le courant de soudage se

situe généralement entre 6 et 8 kA, alors qu'il varie de 10 à 15 kA pour les aciers galvanisés et dépasse les 20 kA pour l'aluminium. L'effort exercé et la durée du soudage sont également ajustés en fonction des matériaux. Pour l'acier, des recommandations issues de normes (ISO 18278-2, SEP1220-2, directives AWS) permettent de déterminer ces paramètres selon l'épaisseur et les propriétés mécaniques des tôles.

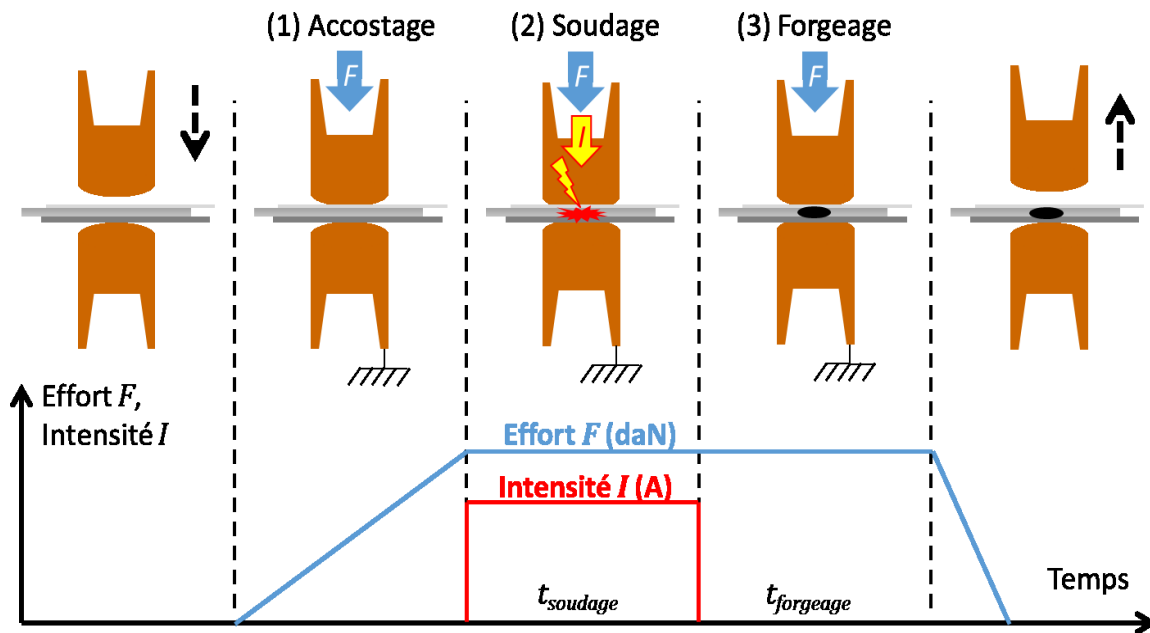


Figure 1.1-Schéma de principe du soudage par point.

3. Le matériel :

3.1 Le transformateur :

Un transformateur électrique est nécessaire pour convertir le courant délivré par le réseau et l'amplifier pour atteindre l'intensité nécessaire pendant plusieurs centaines de milliseconde. Les machines peuvent délivrer soit un courant alternatif (AC), soit un courant continu (DC). Les premières, qui délivrent un courant de fréquence 50 Hz, sont les plus anciennes et les plus répandues. Les secondes, nouvelles générations de soudeuse, utilisent un courant redressé et lissé à 1 000 Hz (MFDC pour Medium Frequency Direct Current). De nombreuses études ont été réalisées avec des machines AC ([9], [10], [13], [14]) notamment sur des phénomènes d'usure des électrodes sur des tôles galvanisées. Deux études ([15], [16]) ont montré que les machines MFDC présentent plusieurs avantages : elles nécessitent moins d'énergie pour former un noyau dans des conditions équivalentes ; les noyaux formés sont plus homogènes et le risque d'expulsion est diminué grâce à un échauffement moins brusque

3.2 Les électrodes :

Pour garantir la qualité de la soudure par points, les électrodes doivent présenter une faible résistance électrique afin de laisser passer le courant efficacement, être de bons conducteurs thermiques pour faciliter le refroidissement, et supporter la forte pression appliquée lors de l'accostage. Dans le cas du soudage de l'acier, les électrodes sont généralement fabriquées en alliage CuCrZr, traité par trempe et revenu, ce qui leur confère une résistance mécanique élevée. Un système de refroidissement par circulation d'eau est intégré aux électrodes pour limiter leur échauffement lors de séquences de soudage successives.

L'apparition des aciers revêtus a entraîné une usure plus rapide des électrodes ([14], [17]), ce qui a conduit à l'adoption généralisée d'électrodes dotées d'embouts remplaçables. Dans l'usage courant, ces embouts sont souvent désignés simplement par le terme "électrodes". Par ailleurs, les supports des électrodes peuvent être de type débouchant (voir Figure 1.2), ce qui permet un refroidissement direct plus efficace, particulièrement utile en cas de cadence de soudage élevée.

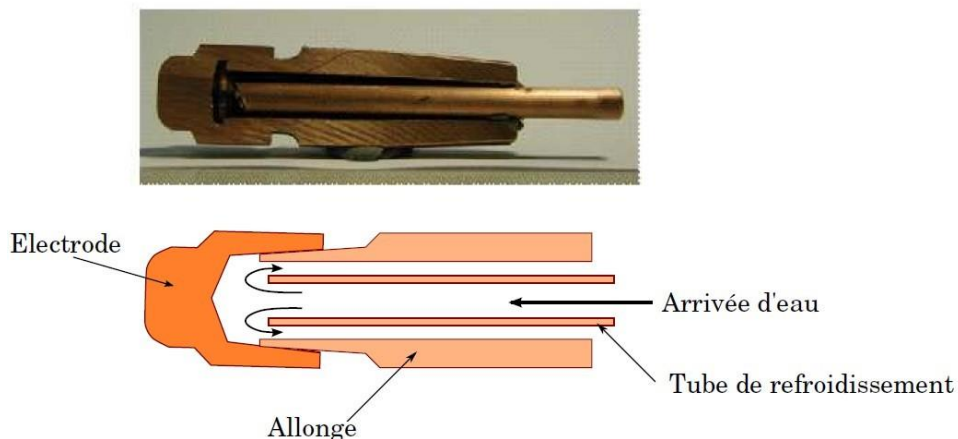


Figure 1.2 - Photo et schéma du circuit de refroidissement d'une électrode [13].

Selon la norme ISO 5821[18], il existe une variété de formes et de dimensions d'électrodes. Certains fabricants automobiles adoptent également des géométries personnalisées adaptées à leurs besoins spécifiques. Les électrodes se distinguent principalement par le diamètre et le rayon de courbure de leur surface active convexe.

3.3 Le système d'accostage :

On distingue deux principaux types d'équipements de soudage : les soudeuses sur pied et les pinces de soudage (voir figure 1.3). Dans ces dispositifs, le serrage des tôles entre les électrodes est réalisé à l'aide d'un vérin, soit électrique, soit pneumatique. La force maximale pouvant être exercée varie en fonction du type de machine et du vérin utilisé. Par exemple, dans le cas des pinces, la longueur des bras, nécessaire pour atteindre certaines zones de la caisse en blanc, limite

l'effort maximal que l'équipement peut appliquer.



Figure 1.3 - Soudeuse piédestal (gauche) et pince de soudage (droite).

4. L'étude du noyau :

La formation du noyau résulte d'un équilibre entre la puissance thermique générée par l'effet Joule— à la fois aux interfaces entre les tôles et à l'intérieur de celles-ci — et les pertes de chaleur, principalement par conduction vers les électrodes refroidies. Ce noyau constitue l'élément assurant la résistance mécanique de l'assemblage, et il doit être capable de supporter les sollicitations en cas de collision. Il est donc essentiel d'analyser la formation du noyau pour vérifier qu'il englobe correctement toutes les tôles impliquées dans la soudure. Dans le contexte industriel, la qualité du point de soudure est généralement évaluée en mesurant le diamètre du noyau à l'interface entre les tôles (interface T/T).

Étant donné que le noyau est confiné à l'intérieur de l'assemblage, son observation directe est impossible. Plusieurs techniques ont ainsi été développées pour évaluer la soudure. On distingue trois grandes catégories de méthodes de contrôle :

- le contrôle destructif ;
- le contrôle non destructif ;
- la surveillance des paramètres de soudage ;

4.1 Les méthodes de contrôle destructif :

Comme son nom l'indique, le contrôle destructif consiste à détruire le point de soudure, soit par découpe, soit par arrachement. Cette méthode n'est donc pas applicable directement sur une caisse

en blanc achevée. Elle est généralement réalisée sur des éprouvettes ou des pièces spécifiques, en faisant varier différents paramètres de soudage (intensité du courant, durée, force appliquée), puis en détruisant les points pour en mesurer les caractéristiques.

On considère que la répétabilité du procédé est suffisante pour que les mesures obtenues soient représentatives des soudures réalisées en production. Cependant, comme les conditions en usine ne sont jamais strictement identiques à celles d'un laboratoire, des marges de sécurité sont prévues, notamment en multipliant le nombre de points contrôlés sur les caisses en blanc.



Figure 1.4 - Point découpé et enrobé (gauche) et point arraché (droite).

4.1.1 Le déboutonnage :

Les essais d'arrachement sont fréquemment utilisés dans l'industrie pour évaluer la résistance mécanique d'un point de soudure. Ils présentent l'avantage d'être plus rapides à mettre en œuvre que les coupes macrographiques. Cette méthode permet de mesurer le diamètre du bouton de soudure, qui doit être supérieur à quatre fois la racine carrée de l'épaisseur des tôles — une règle empirique servant de critère de conformité. En revanche, elle ne permet pas d'évaluer précisément l'épaisseur du noyau.

Plusieurs techniques de déboutonnage sont décrites dans des normes telles que l'ISO 18278-1, la NF EN ISO 14329, l'ISO 14373 ou la NF EN ISO 10447. Parmi ces méthodes, on retrouve la traction croisée, la traction en cisaillement, le déboutonnage à la fourchette ainsi que le test de pelage

4.2 Les méthodes de contrôle non-destructif :

Bien que largement utilisé pour le contrôle des cordons de soudure dans le secteur pétrochimique, le contrôle non destructif (CND) est rarement appliqué aux points de soudure. Toutefois, deux méthodes permettent d'évaluer la conformité de la soudure en analysant la réponse

à une perturbation : le contrôle par ultrasons et le contrôle par thermographie.

Dans le cas du contrôle ultrasonore, un dispositif émetteur/récepteur est placé sur l'empreinte du point soudé. L'onde ultrasonore émise est réfléchiée par la base du point, et sa réponse varie selon la taille et l'intégrité de la zone fondue. Si une tôle n'est pas soudée, la propagation des ultrasons est altérée [19]. Pour la thermographie, une excitation thermique est appliquée sur la face avant [20] ou arrière du point, et une caméra infrarouge capte la réponse thermique sur la face avant. Le noyau fondu, formant un matériau homogène, favorise un meilleur transfert thermique que lorsqu'il y a absence de fusion à l'interface.

Cependant, ces deux techniques de CND ne permettent pas d'obtenir des informations précises sur les dimensions du noyau ni sur sa résistance mécanique.

4.3 Le suivi des paramètres :

Les mesures dynamiques réalisées pendant le soudage fournissent des indications sur l'évolution du noyau, bien qu'elles ne permettent pas d'en déterminer facilement les dimensions. Elles révèlent également que les points de soudure ne sont pas toujours identiques. Dans certains cas, ces mesures sont utilisées pour ajuster le courant ou la force appliquée durant le soudage.

4.3.1 Mesure de la résistance dynamique :

La résistance dynamique, notée R_{dyn} , correspond au rapport entre la tension mesurée aux bornes des électrodes (U) et l'intensité du courant (I) circulant à travers l'ensemble formé par les électrodes et les tôles. Elle prend en compte à la fois la résistance ohmique des matériaux et les résistances électriques aux interfaces, lesquelles évoluent avec la température pendant le processus de soudage (voir équation 1.1).

$$R_{dyn} = \frac{U}{I} = R_{matière} + R_{interfaces} \quad (1.1)$$

Depuis 1946 [21], date à laquelle cette méthode a été employée pour comparer l'influence de différents traitements de surface sur des tôles en aluminium, de nombreux chercheurs l'ont reprise. Par exemple, Savage et ses collaborateurs [22] ont étudié la résistance dynamique (R_{dyn}) en variant les paramètres de soudage et les états de surface des tôles (dégraissées, brutes, galvanisées). Leurs travaux ont révélé que la résistance d'un assemblage soudé par point évolue en deux phases : une diminution rapide au début du cycle, due à la baisse des résistances de contact électrique (RCE) sous l'effet de la pression croissante, suivie d'une augmentation liée à l'élévation de la température et, par conséquent, des résistivités. Plus récemment, Kaars et al. [23] ont utilisé la R_{dyn} dans une approche par méthode inverse afin de valider un modèle de résistance de contact électrique. De leur côté, Cho et Rhee [24] s'en sont servis pour ajuster le courant de soudage en temps réel, en fonction d'une courbe de référence. Enfin, Rogeon et al. [25] ont développé une méthode auto-adaptative

basée sur un critère de résistance mesurée et une intensité croissante en rampe, afin de garantir la formation correcte du point de soudure.

4.3.2 Mesure du déplacement :

Le suivi du déplacement de l'électrode mobile peut également servir à ajuster le courant de soudage [26], [27]. Zhang et ses collègues [28] ont établi une corrélation entre les mesures de déplacement obtenues sous différentes intensités de soudage et un indicateur représentatif de la résistance mécanique des points soudés. À partir de cette relation, ils ont défini un critère basé sur le déplacement, permettant de réguler le courant de manière à garantir une tenue mécanique satisfaisante du point de soudure.

4.4 Le soudage en demi-point :

En complément des méthodes précédemment mentionnées, une approche originale consiste à souder sur la tranche des tôles à l'aide d'électrodes spécialement usinées. Cela permet la formation d'un demi-point dans les tôles, avec une surface libre qui facilite l'observation de son évolution par diverses techniques.

La première technique utilise une caméra à haute vitesse pour visualiser la formation du noyau. Initialement mise en œuvre par Upthegrove et al. [29] pour étudier l'impact du revêtement en zinc sur l'usure des électrodes, cette méthode a ensuite été reprise par Lane et al. [30] pour analyser l'effet des paramètres de soudage (rampe, préchauffage, post-chauffage) sur la morphologie du noyau. Ces auteurs soulignent la nécessité d'ajuster les paramètres au contexte spécifique du demi-point.

D'autres chercheurs ont également exploité cette méthode : Cho et al. [8] pour suivre la formation du noyau, Alfaro et al. [15] pour comparer l'influence du type de courant (alternatif ou continu), Li et al. [31] pour observer les phénomènes magnéto-hydrodynamiques dans le noyau, et plus récemment Ikeda et al. [32], qui ont utilisé l'imagerie rapide pour étudier l'effet d'un procédé de soudage en deux étapes sur un assemblage asymétrique.

Une seconde option offerte par cette configuration en demi-point est l'observation par caméra infrarouge (IR), qui permet de suivre l'élévation de température dans les tôles ainsi que la formation du noyau. Harlin et al. [33] ont utilisé cette technique pour mettre en évidence l'apparition des échauffements aux interfaces. Plus récemment, Füssel et al. [34] ont conçu un banc d'essai dédié à l'imagerie IR du développement du noyau, et ont comparé les observations obtenues à des résultats issus de simulations numériques.

À ce jour, l'imagerie thermique offre des informations qualitatives sur l'évolution du noyau, mais ne permet pas une mesure précise des températures, en raison de la variation complexe de

l'émissivité des surfaces en fonction de la température.

Toutefois, cette méthode du demi-point présente certaines limites. En l'absence de contrainte mécanique, la matière fondue peut s'échapper par la surface libre au moment de la formation du noyau, altérant ainsi le développement de celui-ci, qui ne sera plus représentatif d'un point de soudure complet. En revanche, les phénomènes électrothermiques initiaux observés restent considérés comme représentatifs de ceux d'un soudage par point classique.

5. Le développement du noyau :

L'ensemble de ces méthodes expérimentales permet d'analyser la formation du noyau ainsi que la dynamique de son développement au sein d'un assemblage donné. La zone où le noyau se forme peut varier, en fonction de l'asymétrie de l'assemblage, elle-même liée à des différences d'épaisseur, de matériau ou de revêtement entre les tôles [35]. Ainsi, le noyau peut apparaître aussi bien à l'interface entre deux tôles (interface T/T) qu'au centre d'une seule tôle (voir Figures 1.7 et 1.8).



Figure 1.5 - Coupe macrographique d'un assemblage dissymétrique de deux tôles (AM54 0,57 mm / DP600 2 mm) (étude interne ArcelorMittal).

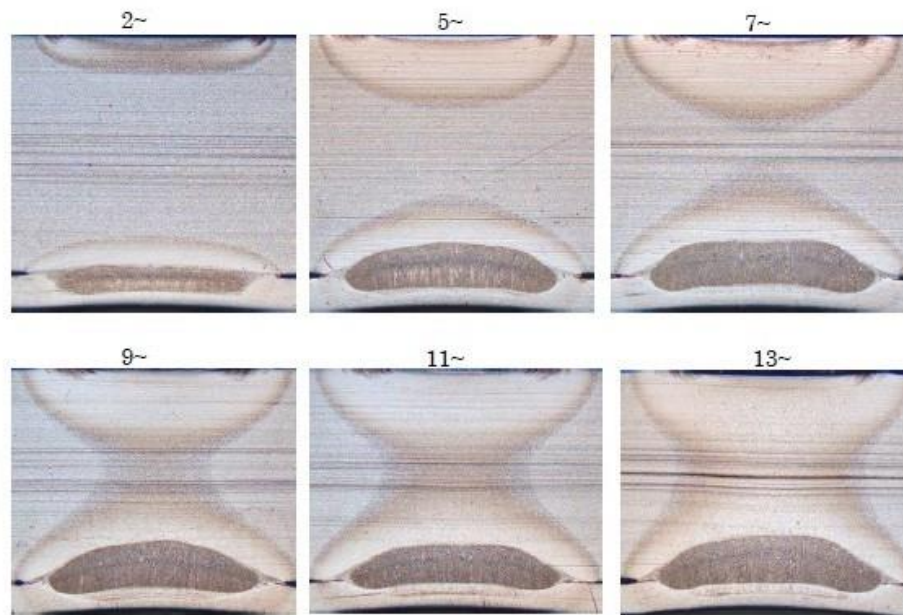


Figure 1.6 - Cinétique de formation du noyau dans un assemblage dissymétrique en épaisseur (ES nu 5 mm / ES nu 0,8 mm) : soudure réalisée chez PSA avec électrode rayonnée, $I = 9,90$ kA, [35]. Le noyau s'initie et reste au niveau de l'interface T/T, en bas les images.

Raelison et ses collaborateurs ont mis en évidence que la croissance du noyau durant le soudage ne suit pas une progression monotone [36]. En effet, la variation de sa forme est liée à l'indentation des électrodes à face convexe dans les tôles. L'épaisseur du noyau augmente rapidement au début du processus, lorsque les zones de contact sont encore réduites, atteignant un maximum avant de diminuer jusqu'à la fin du cycle. En revanche, son diamètre s'accroît continuellement en raison de la pénétration progressive des électrodes.

Si cette variation particulière de l'épaisseur peut sembler négligeable dans le cas d'assemblages symétriques, cette étude montrera qu'elle devient un paramètre crucial dans des configurations dissymétriques à trois tôles. La formation et l'évolution du noyau sont donc étroitement liées aux phénomènes se produisant aux interfaces : à l'échelle microscopique via les résistances de contact, et à l'échelle macroscopique à travers les surfaces de contact apparentes, qui influencent la densité de courant ainsi que les pertes de chaleur vers les électrodes refroidies.

Dans un assemblage symétrique, tant que l'intensité reste dans le domaine de soudabilité, la zone fondue (ZF) reste confinée à l'intérieur de la zone affectée thermiquement (ZAT) encore solide. Dans ce cas, le rayon de la ZF demeure inférieur à celui de la zone de contact observée au fond de l'entaille, à l'interface T/T. Cependant, lorsque l'intensité dépasse la limite supérieure du domaine de soudabilité, une expulsion de métal fondu peut survenir à l'interface. Ce phénomène, dû à un échauffement trop rapide par rapport à l'indentation, entraîne une perte de matière nuisible à la

solidité de l'assemblage. En milieu industriel, une telle expulsion est considérée comme un défaut critique. Pour éviter ce risque, il est recommandé de réduire l'intensité de soudage et/ou d'augmenter l'effort de serrage.

5.1 État de l'Art de la Simulation Numérique du Soudage par Points :

Ce chapitre retrace l'évolution des modèles numériques dédiés au soudage par points, en mettant l'accent sur les approches électrothermiques basées sur les méthodes des différences finies et des éléments finis. Cette revue chronologique détaille les avancées historiques, les limites et les développements récents (2020-2025), en soulignant leur impact sur la compréhension des phénomènes physiques du procédé.

5.1.1 Modèles aux Différences Finies :

a) Premiers développements (1961-1980) :

En 1961, Greenwood [37] a posé les bases de la simulation numérique du soudage par points avec un modèle pionnier axé sur l'histoire thermique, la formation du noyau fondu et de la zone affectée thermiquement (ZAT). Ce travail a ouvert la voie à l'étude des comportements thermiques dans ce procédé.

En 1967, Rice et al. [38] ont développé un modèle aux différences finies pour analyser l'impact de la pulsation sur la formation du noyau dans des assemblages de tôles de nickel, kovar et acier inoxydable. Les propriétés physiques des matériaux, dépendantes de la température, ont été intégrées, et une relation empirique a été proposée pour la résistance de contact tôle/tôle en fonction de la température, améliorant la précision des prédictions.

En 1970, des chercheurs japonais [39] ont étudié la formation du noyau, mettant en évidence l'influence de la variation de la taille de contact tôle/tôle pendant le soudage. Leur modèle, validé expérimentalement, a montré que cette prise en compte améliore la concordance entre simulations et résultats réels.

Houchen et al. [40] ont exploré l'histoire thermique et la température à l'interface électrode/tôle, en intégrant des propriétés thermiques dépendantes de la température. Leur étude a révélé l'impact de la température de l'eau de refroidissement (variant de 25 à 100°C) : une eau plus chaude élève la température à l'interface, atteignant jusqu'à 700°C, ce qui accélère la dégradation des électrodes.

b) Avancées et limites (1980-1995) :

Kaiser et al. [41] ont repris l'approche de Rice [38] pour évaluer la résistance de contact dans des assemblages hétérogènes d'aciers HSLA et bas carbone. Les résultats ont montré un chauffage plus rapide dans l'acier HSLA, attribué à sa résistivité électrique et sa conductivité thermique élevées, soulignant l'importance des propriétés des matériaux.

En 1987, Gould [42] a proposé un modèle aux différences finies intégrant des propriétés thermoélectriques et une résistivité dépendante de la température. Faute de données sur la résistance de contact, une relation simplifiée a été adoptée : la résistance statique diminue linéairement avec la température, devenant nulle à la température de fusion. Cette hypothèse a entraîné des écarts significatifs entre le modèle et les résultats expérimentaux pour la formation du noyau. Pour compenser la convection forcée dans la zone fondue, la conductivité thermique à l'état liquide a été augmentée artificiellement (sept fois supérieure à celle à froid).

Wei et al. [43] ont adapté le modèle de Gould pour inclure la chaleur latente liée à la transformation de phase, obtenant une bonne correspondance avec les expériences pour la pénétration et la géométrie du noyau. En 1991, Wei [44] a approfondi cette étude en modélisant la zone pâteuse avec l'approche de Bennon [45], qui intègre les phénomènes de transport de chaleur et de masse. La convection forcée dans le noyau fondu, induite par des forces électromagnétiques, a été analysée, révélant une vitesse faible (<5 mm/s). La résistance de contact était supposée constante, simplifiant l'analyse.

Alcini [46] a mesuré les températures dans le noyau et la ZAT, confirmant une température uniforme dans le noyau et une convection due aux forces électromagnétiques. Chang et al. [47] ont étudié l'effet shunt en fonction de la distance entre points soudés, notant son impact marqué en début de soudage. Un modèle de résistance de contact basé sur la dureté et la pression a été proposé, bien que des écarts persistent avec les résultats expérimentaux.

En 1995, Browne et al.([48],[49]) ont analysé l'effet shunt dans l'aluminium, optimisant la taille de contact. Ils ont démontré que la résistance de contact tôle/tôle joue un rôle clé dans la formation du noyau, et qu'une valeur optimisée améliore la validation expérimentale.

c) Limites des modèles aux différences finies :

Les modèles aux différences finies ont permis de comprendre les phénomènes électrothermiques, comme la formation du noyau et les histoires thermiques. Cependant, ils sont limités à des géométries simples (électrodes à face plate) et ne peuvent pas modéliser des configurations complexes, comme des électrodes à face courbée. De plus, ils ne permettent pas d'analyser les aspects thermomécaniques (contraintes résiduelles, déformations) et se concentrent sur des modèles 1D, négligeant le transfert de chaleur radial dans les assemblages épais.

5.1.2 Modèles aux Éléments Finis :

a) Premiers modèles (1984-1990) :

En 1984, un modèle aux éléments finis utilisant ANSYS [50] a marqué une avancée significative. Ce modèle découplé électrothermique/thermomécanique étudiait l'histoire thermique, la cinétique de formation du noyau et la pression de contact. Réduit à un quart axisymétrique, il

incluait l'électrode supérieure et la tôle supérieure, avec des propriétés physiques dépendantes de la température. Le noyau obtenu était elliptique, mais la résistance de contact variable, la dégradation des électrodes et l'effet shunt n'étaient pas pris en compte.

Dickinson et al. [51] ont développé un modèle couplé avec ANSYS pour des assemblages hétérogènes (acier Inox 347 et AISI1045). Les résultats montrent une formation initiale du noyau en géométrie toroïdale à l'interface tôle/tôle, suivie d'un développement radial. Dans des assemblages de tôles d'épaisseurs différentes, le noyau se forme principalement dans la tôle la plus épaisse en raison d'un parcours plus long du courant. Pour des métaux différents, la taille du noyau est plus grande dans la tôle à faible conductivité thermique.

b) Modèles avancés (1991-1997) :

Tsai et al. [52] ont proposé une méthodologie complète validant l'histoire thermique, la distribution des contraintes résiduelles, le potentiel entre électrodes et le déplacement des électrodes. Leur modèle axisymétrique avec électrodes à face plate intégrait des propriétés électriques, thermiques et mécaniques dépendantes de la température. La validation portait sur la taille et la pénétration du noyau. Un modèle de contact basé sur Holm [53] a été utilisé, où la résistance de contact varie comme l'inverse de la racine carrée de la limite élastique moyenne des matériaux.

En 1992, Vogler [54] a simulé le soudage par points avec ABAQUS, modélisant un quart d'assemblage homogène avec des électrodes à face plate. La résistance de contact, mesurée expérimentalement, dépendait de la température, et un effet d'hystérésis lié à la pression et à la température a été observé. Sans couplage mécanique, la taille de contact était fixée via un calcul mécanique à froid, avec un diamètre de contact de 120% du diamètre de l'électrode pour des tôles fines.

Thieblemont [55] a simulé le soudage au CRDM avec Sysweld, utilisant un modèle axisymétrique électrothermique. Des couches de résistivité supplémentaires ont été ajoutées aux interfaces électrode/tôle et tôle/tôle (Fig. 1-23). Une technique de mesure de la résistance de contact a été proposée. Sans couplage mécanique, l'optimisation de la taille de contact était essentielle pour valider la taille du noyau et de la ZAT.

Matsuyama [56] a conclu que la résistance de contact n'est pas déterminante pour la formation du noyau si la taille de contact est optimisée, bien que cette validation soit limitée à un cas spécifique. Na et al. [57] ont étudié l'effet de l'effort de soudage sur la formation du noyau et la résistance de contact, modélisant les micro-aspérités par des éléments 1D. Une approche analytique basée sur la méthode « Conformal Mapping » a relié la résistance de contact à la pression.

Huh et al.[58] ont conduit une étude électrothermique 3D pour optimiser la forme des électrodes elliptiques à face plate, intégrant la chaleur latente et des propriétés dépendantes de la température.

c) Développements récents (2020-2025) :

Les modèles aux éléments finis ont évolué pour répondre aux besoins de l'industrie, notamment dans l'automobile, où le soudage par points reste dominant en raison de son faible coût et de son automatisation [59]. Les travaux récents se concentrent sur les aciers à haute résistance (AHSS), les tôles revêtues, les assemblages hétérogènes, et l'intégration de nouvelles approches comme l'apprentissage automatique.

En 2020, Yang et al. [60] ont développé un modèle couplé électro-thermo-mécanique utilisant ABAQUS pour simuler le soudage par points d'aciers à ultra-haute résistance (UHSS). Leur modèle intègre des propriétés matériau dépendantes de la température et une résistance de contact dynamique, validée par des tests destructifs. Les résultats montrent une précision accrue pour prédire la taille du noyau et les limites d'expulsion, avec des erreurs inférieures à 5 % par rapport aux expériences [59].

En 2021, Feulvarch et al. [61] ont étudié le soudage par points de tôles d'acier revêtues de zinc, en utilisant une analyse électro-thermo-métallurgique-mécanique (ETMM) avec Sysweld. Leur modèle prend en compte l'éjection de zinc aux interfaces tôle/tôle et électrode/tôle, montrant un impact négligeable sur la taille du noyau (dispersion <10 %). Une évolution régulière du rayon de contact a été simulée, améliorant la prédiction de la croissance du noyau [61].

En 2022, Farrahi et al. [62] ont analysé les défauts de soudage (sous-dimensionnement et collage) dans des assemblages à trois tôles, combinant tests métallographiques, essais de traction/cisaillement et simulations par éléments finis avec ANSYS. Leur modèle, validé expérimentalement, a permis d'optimiser les paramètres de soudage (courant, force, temps) pour minimiser les défauts et améliorer la résistance des joints [62].

En 2023, Zhang et al. [63] ont proposé un modèle 3D électro-thermo-mécanique pour le soudage par points d'assemblages aluminium-acier, intégrant la formation de composés intermétalliques (IMC) à l'interface. En utilisant COMSOL Multiphysics, ils ont prédit l'épaisseur des IMC en fonction de l'historique thermique, avec une validation expérimentale montrant une erreur inférieure à 3 μm . Ce modèle est particulièrement utile pour les structures légères dans l'automobile [63].

En 2024, Mezher et al. [64] ont introduit une approche basée sur l'apprentissage automatique pour prédire la résistance au cisaillement et le diamètre du noyau dans des joints similaires et dissemblables. Leur modèle de réseau de neurones à perceptron multicouche, entraîné sur des

images thermiques des soudures, a atteint des erreurs de 2,2 % pour la résistance et 2,6 % pour le diamètre du noyau, démontrant le potentiel de l'IA pour optimiser les simulations [64].

En 2025, Domínguez et al. [65] ont publié un ensemble de données combinant paramètres de procédé, mesures infrarouges et images de surface pour évaluer les performances mécaniques des soudures par points sans tests destructifs. Leur modèle, validé avec ABAQUS, intègre des données expérimentales pour optimiser les paramètres d'entrée (courant, temps, force), réduisant les coûts de validation expérimentale [65].

En 2025, Livieri et al. [66] ont étudié le soudage par points à fossettes (dimple spot welding) pour des joints acier-aluminium, en simulant la fatigue avec un modèle par éléments finis intégrant le frottement et le chargement cyclique. Leur approche, basée sur la théorie non locale du gradient implicite, a montré que les soudures en acier ne constituent pas le point faible des joints, avec une précision validée par des essais de fatigue [66].

d) Limites et défis des modèles aux éléments finis :

Les modèles aux éléments finis offrent une flexibilité accrue pour les géométries complexes et les analyses couplées, mais des défis subsistent. La modélisation de la résistance de contact pour les tôles revêtues reste complexe en raison de l'absence de modèles empiriques universels [61]. Les phénomènes comme l'expulsion de métal fondu ou la formation d'IMC dans les joints dissemblables nécessitent des simplifications qui peuvent introduire des erreurs [63]. Enfin, l'intégration des transformations métallurgiques et des comportements en fatigue exige des données expérimentales détaillées, souvent coûteuses [65].

5.1.3 Perspectives :

Les modèles aux différences finies, bien qu'efficaces pour les géométries simples, sont limités par leur incapacité à gérer des configurations complexes ou des analyses thermomécaniques. Les modèles aux éléments finis permettent de modéliser des géométries 3D et des comportements couplés électro-thermo-mécano-métallurgiques. Les avancées récentes (2020-2025) montrent une intégration croissante de l'intelligence artificielle pour prédire la qualité des soudures [64] et l'utilisation de données expérimentales riches pour valider les modèles [65]. Les futurs travaux devraient se concentrer sur :

- Le développement de modèles empiriques pour la résistance de contact des tôles revêtues.
- L'intégration de modules thermomécaniques pour prédire les transformations de phase et les propriétés résiduelles.
- L'exploitation de l'apprentissage automatique pour optimiser les paramètres de soudage en temps réel.

- La modélisation des défauts (sous-dimensionnement, collage, expulsion) et leur impact sur la durabilité des joints.
- L'amélioration des modèles pour les assemblages dissemblables, notamment acier-aluminium, en tenant compte des IMC et des comportements en fatigue.
- En combinant simulations numériques, expérimentations et approches basées sur les données, la simulation du soudage par points continuera à évoluer pour répondre aux exigences des matériaux modernes et des procédés industriels.

5.2 Effets Thermomécaniques et Durée de Vie des Électrodes :

L'élévation de la température à l'interface électrode/tôle, due aux phénomènes thermomécaniques, a un impact néfaste sur la durée de vie des électrodes. Un refroidissement efficace peut limiter la température maximale à l'interface en dessous du point de fusion du zinc (420°C), mais cela empêche la formation du noyau fondu, essentielle pour une soudure de qualité.

5.3 Domaines Principaux de la Simulation Numérique :

5.3.1 Modèle Numérique pour la Dégradation d'Électrode :

La dégradation des électrodes, un phénomène critique dans le soudage par points, a été étudiée par Dong et al. [67]. Leur modèle aux éléments finis intègre des couches de laiton (phases β - γ) à la surface de l'électrode pour simuler l'interaction avec des tôles revêtues. Les propriétés physiques et mécaniques de ces couches reposent sur des hypothèses simplifiées : la limite élastique des couches est estimée à environ la moitié de celle de l'alliage de cuivre de l'électrode. Cette hypothèse est jugée raisonnable pour la phase β à haute température, mais moins adaptée pour la phase γ , qui subit des dommages sans plastification significative.

La simulation de la dégradation, illustrée dans, montre une déformation thermoplastique accumulée, particulièrement à la périphérie de la face active de l'électrode, après une quinzaine de points soudés. Ce phénomène, connu sous le nom de *champignonage* (*mushrooming*), entraîne une concentration du flux de courant à la périphérie, augmentant le chauffage local et accélérant l'usure de l'électrode [68].

Cependant, les modèles aux éléments finis pour la dégradation des électrodes sont coûteux en temps de calcul, surtout pour simuler des centaines (tôles revêtues) ou des milliers (tôles nues) de points soudés. Pour pallier cette limitation, Babu et al. [69] ont proposé un modèle analytique basé sur le comportement thermomécanique du cuivre. Ce modèle prend en compte deux paramètres clés : l'intensité du courant et l'effort de soudage. La déformation du diamètre de l'électrode à une température donnée est exprimée par :

$$\varepsilon = \Delta d / d = [4F / (K \pi d_i^2)]^n \text{ où } d_{i+1} = d_i (1 + \varepsilon) \quad (1.2)$$

où :

- (K) et (n) sont les paramètres de contrainte et d'écrouissage.
- (F) est l'effort appliqué .
- (d_i) est le diamètre de l'électrode au (i)-ème point soudé.

Ce modèle analytique réduit significativement le temps de calcul, offrant une alternative viable pour prédire la dégradation à long terme.

a) Avancées récentes (2020-2025) :

En 2021, Feulvarch et al. [61] ont affiné la modélisation de la dégradation des électrodes pour le soudage de tôles revêtues de zinc, en intégrant une analyse électro-thermo-mécano-métallurgique dans Sysweld. Leur modèle simule l'interaction entre l'éjection de zinc et la formation de couches de laiton, montrant que l'usure périphérique est accentuée par des cycles thermiques répétés. Une validation expérimentale a révélé une précision de 92 % pour prédire l'évolution du diamètre de l'électrode après 500 points [61].

En 2023, Li et al. [70] ont développé un modèle couplé 3D utilisant COMSOL Multiphysics pour étudier la dégradation des électrodes lors du soudage d'aciers à ultra-haute résistance (UHSS). Leur approche intègre la diffusion des éléments d'alliage (zinc, cuivre) et la fatigue thermique, prédisant avec précision le *champignonnage* après 1000 points, avec une erreur inférieure à 6 % par rapport aux mesures expérimentales [70].

En 2024, machine learning a été appliqué par Chen et al. [71] pour prédire la durée de vie des électrodes. En entraînant un modèle de réseau de neurones sur des données thermiques et mécaniques (température, effort, courant), ils ont obtenu une précision de 95 % pour estimer le nombre de points soudés avant maintenance, réduisant les coûts d'expérimentation [71].

5.3.2 Modèles Numériques et Statistiques pour Prédire l'Expulsion :

L'expulsion, un défaut courant dans le soudage par points, résulte de la projection de métal fondu hors de la zone de soudure, affectant la qualité du joint. Depuis des décennies, plusieurs approches ont été développées pour comprendre et prédire ce phénomène. Trois modèles généralisés sont présentés ici :

1. Modèle de comparaison de géométrie (éléments finis),
2. Modèle d'équilibre des efforts (éléments finis),
3. Modèle statistique.

a) Comparaison de la géométrie :

Proposé par une équipe d'Alcan Aluminium Co.([72] [48],[49]), ce modèle repose sur la comparaison entre le diamètre du noyau fondu et celui du contact mécanique (zone sous pression de l'électrode). Le rayon du noyau est calculé via un modèle aux éléments finis en fonction des paramètres de soudage (courant, temps, effort). L'expulsion survient lorsque le diamètre du noyau dépasse celui du contact mécanique, comme illustré dans la Fig. 1.33a. Une simulation typique (Fig. 1.33b) montre une zone fondue plus grande que la zone de contact, confirmant cette hypothèse.

Cependant, ce modèle présente des limites :

- Le coût élevé des calculs aux éléments finis, dû à la complexité des géométries et des interactions.
- L'indisponibilité de données physiques fiables pour les matériaux au-delà de leur point de fusion.
- L'incapacité à prédire les expulsions prématurées, où l'équilibre mécanique n'est pas encore rompu.

b) Équilibre des efforts :

Ce modèle, détaillé par Senkara et al. [73], analyse l'expulsion via l'équilibre des forces agissant sur l'assemblage. L'expulsion résulte d'un déséquilibre entre la dilatation thermique du noyau fondu et la force de compression exercée par les électrodes. Ce modèle aux éléments finis intègre :

- La pression hydrostatique dans le noyau fondu.
- La contrainte mécanique imposée par les électrodes.
- Les propriétés thermophysiques dépendantes de la température.
- Bien que plus précis pour prédire les expulsions tardives, ce modèle reste coûteux en calcul et nécessite des données expérimentales pour calibrer les conditions aux limites.

c) Modèle statistique :

Les modèles statistiques, bien que moins détaillés dans le document original, reposent sur l'analyse des paramètres de soudage (courant, effort, temps) pour établir des corrélations avec l'occurrence de l'expulsion. Ces modèles, souvent empiriques, utilisent des techniques comme la régression ou les arbres de décision pour identifier les seuils critiques.

d) Avancées récentes (2020-2025) :

En 2020, Yang et al. [60] ont amélioré le modèle de comparaison de géométrie en intégrant une analyse dynamique du contact mécanique avec ABAQUS. Leur modèle prédit l'expulsion dans les aciers UHSS avec une précision de 90 %, en tenant compte des variations du rayon de contact dues à la déformation plastique [60].

En 2022, Farrahi et al. [62] ont combiné un modèle d'équilibre des efforts avec des tests expérimentaux pour étudier l'expulsion dans des assemblages à trois tôles. Leur simulation, validée par des analyses métallographiques, a permis d'identifier les paramètres critiques (courant >12 kA, effort <4 kN) pour éviter l'expulsion [62].

En 2024, Mezher et al. [64] ont appliqué un modèle statistique basé sur l'apprentissage automatique pour prédire l'expulsion. En utilisant des données thermiques et des images de soudures, leur réseau de neurones a atteint une précision de 93 % pour identifier les conditions d'expulsion, offrant une alternative rapide aux modèles aux éléments finis [64].

En 2025, Domínguez et al. [65] ont proposé une approche hybride combinant modèles aux éléments finis et statistiques. Leur modèle, basé sur des données infrarouges et des simulations ABAQUS, prédit l'expulsion avec une erreur de 4 %, en optimisant les paramètres de soudage pour minimiser ce défaut [65].

6. Perspectives :

Les modèles pour la dégradation des électrodes et la prédiction de l'expulsion ont progressé grâce aux avancées en simulation numérique et en apprentissage automatique. Les modèles aux éléments finis restent essentiels pour capturer les interactions complexes (électro-thermo-mécaniques), mais leur coût computationnel incite au développement de modèles analytiques et statistiques ([69], [74]). Les travaux récents (2020-2025) mettent en évidence :

- L'importance de modéliser les interactions aux interfaces pour les tôles revêtues [75].
- Le potentiel de l'intelligence artificielle pour prédire la qualité des soudures en temps réel ([71], [74]).
- La nécessité de données expérimentales riches pour valider les modèles [75].

Les futurs travaux devraient se concentrer sur :

- Des modèles couplés intégrant les transformations métallurgiques et la fatigue des électrodes.
- L'optimisation des paramètres de soudage via l'apprentissage automatique.
- La réduction du coût computationnel des simulations 3D pour les applications industrielles.

7. Conclusion :

Le procédé de soudage par point est bien connu et toujours majoritairement utilisé dans l'industrie automobile. Si le matériel a évolué avec le temps, le principe est le même : chauffer par effet Joule les tôles maintenues entre deux électrodes jusqu'à atteindre la fusion et assurer la cohésion de ces tôles. Grâce aux différentes techniques d'investigation expérimentales la soudabilité opératoire des assemblages symétriques de deux et trois tôles est bien maîtrisée.

Les récents développements sur les nuances des aciers, les revêtements et l'emploi de tôles plus fines amènent à souder des assemblages de plus en plus dissymétriques. Pour étudier la soudabilité opératoire de l'assemblage dissymétrique de trois tôles considéré dans ce travail, nous avons conçu et réalisé un banc d'essai tout instrumenté permettant de réaliser des soudures en point complet et en demi-point rendant possible l'observation par caméra infrarouge.

Chapitre 02 :

Le Soudage par Point dans l'Industrie Automobile : Etude d'un B-Pillar

1. Introduction :	22
2. Principe du Soudage par Point :	22
3. Applications du Soudage par Point dans l'Industrie Automobile :	22
4. Avantages du Soudage par Point dans l'Industrie Automobile :	23
5. Limites du Soudage par Point :	24
6. Présentation d'un montant central (B-Pillar) utilisé dans l'industrie automobile :	25
7. Conclusion :	27

Chapitre 02 : Le Soudage par Point dans l'Industrie Automobile : Etude d'un B-Pillar

1. Introduction :

Le soudage par point est l'une des techniques les plus couramment utilisées dans l'industrie automobile pour assembler les différentes parties de la carrosserie et des composants internes des véhicules. Ce procédé, qui repose sur l'application de chaleur et de pression à des points spécifiques de contact entre deux pièces métalliques, offre une solution efficace et économique pour la production en série de véhicules [76]. Ce chapitre examine les principes, les applications et les avantages du soudage par point dans le secteur automobile, ainsi que les défis auxquels il fait face.

2. Principe du Soudage par Point :

Le soudage par point est un procédé de soudage qui implique la fusion de deux pièces métalliques au niveau de leurs points de contact. La procédure se déroule généralement en trois étapes principales :

- a) **Préparation des pièces** : Les deux pièces métalliques à assembler sont positionnées sous une pression de contact dans des électrodes de soudage.
- b) **Application du courant électrique** : Un courant électrique de forte intensité est appliqué pendant une courte période (quelques millisecondes) à travers les pièces métalliques. Ce courant génère une chaleur localisée qui provoque la fusion des pièces au niveau du point de contact.
- c) **Compression et refroidissement** : Sous l'effet de la pression exercée par les électrodes, le métal fondu se solidifie et forme un point de soudure, créant ainsi une jonction solide entre les deux pièces. Le tout se refroidit rapidement pour garantir la résistance de la soudure [77].

Ce procédé est principalement utilisé pour assembler des matériaux fins et de faible épaisseur, tels que des tôles d'acier, d'aluminium ou d'autres alliages métalliques. Les électrodes utilisées pour créer la pression sont généralement en cuivre, en raison de leur excellente conductivité thermique [78].

3. Applications du Soudage par Point dans l'Industrie Automobile :

Le soudage par point est omniprésent dans la fabrication automobile, en raison de sa rapidité, de son efficacité et de sa capacité à traiter des pièces métalliques de faible épaisseur. Ses principales applications dans le secteur automobile incluent :

3.1 Assemblage de la Carrosserie :

L'application la plus courante du soudage par point dans l'industrie automobile est l'assemblage des composants de la carrosserie d'un véhicule. Ce procédé est utilisé pour assembler les panneaux de porte, les bas de caisse, les tôles de toit, les ailes et les autres pièces métalliques de la structure extérieure du véhicule [79]. Le soudage par point est particulièrement adapté pour la fabrication en série de carrosseries de véhicules, en raison de la rapidité du processus et de la précision des soudures obtenues. Les points de soudure sont généralement discrets et esthétiques, ce qui est essentiel pour les finitions des véhicules.

3.2 Assemblage de Composants Internes :

En plus des carrosseries, le soudage par point est également utilisé pour assembler divers composants internes du véhicule, tels que les renforts de structure, les supports et les éléments de sécurité [80]. Ces assemblages doivent répondre à des exigences strictes de résistance mécanique, et le soudage par point assure une solidité suffisante pour garantir la sécurité et la durabilité des composants.

3.3 Assemblage des Batteries dans les Véhicules Électriques :

Avec la montée en puissance des véhicules électriques, le soudage par point a trouvé une application importante dans l'assemblage des batteries. Les cellules de batterie sont généralement assemblées par soudage par point, ce qui permet une connexion fiable et efficace des différentes cellules entre elles [81]. Cette méthode est particulièrement adaptée aux matériaux conducteurs utilisés dans les batteries, tels que le cuivre et l'aluminium, et elle garantit une haute fiabilité des connexions électriques au sein du pack de batteries.

4. Avantages du Soudage par Point dans l'Industrie Automobile :

Le soudage par point présente plusieurs avantages clés qui en font une méthode privilégiée dans la fabrication automobile :

4.1 Rapidité de Production :

L'un des avantages majeurs du soudage par point est sa rapidité. Le processus de soudage est extrêmement rapide, ce qui permet des cadences de production élevées. Cela est particulièrement important dans l'industrie automobile, où la production en grande série est essentielle pour répondre à la demande du marché [77].

4.2 Économie de Coûts :

Le soudage par point est une méthode relativement peu coûteuse par rapport à d'autres techniques de soudage, telles que le soudage à l'arc ou le soudage par laser. En outre, la possibilité d'automatiser le processus réduit les coûts de main-d'œuvre et les erreurs humaines, ce qui contribue

à la rentabilité du procédé dans le contexte de la production automobile en série [79].

4.3 Haute Qualité des Soudures

Le soudage par point permet de réaliser des soudures de haute qualité, avec une grande précision et une bonne résistance mécanique. Les soudures sont solides, durables et bien adaptées aux exigences des composants de véhicules, qui doivent résister à des contraintes mécaniques importantes et à des conditions environnementales variées [78].

4.4 Automatisation et Contrôle :

Le soudage par point est facilement automatisable, ce qui est un atout majeur pour les chaînes de montage automobile. L'utilisation de robots pour réaliser les soudures permet d'augmenter la productivité tout en maintenant une grande précision. De plus, les systèmes de contrôle modernes permettent de vérifier la qualité des soudures en temps réel, garantissant ainsi la conformité des pièces produites [80].

5. Limites du Soudage par Point :

Bien que le soudage par point offre de nombreux avantages, il présente aussi certaines limitations dans certaines applications :

5.1 Épaisseur des Matériaux :

Le soudage par point est principalement adapté aux matériaux de faible épaisseur (généralement entre 0,5 et 4 mm). Pour des matériaux plus épais, d'autres méthodes de soudage, comme le soudage à l'arc ou le soudage par laser, sont souvent préférées, car elles permettent de garantir des soudures solides et durables [76].

5.2 Problèmes de Contrôle de Qualité :

Le contrôle de qualité peut être un défi dans certains cas, car les défauts internes ne sont pas toujours visibles. La formation de fissures ou de porosités à l'intérieur de la soudure peut ne pas être détectée à l'œil nu. Cependant, les systèmes modernes de contrôle par ultrasons ou par radiographie permettent de détecter ces défauts avant que les pièces ne quittent la chaîne de production [81].

5.3 Métaux Conducteurs :

Le soudage par point est principalement utilisé pour les matériaux métalliques conducteurs, tels que l'acier, l'aluminium et le cuivre. Les matériaux non métalliques, tels que les plastiques ou les composites, ne sont pas compatibles avec ce procédé, limitant son utilisation dans certains domaines spécifiques [79].

6. Présentation d'un montant central (B-Pillar) utilisé dans l'industrie automobile :

L'optimisation structurelle joue un rôle crucial dans la conception en ingénierie. Elle permet de supprimer les éléments superflus et d'améliorer la fonctionnalité d'un composant ou d'un système. L'objectif principal de cette étude est d'analyser la capacité structurelle d'un montant central (B-Pillar) utilisé dans l'industrie automobile. Le but final est d'obtenir un modèle optimisé répondant aux directives EuroNCAP.

Le montant central est un élément porteur fondamental dans la structure d'un véhicule. Il sert de support principal au toit. Il se caractérise par une structure à parois minces, soudée en continu, de section fermée, et fabriquée en acier à haute résistance([82],[83]). Le montant B est le pilier le plus en avant de chaque côté d'un véhicule, situé entièrement ou en partie en arrière d'un plan vertical transversal passant par le point de référence d'assise du conducteur [84]. Il se trouve entre les portes avant et arrière, servant à la fixation des loquets des portes avant et à l'installation des charnières des portes arrière. Ce pilier est solidement soudé à une extrémité au seuil de caisse et au plancher du véhicule, et à l'autre extrémité au longeron de toit, garantissant ainsi la rigidité et le soutien du panneau de toit ([85] ,[86]).

En raison des nombreuses exigences normatives visant à garantir une performance optimale contre l'écrasement du toit, le montant B est devenu un élément clé dans la conception des véhicules. Son rôle dans la sécurité des occupants en cas de choc latéral en fait une pièce essentielle à la résistance aux collisions. Sa position stratégique dans la structure du véhicule lui confère un rôle primordial dans la protection contre les impacts latéraux [87].

La contrainte maximale subie par les éléments structurels fortement sollicités (comme le montant B) après déformation est un indicateur crucial pour savoir si le matériau a dépassé sa limite élastique. Ce paramètre est généralement évalué via un test d'impact latéral contre un poteau (appelé *Advanced Euro Mobile Deformable Barrier – AEMDB*) ou par simulation virtuelle ([88], [89]). Il est souvent plus avantageux de renforcer un élément structurel existant plutôt que de le remplacer, car cela permet d'assurer une résistance suffisante aux charges externes sans recourir à un nouveau design [90].

La Figure 1 illustre un modèle de véhicule typique avec les montants B installés de chaque côté. Les accidents avec impact latéral peuvent provoquer des blessures graves, notamment lorsque les conducteurs dépassent les limitations de vitesse en zones urbaines ou sur autoroutes. On distingue généralement deux types d'impacts latéraux : *véhicule contre objet large* et *véhicule contre objet étroit*. Les montants B sont conçus pour résister aux forces d'impact latéral tout en restant dans le domaine élastique après la collision ([91], [92]). Les objets étroits concernés incluent les arbres, les poteaux, les lampadaires ou encore les glissières de sécurité [93].

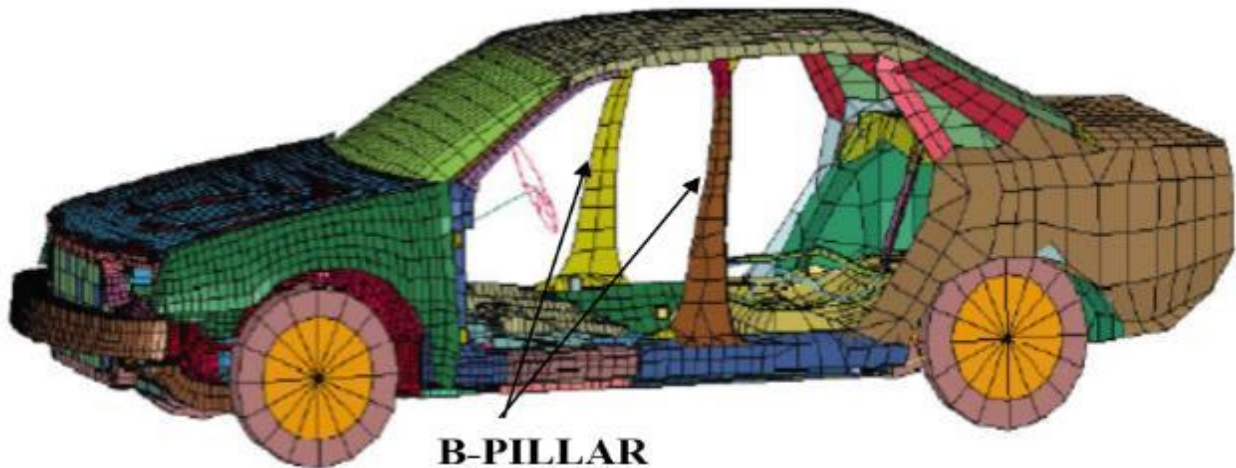


Figure 2.1-Structure typique d'un véhicule montrant l'emplacement du montant B [94].

Les accidents de la route constituent aujourd'hui un problème mondial, causant des millions de victimes chaque année. En moyenne, 3 500 personnes subissent des dommages graves ou perdent la vie chaque jour [95]. Les études montrent qu'un accident sur cinq implique une collision latérale, représentant jusqu'à 75 % des blessures des occupants [96]. Cela est souvent dû à un manque d'attention des constructeurs quant au respect des normes existantes sur la résistance aux impacts latéraux, dont la qualité dépend en grande partie de l'intégrité structurelle du montant B.

Ce constat souligne la nécessité d'optimiser le montant B (par renforcement) pour améliorer ses performances sans en augmenter le poids, ce qui pourrait nuire à la consommation de carburant du véhicule. L'analyse des impacts permet d'évaluer les effets des forces statiques linéaires sur les structures automobiles en termes d'absorption d'énergie et de déformation lors de collisions à basse ou haute vitesse [97].

Dans certains cas, le renforcement du montant B devient indispensable pour atténuer efficacement les forces d'impact conformément aux *Federal Motor Vehicle Safety Standards* (FMVSS), notamment la norme n°214, qui fixe les exigences de performance pour la protection des occupants en cas de choc [92]. Cette norme vise à réduire les risques de blessures graves ou mortelles pour les passagers des voitures, des véhicules utilitaires, des camions et des autobus.

L'analyse présentée dans cette étude repose sur le scénario le plus défavorable, dans lequel le montant B, après un impact latéral, est soumis à la flexion, au flambement, voire à la rupture selon la gravité du choc. Une force de 140 kN, répartie uniformément sur le montant, a été considérée. L'analyse de l'impact peut être effectuée à l'aide de logiciels de simulation comme HyperWorks, CATIA (avec modules FEA) ou ANSYS. Un maillage optimal a été utilisé pour améliorer la précision des résultats. Cette analyse a permis d'identifier les zones critiques de la structure, d'envisager des simplifications et de proposer plusieurs recommandations de conception.

7. Conclusion :

Le soudage par point demeure une technique essentielle dans l'industrie automobile, en raison de sa rapidité, de son efficacité et de sa capacité à produire des soudures de haute qualité pour des assemblages métalliques. Grâce à son automatisation et à ses coûts relativement faibles, il est idéal pour la production en série des véhicules modernes. Bien que limité à des matériaux de faible épaisseur et aux métaux conducteurs, le soudage par point continue de jouer un rôle crucial dans la fabrication des véhicules, en particulier avec l'émergence des véhicules électriques, où la fiabilité des connexions des batteries est primordiale [76]. Dans ce qui suit nous consacrons notre étude sur un montant B-Pillar, le montant B constitue un élément structurel crucial pour garantir la sécurité des occupants en cas d'impact latéral. Sa conception doit répondre à des exigences strictes en matière de résistance, de rigidité et de légèreté, afin d'assurer la conformité aux normes internationales tout en optimisant les performances globales du véhicule. L'optimisation par renforcement du montant B, sans augmentation significative de son poids, s'inscrit dans une démarche d'ingénierie avancée visant à améliorer la tenue aux chocs tout en maîtrisant les contraintes de consommation énergétique. Cette étude s'attache donc à analyser et à proposer un modèle de montant B optimisé, capable de satisfaire aux exigences de sécurité les plus rigoureuses, notamment à travers des simulations de choc latéral réalistes et précises.

Chapitre 03 :

Bases et connaissances théoriques des procédés de soudage par points par résistance et leurs mises en place dans Simufact-Welding

1. Introduction et bases :.....	28
2. Résistance électrique :.....	29
3. Cinématique du pistolet et bibliothèque d'électrodes	33
4. Séquences d'un processus RSW :.....	36
5. Description du modèle et configuration du modèle.....	37
6. Modes d'analyses :	38
7. Conclusion :	43

Chapitre 03 : Bases et connaissances théoriques des procédés de soudage par points par résistance et leurs mises en place dans Simufact Welding

1. Introduction et bases :

Les procédés de soudage par résistance sont principalement utilisés dans l'industrie automobile et celle des fournisseurs. La raison principale en est la large gamme d'applications pour le soudage par résistance. Les procédés de soudage par résistance influencent le matériau très localisé. Le suivi du processus et l'assurance qualité peuvent être effectués facilement au cours du processus. En outre, une automatisation élevée des processus est possible et l'effort de main-d'œuvre et d'éducation est faible.

de la simulation de processus dans Simufact Forming est la déformation locale sophistiquée, la fusion et la géométrie de la pépite résultante. La simulation de structure dans Simufact-Welding est destinée à prédire l'influence de l'apport de chaleur et des conditions aux limites (fixations, roulements, brides, joints locaux) de plusieurs points de soudure sur la structure, principalement la déformation résultante de l'assemblage.

On peut différencier entre de nombreux types de procédés de soudage par résistance. Ils sont tous basés sur la génération de chaleur joule. La figure ci-dessous montre les processus de soudage par résistance suivants de gauche à droite :

- Soudage par projection
- Soudage de couture
- Soudure électrique à décharge de capacité

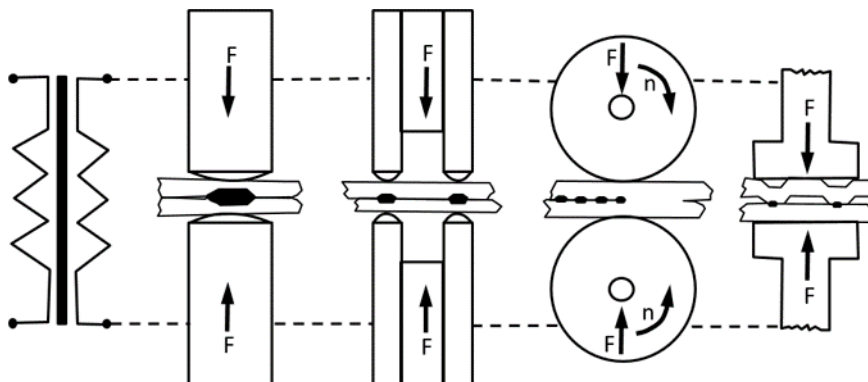


Figure 3.1- Aperçu des procédés de soudage par résistance [98]

Le soudage par résistance est un processus d'assemblage dans lequel deux composants conducteurs électriques sont fondus dans la zone d'assemblage à l'aide d'un chauffage joule. Le joint fermement collé est généré en raison de la solidification des deux matériaux. Ce processus est soutenu par des forces externes et des processus de diffusion. Les procédés de soudage par résistance peuvent être considérés comme un circuit en série de résistances électriques. La plus grande résistance est essentielle pour la conversion de l'énergie électrique en énergie thermique. La figure suivante montre un exemple de circuit série avec différentes résistances :

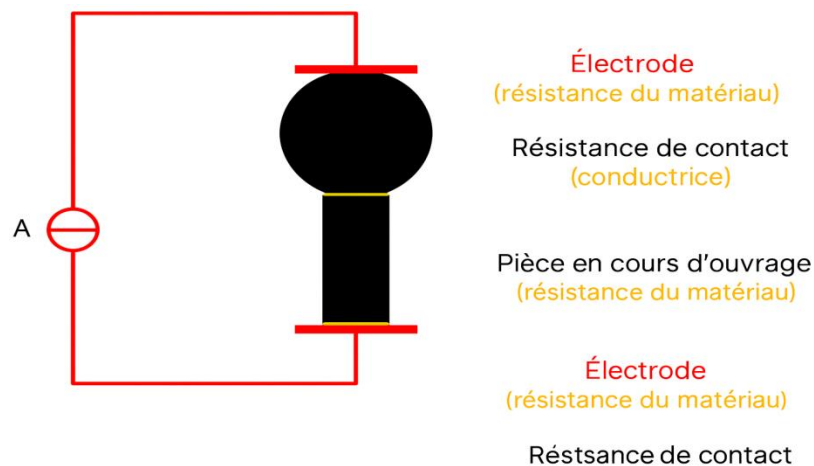


Figure 3.2- Exemple de modèle pour un procédé de soudage par résistance

L'effet chauffant du joule convertit l'énergie électrique (énergie cinétique des électrons) en énergie thermique (énergie cinétique des atomes conducteurs). Pour un courant électrique stationnaire, le flux de chaleur est calculé comme indiqué ci-dessous :

$$\dot{Q} = U \cdot I = R \cdot I^2 \quad (3.1)$$

L'Équation 3.1 présente le flux de chaleur pour un courant électrique stationnaire.

Où \dot{Q} [W] est le flux de chaleur, U [V] est la tension, I [A] est le courant et R [Ω] est la résistance électrique.

2. Résistance électrique :

Comme décrit ci-dessus, les procédés de soudage par résistance sont un circuit en série avec différentes résistances. Il faut différencier entre la résistance électrique du matériau et la résistance de contact électrique.

- Résistance des matériaux :

- Décrit la capacité d'un matériau à interférer sur les courants électriques
- Est une valeur spécifique d'un composant spécifique, qui dépend de la géométrie et du matériau du composant
- Description indépendante utilisant la résistivité électrique du matériau avec l'unité Ωm
- Résistance de contact électrique
- Décrit la capacité d'un contact à interférer sur les courants électriques
- Est une valeur spécifique d'un contact spécifique, qui dépend de la pression de contact, de la surface de contact, de la rugosité de surface, du revêtement, des matériaux des partenaires de contact, etc.
- Description indépendante utilisant la résistivité de contact électrique avec l'unité Ωm
- La résistance de contact électrique est calculée par :

$$R = \frac{\rho * l}{A} \quad (3.2)$$

Où R [Ω] est la résistance de contact électrique, ρ [Ωm] est la résistivité de contact électrique, l [m] est l'épaisseur du film de la zone de contact et A [m^2] est la zone de contact.

Simufact-Welding utilise le produit de la conductivité de contact électrique par l'épaisseur du film de la zone de contact avec l'unité $\frac{1}{\Omega}$. La conductance électrique est l'inverse de la résistance électrique.

Dans Simufact Welding, la conductivité du contact électrique peut être saisie en tant que valeur constante, un tableau en fonction de la température ou elle peut être calculée automatiquement.

Pour le calcul automatique, l'équation selon Bay et Wanheim [99] est utilisée :

$$\rho = 3 \left(\frac{\sigma_{\text{soft}}}{\sigma_n} \right) \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{2} + \rho_c \right) \quad (3.3)$$

L'Équation 3.3 présente le calcul de la résistivité du contact électrique selon [99], les paramètres d'entrée suivants :

- σ_{soft} : Contrainte d'écoulement du matériau plus mou (dépendante de la température)
- σ_n : Contrainte normale
- ρ_1, ρ_2 : Résistivité des pièces de contact (en fonction de la température et de la phase)
- ρ_c : Résistivité des revêtements

Dans la plupart des cas, la résistance de contact électrique est 30 fois plus grande que la résistance du matériau électrique. La résistance électrique du matériau et la résistance de

contact électrique dépend fortement de la température. La résistance de contact électrique dépend également de la pression de contact. Pendant le processus de soudage, la résistance de contact électrique diminue rapidement en raison de la compression des tôles, tandis que la résistance du matériau électrique augmente en raison de l'augmentation de la température. Après le soudage, pendant le refroidissement, la résistance du matériau diminue. La figure ci-dessous montre la résistance de contact électrique, la résistance électrique du matériau et la résistance complète du système pendant un processus de soudage, y compris le refroidissement ultérieur :

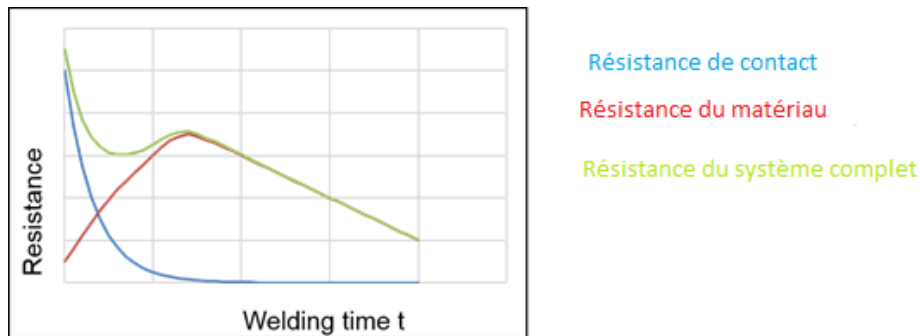


Figure 3.3- Résistances électriques dans un procédé de soudage par résistance (soudage et refroidissement)

Dans Simufact Material, la résistance électrique du matériau peut être saisie en fonction de la température et de la phase du matériau. De plus, Simufact Material offre la possibilité de définir la conductivité électrique du matériau. En raison du fait que la résistivité électrique est l'inverse de la conductivité électrique, une conversion automatique de l'un à l'autre est effectuée. Les paramètres des matériaux électriques sont fournis pour tous les matériaux de la bibliothèque de matériaux qui ont le suffixe *_sw. La figure ci-dessous montre la résistivité électrique du matériau d'un acier typique :

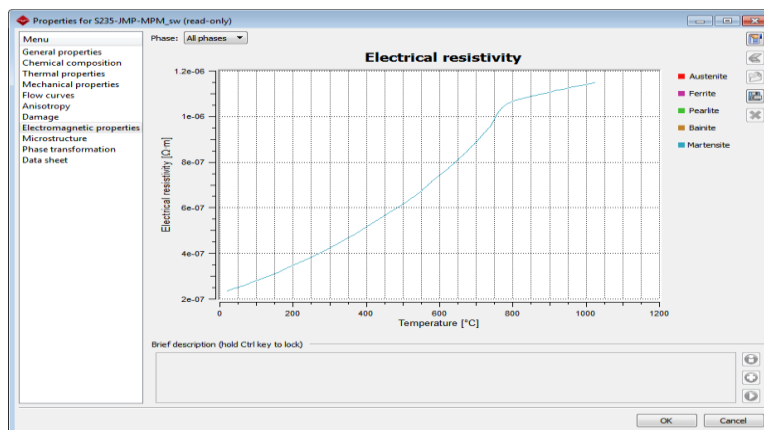


Figure 3.4- Définition de la résistivité électrique du matériau dans Simufact-Material

La définition de la conductivité du contact électrique peut être faite dans le tableau des contacts qui est montré dans l'image ci-dessous.

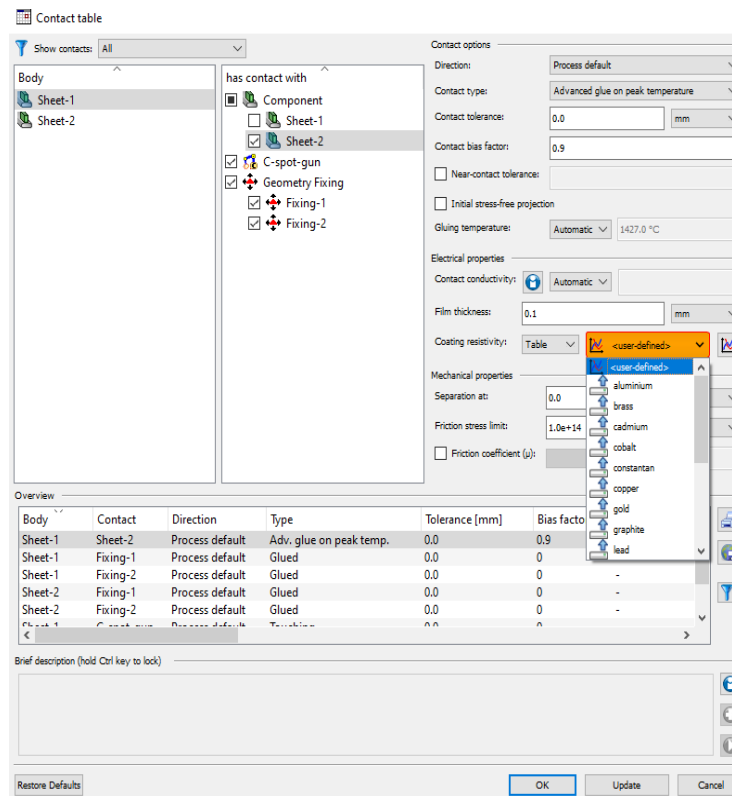


Figure 3.5- Définition de la conductivité du contact électrique

La conductivité du contact électrique entre l'électrode et le composant doit être prise en compte. Comme le calcul automatique nécessite l'entrée d'une résistivité du matériau même pour les électrodes rigides, Simufact-Welding attribue automatiquement un matériau en cuivre avec une résistivité du matériau dépendante de la température aux électrodes. Le matériau affecté aux électrodes peut être modifié par l'utilisateur.

Simufact-Welding utilise par défaut ladite « Colle au contact de la température de crête » pour le contact entre les composants. Ce type de contact activera un contact de colle à base nodale lorsque la température de la colle sera atteinte. La température de la colle est la température de fusion plus basse des matériaux des composants. En outre, la conductivité des contacts thermiques et électriques est réglée à un niveau très élevé (entrée utilisateur multipliée par 1E+6) pour simuler les pièces « soudées ».

3. Cinématique du pistolet et bibliothèque d'électrodes

Simufact-Welding propose deux types différents de cinématique de pistolet ponctuel, le pistolet C et le pistolet X. Le canon C utilise un mouvement linéaire, le canon X utilise un mouvement de rotation pour fermer et ouvrir le canon. Il est possible d'utiliser plusieurs pistolets ponctuels en un seul processus. De plus, les deux types de pistolets peuvent être utilisés en un seul processus. Bien que plusieurs pistolets ponctuels ne puissent agir que de manière séquentielle, ils ne peuvent pas agir simultanément (sauf dans une simulation de cycle thermique et dans la simulation mécanique à l'aide d'une électrode). La figure suivante montre un aperçu de la cinématique des deux pistolets.

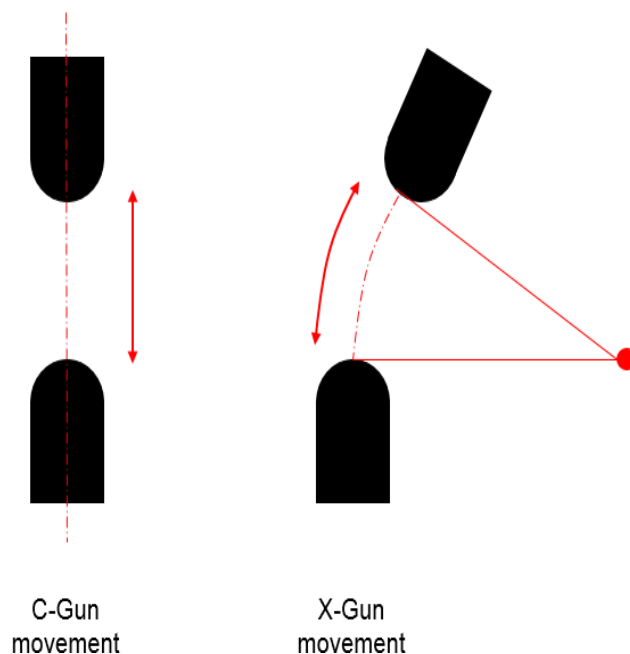


Figure 3.6- Cinématique du pistolet à spot dans Simufact-Welding.

Pour chaque pistolet spot, deux électrodes doivent être définies. Simufact-Welding expédie une grande bibliothèque d'électrodes conformément à la norme ISO 5821. Dans Simufact-Welding, les points ne peuvent pas être utilisés dans les noms, de sorte que les noms d'électrodes comme « F0-13-18-6.5 » sont remplacés par « F0-13-18-6c5 » dans la bibliothèque d'électrodes. La bibliothèque d'électrodes prend en charge huit types d'électrodes différents et pour chaque type d'électrode, plusieurs électrodes de dimensions différentes sont fournies. Les électrodes utilisées seront importées dans les géométries du catalogue et seront automatiquement affectées au pistolet de soudage par points. En outre, les électrodes de la bibliothèque d'électrodes seront automatiquement retournées pour avoir la bonne orientation lors de la fermeture de la boîte de dialogue du pistolet.

La bibliothèque d'électrodes peut également être étendue à l'aide d'électrodes définies par l'utilisateur. Les électrodes définies par l'utilisateur seront stockées dans un dossier différent et ne seront pas retournées lors de leur affectation à un pistolet ponctuel. Pour plus d'informations, veuillez consulter la fiche d'information qui est liée dans la boîte de dialogue du pistolet. Les figures ci-dessous montrent les différents types d'électrodes selon la norme ISO 5821.

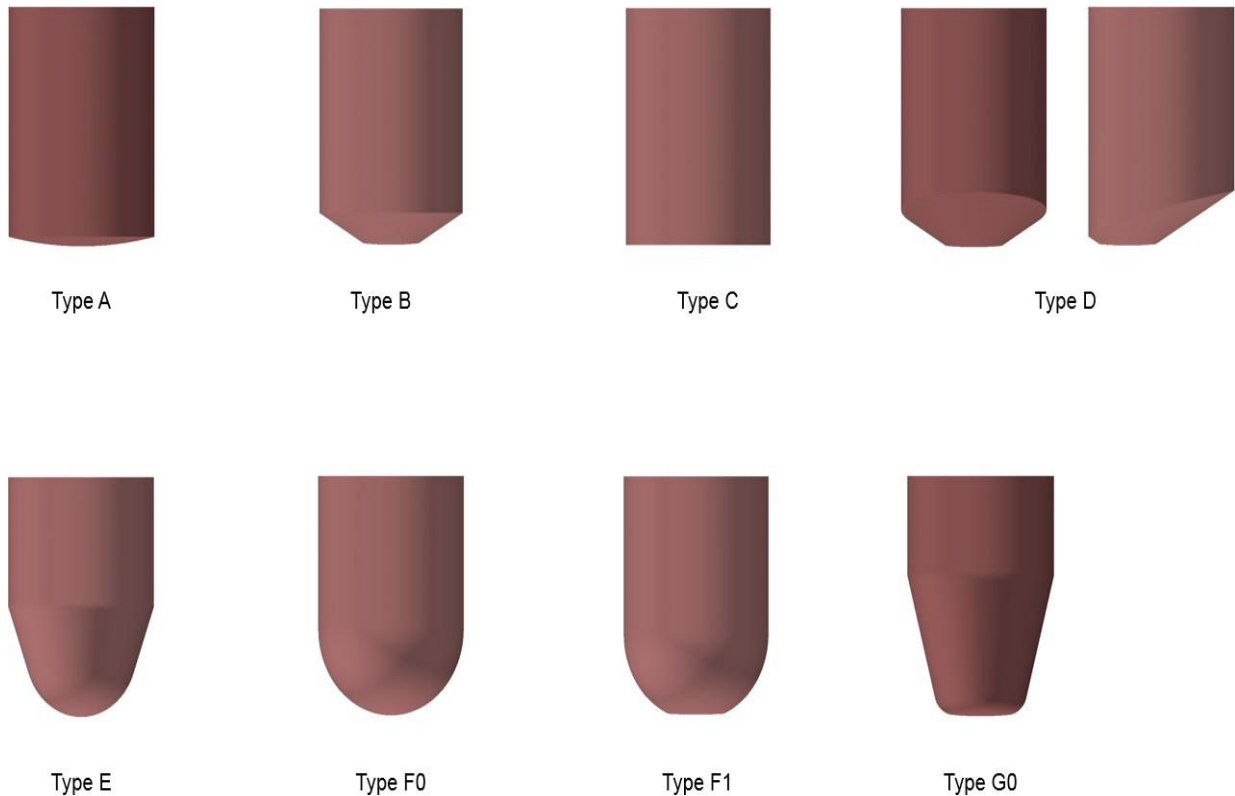


Figure 3.7- Types d'électrodes selon ISO 5821

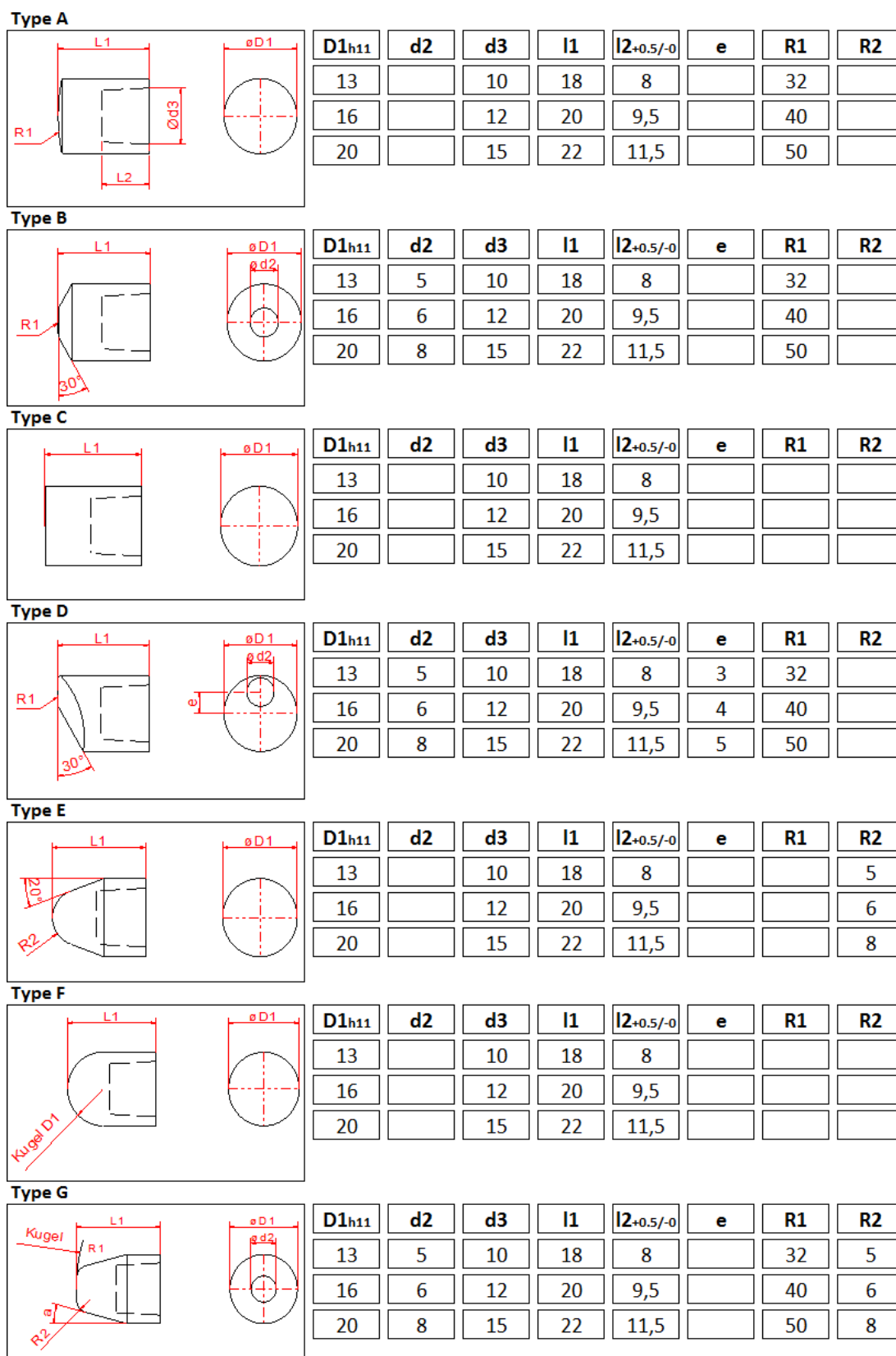
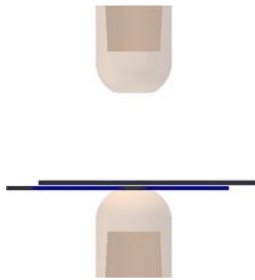


Figure 3.8- Dimensions des électrodes selon ISO 5821

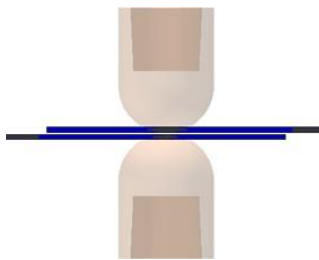
4. Séquences d'un processus RSW :

Un processus de soudage par points par résistance dans Simufact-Welding est divisé en une séquence de six phases calculées automatiquement. Les six phases sont calculées dans chaque point de soudage prédéfini. Ces phases sont les suivantes :

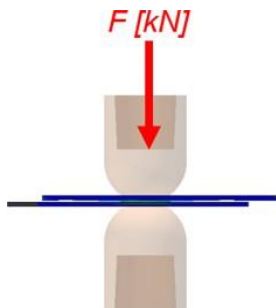
1. Approche de l'électrode inférieure vers le partenaire de jointure/point de référence.



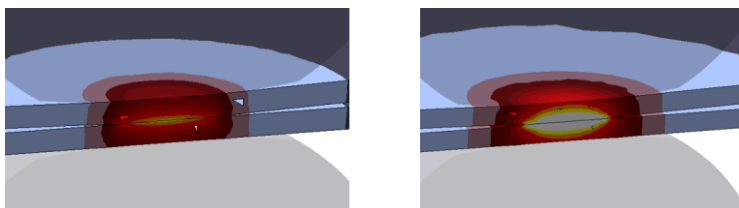
2. Approche de l'électrode supérieure vers le partenaire de jointure (fermeture du pistolet spot).



3. Activation de la force d'électrode de l'électrode supérieure. L'électrode inférieure est fixe ou a plutôt une rigidité définie.



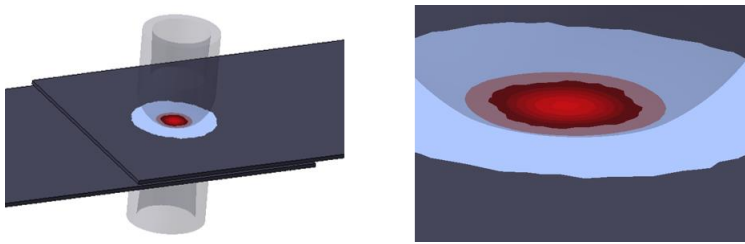
4. Activation du courant de soudage avec une force de serrage constante des électrodes.



L'électrode inférieure est toujours fixe et peut avoir une rigidité.

5. Désactivation du courant de soudage avec une force de serrage constante des électrodes.

L'électrode inférieure est toujours fixe et peut avoir une rigidité.



6. Retrait du barillet du canon.

5. Description du modèle et configuration du modèle

Les processus de soudage par résistance sont simulés à l'aide d'un couplage électrique-thermique-métallurgique-mécanique. Dans un premier temps, le passage électrique calcule le flux de chaleur en fonction du courant électrique défini et des résistances électriques. Le flux de chaleur calculé est ensuite appliqué en tant que condition limite au passage thermique qui calcule ensuite la distribution de température. En fonction des températures locales et des changements de température, la passe métallurgique calcule les fractions de phase. Le passage mécanique calcule les contraintes et les déplacements en fonction de la phase en fonction des propriétés mécaniques telles que les contraintes thermiques et les contraintes d'écoulement. Tous les résultats sont ensuite utilisés comme conditions initiales pour l'étape suivante. Le couplage est décrit dans l'image ci-dessous :

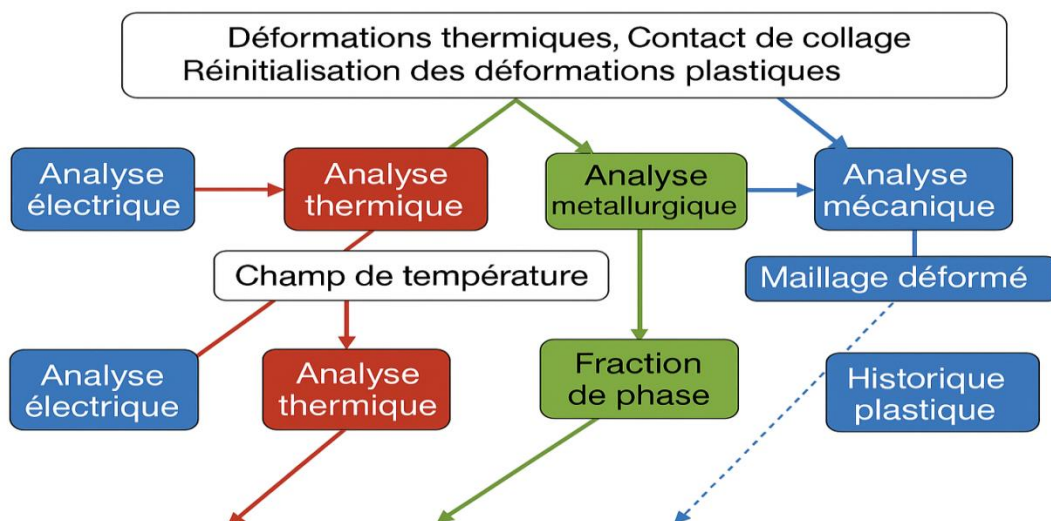


Figure 3.9- Couplage d'analyse en soudage Simufact

Le calcul de la fraction de phase (passage métallurgique) est facultatif et peut être activé/désactivé dans Simufact-Welding dans les paramètres du solveur.

Simufact-Welding offre également la possibilité d'utiliser des approches simplifiées pour le soudage par points par résistance, par exemple en ignorant le couplage électrique en introduisant une source de chaleur équivalente combinée à une contrainte de température nodale (cycle thermique). Pour plus d'informations, veuillez-vous référer au sous-chapitre « Approches simplifiées pour RSW ».

Dans la mise en place du modèle, deux types de corps sont utilisés : les corps déformables (composants) qui sont des conducteurs électriques par défaut et les corps rigides qui sont non conducteurs électriques (fixations, pinces, etc.). Les corps rigides peuvent avoir un potentiel électrique de 0 V ou un courant électrique défini (électrode). Pour une définition complète d'un processus de soudage par résistance, un circuit électrique fermé doit être construit. Le circuit électrique est fermé si un corps rigide avec un courant électrique défini et un corps rigide avec un potentiel électrique défini de 0 V ont un contact électrique avec le circuit électrique restant. Le corps rigide avec le potentiel électrique de 0 V agit comme une masse et l'autre corps rigide agit comme une électrode. La figure ci-dessous montre un exemple de modèle avec le courant électrique de 2 kA défini sur l'électrode supérieure et le potentiel de 0 V défini sur l'électrode inférieure :

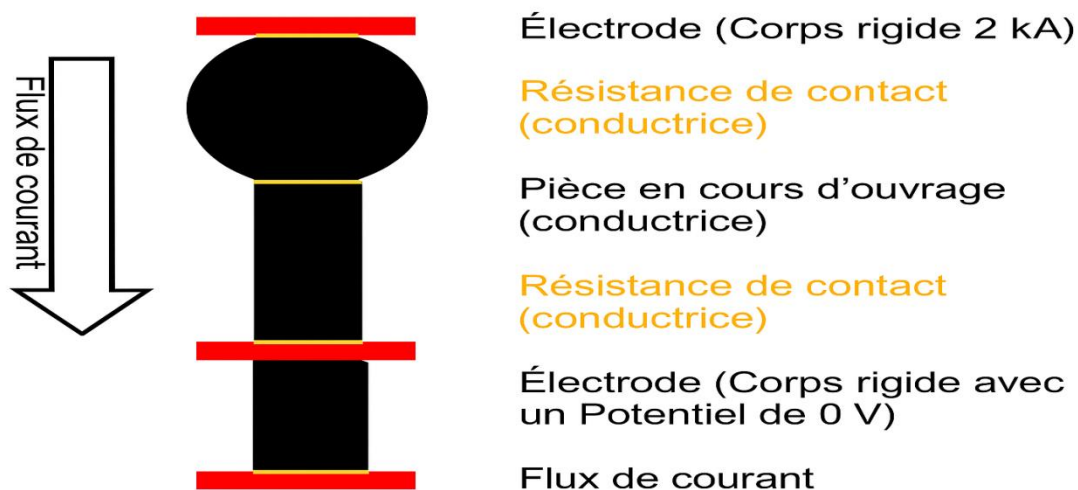


Figure 3.10- Exemple de modèle avec circuit électrique fermé

6. Modes d'analyses :

Sous Paramètres de processus, nous pouvons également sélectionner « Mode d'analyse ». Ici, nous avons le choix entre le mode **Normal**, le mode **Précision** et le mode **Rapide**.

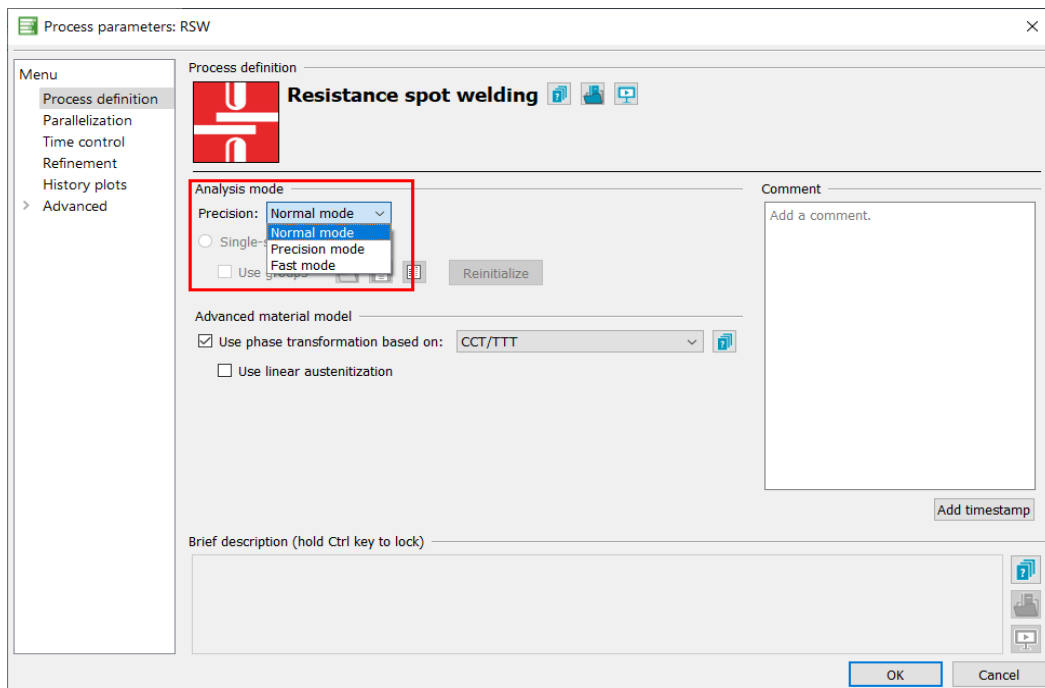


Figure 3.11- Modes d'analyses

6.1 Mode normal vs mode précision :

Le mode normal utilise les paramètres habituels du solveur pour une analyse relativement rapide avec une bonne qualité de résultat. Le mode de précaution est particulièrement nécessaire lorsque les contraintes dans la zone affectée par la chaleur sont importantes. Lorsqu'elle est activée, elle peut améliorer considérablement la qualité des résultats, mais le temps de calcul peut augmenter considérablement. Le mode Normal a des propriétés de convergence numériquement moins strictes et est donc plus rapide. Avec le mode Précision, vous avez numériquement des propriétés de convergence plus strictes et vous obtiendrez donc des résultats plus précis, en particulier dans la zone affectée par la chaleur, mais cela entraînera des temps de calcul plus élevés. Il active plusieurs paramètres non par défaut qui peuvent être contrôlés et modifiés manuellement dans les paramètres du processus sous « Avancé ».

6.2 Mode rapide

Si vous sélectionnez le mode rapide, la solution single-shot est sélectionnée automatiquement. Avec cette méthode, toutes les soudures par points sont soudées simultanément. Veuillez consulter la section 9.9.4 pour plus d'informations.

6.3 Aperçu des applications de simulation disponibles

Il existe cinq approches de simulation disponibles, qui peuvent être utilisées pour la simulation de soudage par points par résistance. Le tableau de suivi présente un aperçu des approches de simulation disponibles et des paramètres requis :

	Thermomechanical with Joule heating	Thermomechanical with thermal cycle	Mechanical solution	Simple mechanical solution
Process settings	Thermomechanical solution	Thermomechanical solution	Mechanical solution – Electrodes	Mechanical solution – Simplified spot
Spot weld parameters	Force and current	Force and thermal cycle	Force and current or Force and thermal cycle	Simplified connection
+ Process parameters: Fast mode → (Grouped) Single-shot solution				

Figure 3.12- Aperçu des approches de simulation disponibles et de leurs paramètres requis.

Dans la boîte de dialogue des paramètres du processus, on peut choisir entre la solution thermomécanique et les deux solutions mécaniques, si le type de processus « Soudage par points par résistance » est sélectionné :

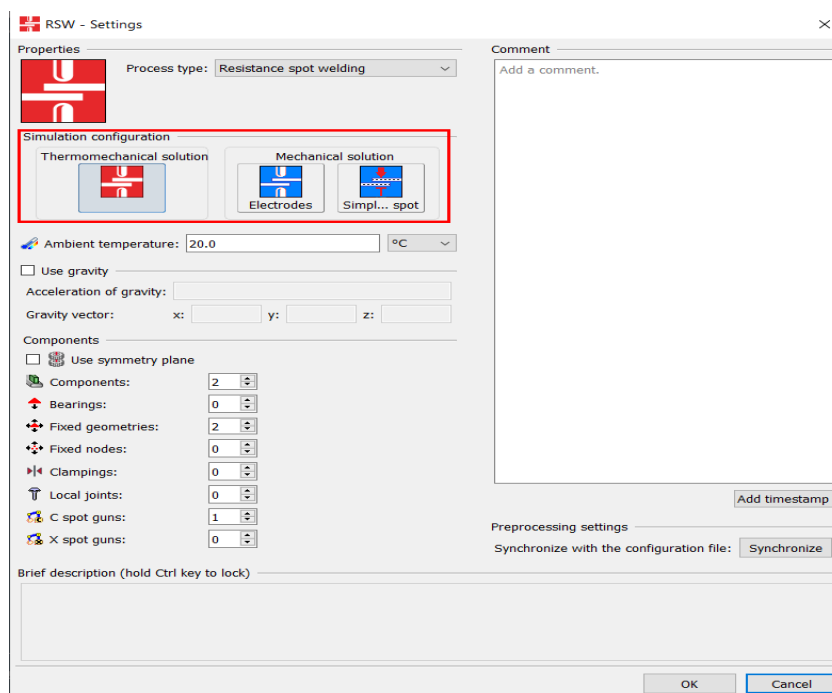


Figure 3.13- Types de solution dans les paramètres de processus

Dans la boîte de dialogue des paramètres de soudure par points, le mode de spécification peut être sélectionné :

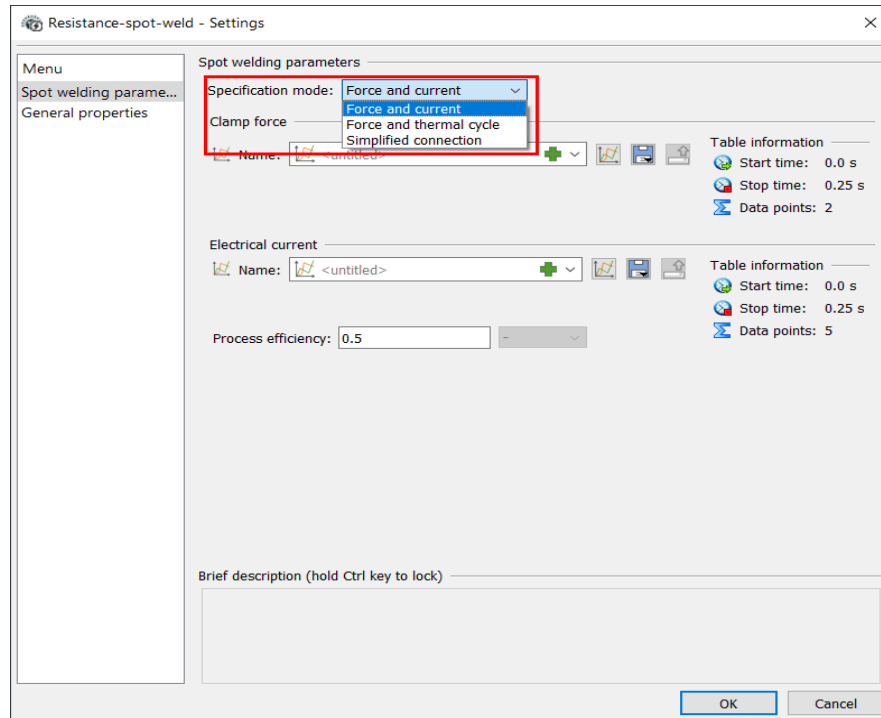


Figure 3.14- Modes de spécification dans les paramètres de soudure par points.

Dans la boîte de dialogue des paramètres du processus, le mode d'analyse peut être sélectionné et ainsi, le mode rapide pour la solution à un coup peut être activé :

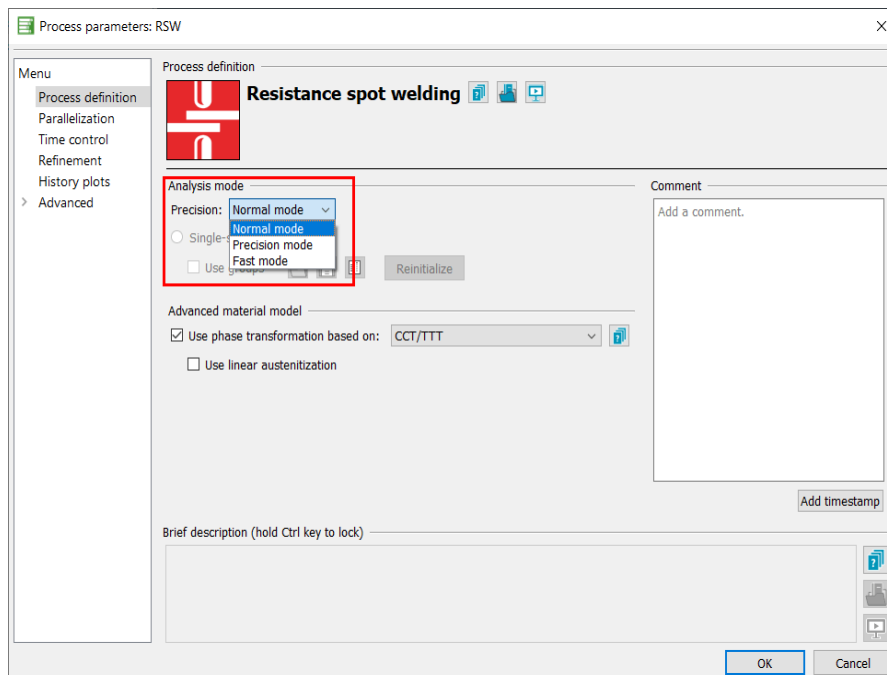


Figure 3.15- Analyse des paramètres du procédé.

Dans le tableau suivant, les avantages et les inconvénients des cinq approches de simulation sont contrastés :

Tableau 3.1- Avantages et inconvénients des approches de simulation disponibles

Approche de simulation	Avantages	Inconvénients
Thermomécanique avec chauffage par effet Joule	<ul style="list-style-type: none"> - Résultats précis - Données réelles du processus comme le courant et la force peuvent être simulées - La transformation de phase peut être simulée 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus coûteux pour le solveur - Plus complexe en termes de convergence - Toutes les propriétés de contact doivent être calibrées
Thermomécanique avec cycle thermique	<ul style="list-style-type: none"> - Simulation de soudage simultanée avec des robots possible - Simulation plus rapide (pas de chauffage par effet Joule) - Résultats comparables à l'approche avec chauffage par effet Joule 	<ul style="list-style-type: none"> - Les cycles thermiques sont souvent sur définis - Peu adapté à la transformation de phase, surtout avec des courbes thermiques complètes
Solution mécanique	<ul style="list-style-type: none"> - Tableau des forces d'électrodes possible - Simulation plus rapide (pas de calcul thermique) - Adapté pour un grand nombre de points de soudure. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de simulation de transformation de phase - Comportement souvent plus rigide - Moins précis que les approches thermomécaniques près du point.
Solution mécanique simple	<ul style="list-style-type: none"> - Simulation très rapide. - Calcul d'un point de soudure en une seule étape. - Adapté aux études d'optimisation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Comportement souvent rigide. - Moins précis près du point. - Moins adapté si la structure entière est déformée par les premiers points soudés.
Solution Single-Shot	<ul style="list-style-type: none"> - Très rapide pour de nombreux points. - Résultats locaux comparables à une simulation transitoire. - Possibilité de grouper les points. 	<ul style="list-style-type: none"> - Néglige la séquence de soudure. - L'assemblage peut se comporter différemment. - Néglige l'effet de shunt.

Le tableau suivant présente une comparaison du temps de calcul et de la précision entre les approches de simulation :

Tableau 3.2- Comparaison du temps de calcul et de la précision

Simulation approach	Calculation time			Precision		
	Fast	Middle	Slow	Good	Medium	Weak
Thermomechanical with Joule heating			X	X		
Thermomechanical with thermal cycle		X			X	
Mechanical solution		X				X
Simple mechanical solution	X					X
Single-Shot solution	X				X	

7. Conclusion :

Ce chapitre regroupe les bases et les connaissances théoriques des procédés de soudage par points par résistance et leurs mises en place dans Simufact-Welding. L'utilisation de logiciels de simulation tels que Simufact Welding permet de dépasser les approches purement empiriques. En reproduisant avec précision les phénomènes thermiques et mécaniques du soudage par points par résistance, ces outils offrent la possibilité d'optimiser les paramètres du procédé, de prévoir l'apparition de défauts potentiels et de réduire significativement le nombre d'essais physiques nécessaires.

Chapitre 04 :

Modélisation du procédé de soudage par point

1. Introduction	45
2. Méthodologie Générale pour la Simulation de Soudage.....	46
3. Couplage Physique et Équations Gouvernantes	47
4. Propriétés chimiques, thermo-physiques et thermomécaniques	51
5. Analyse des résultats de simulation	54
6. Conclusion.....	68

Chapitre 04 : Modélisation du procédé de soudage par point

1. Introduction

Depuis les années 1960, des efforts continus ont été consacrés à la modélisation du soudage par résistance par points (RSW), en raison de ses avantages dans l'industrie automobile : robustesse, rapidité, flexibilité et coût relativement faible, tout en assurant une qualité de soudure acceptable. Les simulations numériques du RSW sont abondamment documentées dans la littérature, notamment pour étudier la formation du noyau de soudure, l'historique thermique et la prédiction des contraintes résiduelles. Ces recherches visent à évaluer non seulement la qualité d'un point de soudure isolé, mais aussi à simuler l'effet de plusieurs points dans la structure globale d'un véhicule lors de tests dynamiques virtuels.

Pour intégrer ces effets dans des modèles globaux, les résultats locaux (en 2D) comme les déformations et contraintes résiduelles doivent être transposés dans des éléments 3D ou de coque. Cette transposition implique souvent une simplification du modèle pour réduire le nombre d'éléments, mais cette approche reste peu utilisée à grande échelle.

Toutefois, cette méthode a déjà été appliquée pour modéliser le comportement d'éprouvettes normalisées, dans le but d'améliorer la qualité et la performance du procédé de fabrication. La simulation d'un seul point reste néanmoins cruciale pour comprendre la physique interne du processus, surtout avec l'introduction de nouveaux matériaux (acier à haute résistance, aluminium, etc.).

Les chapitres précédents présentent le procédé de soudage et l'étude expérimentale de la formation du noyau ainsi que l'influence des paramètres de soudage. Ces données sont utilisées ici comme entrées pour les simulations.

Plusieurs techniques de simulation sont disponibles, allant des plus simples aux plus avancées :

- a)** Modèle de conduction thermique (différences finies)
- b)** Modèle électrothermique (éléments finis)
- c)** Modèles électrothermique et thermomécanique découplés (éléments finis)
- d)** Modèles électrothermique et thermomécanique couplés (éléments finis)

Le découplage consiste à utiliser l'historique thermique (calculé d'abord) comme entrée pour les calculs mécaniques. Cela réduit le coût de calcul mais ne prend pas en compte les modifications géométriques dues aux déformations. Le couplage, plus complexe, permet de modéliser des effets comme les variations de taille de contact et l'utilisation d'électrodes courbes. Les transformations métallurgiques peuvent aussi être intégrées à la simulation via des diagrammes

de transformation à refroidissement continu (CCT), en utilisant l'historique thermique comme base.

Ce chapitre décrira en détail les formulations mathématiques, les conditions aux limites, ainsi que les propriétés thermiques et mécaniques des tôles. Enfin, les résultats de simulation et les conclusions issues de conférences internationales seront présentés en dernière section.

2. Méthodologie Générale pour la Simulation de Soudage

Ferrasse et al. [101] ont proposé une méthode générale pour la simulation des procédés de soudage, notamment pour étudier les caractéristiques thermiques du soudage par zone. La Figure 4.1 illustre les différentes étapes nécessaires à la construction d'un modèle :

- a) **Connaissances de base** : Il faut d'abord une compréhension approfondie du procédé, notamment des paramètres pratiques et des hypothèses de départ.
- b) **Construction du modèle** : Elle doit prendre en compte la structure (complète ou partielle) ainsi que les conditions aux limites. Si possible, l'utilisation d'un maillage structuré plan ou axisymétrique est recommandée, car cela permet de réduire le temps et le coût de calcul.
- c) **Optimisation du maillage** : Il est important d'optimiser le nombre et le type d'éléments, surtout pour un modèle appelé à être utilisé fréquemment. Cela demande une solide expérience utilisateur, notamment sur la manière d'imposer les charges thermiques/mécaniques et les conditions aux limites dans des structures axisymétriques.
- d) **Choix du logiciel de simulation** : Une fois le modèle établi, il faut choisir un code de calcul adapté, en fonction des modules d'analyse disponibles et de la facilité d'utilisation de l'interface.

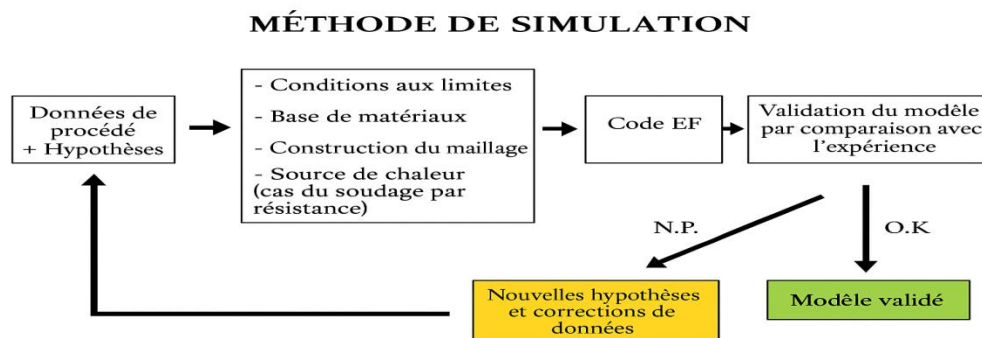


Figure 4.1- Méthodologie généralisée pour la modélisation mathématique du soudage par résistance [101].

Dans cette étude, le code **Simufact-Welding** est choisi pour la simulation en raison de ses fonctionnalités adaptées à la modélisation du soudage.

Avant d'exploiter un modèle, il est essentiel de valider les résultats afin d'assurer la fiabilité de l'application.

Dans le cas du soudage par résistance par points (RSW), la validation ne se limite pas à la taille ou à la géométrie du point de soudure. D'autres aspects quantitatifs peuvent être pris en compte, comme :

- ⇒ L'historique thermique,
- ⇒ Le signal de déplacement des électrodes,
- ⇒ Ou encore la chute de tension entre les électrodes [102].

Ce processus de validation permet de vérifier les hypothèses de départ et d'ajuster les paramètres d'entrée si nécessaire.

L'étape finale consiste alors à corriger ou valider le modèle et/ou les hypothèses (voir Figure 4.1).

3. Couplage Physique et Équations Gouvernantes

Les phénomènes physiques impliqués dans le soudage sont complexes. Ils comprennent :

- ⇒ L'écoulement du métal en fusion dans le bain de soudure,
- ⇒ Le transfert thermique,
- ⇒ Les transformations de phase dues à l'historique thermique,
- ⇒ Ainsi que les contraintes et déformations dans la zone soudée.

Dans le cas du RSW, la physique générale (illustrée dans la Figure 4.2) met en évidence les relations entre plusieurs domaines : transfert thermique, mécanique, métallurgie et électromagnétisme.

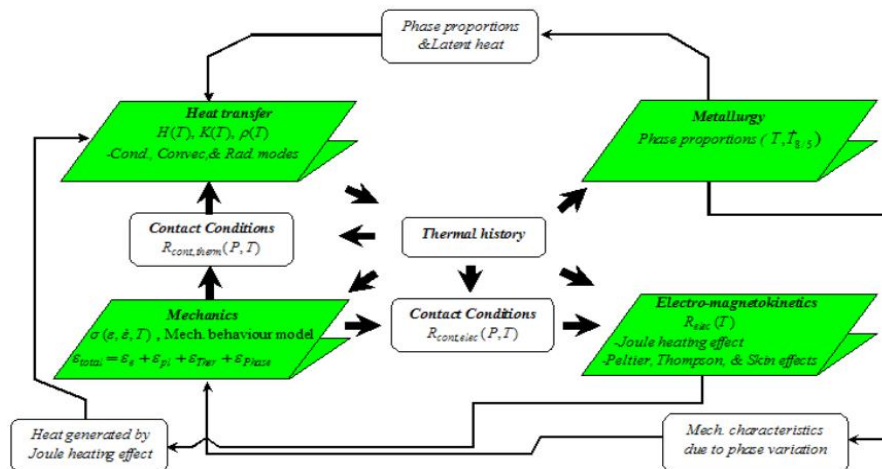


Figure 4.2- Relations entre les différents aspects liés à la simulation du procédé de soudage par résistance par points (RSW) – [103].

L'historique thermique joue un rôle central dans la simulation, en servant de lien entre les autres phénomènes et en tenant compte des propriétés des matériaux dépendantes de la température. Selon la documentation [104, 105], la température influence aussi bien le contact thermique que le contact électrique.

Plusieurs niveaux de couplage entre les analyses électrothermiques et thermomécaniques peuvent être mis en œuvre, selon les échelles de temps utilisées :

a) Mise à jour de la géométrie à chaque macro-pas de temps (Figure 4.3a)

- Les analyses électrothermique et thermomécanique partagent les mêmes macro-pas de temps, mais peuvent avoir des micro-pas différents.
- Dans cette étude, un macro-pas correspond à 1/10 de cycle de soudage (soit 0,02 s).
- Cette méthode permet des calculs séquencés, notamment pour étudier l'effet de la durée de maintien des électrodes sur l'historique thermique.

b) Mise à jour de la géométrie à chaque micro-pas de temps (Figure 4.3b)

- Les pas de temps doivent être égaux aux échelles macro et micro dans les deux analyses.

c) Couplage complet à chaque micro-pas de temps (Figure 4.3c)

- Les deux analyses doivent converger simultanément à chaque micro-pas de temps, ce qui représente le niveau de couplage le plus poussé.

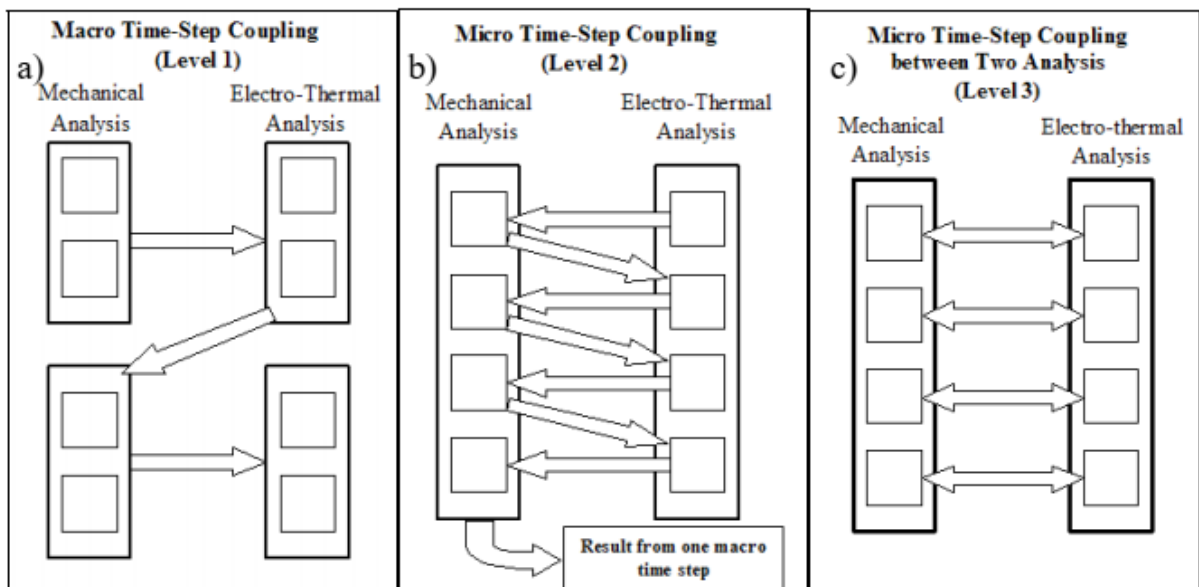


Figure 4.3- Illustration de la procédure de couplage utilisée dans la simulation du soudage par points [103].

3.1 Formulation des phénomènes électriques :

Le soudage par résistance par points (RSW) est modélisé comme un problème électrocinétique en régime stationnaire.

- La loi d'Ohm est utilisée pour décrire le flux de courant :

$$\vec{J} = -\sigma \cdot \vec{E}, \quad \text{où } \vec{E} = -\text{grad} V \quad (3.1)$$

où \vec{J} est la densité de courant, \vec{E} le champ électrique, σ la conductivité électrique, et V le potentiel électrique

- La conservation du flux de courant est exprimée par :

$$\text{div} \vec{J} = 0 \quad \text{ou} \quad \text{div}(\sigma \text{ grad} V) = 0 \quad (3.2)$$

3.2 Formulation électrothermique couplée

- Le problème est non linéaire et instationnaire, avec un couplage fort entre les phénomènes électriques et thermiques.

- L'équation générale inclut la génération de chaleur interne (effet Joule) :

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} - \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} T) - \text{grad} V \cdot (\sigma \cdot \text{grad} V) - Q = 0 \quad (3.3)$$

Où ρ est la densité de masse, H l'enthalpie, λ la conductivité thermique, et Q la source de chaleur interne (négligée dans certains cas)

3.3 Formulation mécanique

- Le comportement élasto-plastique est non linéaire, influencé par la température et les contraintes/déformations thermiques.

- Les équations incluent :

- Conditions de compatibilité :

$$\varepsilon_r = \partial u_r / \partial r, \quad \varepsilon_\theta = \partial u_\theta / \partial \theta, \quad \varepsilon_z = \partial u_z / \partial z, \quad \gamma_{rz} = \partial u_r / \partial z + \partial u_z / \partial r \quad (3.4)$$

Où ε et γ sont les composantes de déformation, et u_r, u_θ, u_z les déplacements

- Relations constitutives :

$$\{\Delta\sigma\} = [D]\{\Delta\varepsilon\} + [C]\Delta T \quad (3.5)$$

où $\Delta\sigma$ et $\Delta\varepsilon$ sont les incréments de contrainte et de déformation, et $[D], [C]$ des matrices pour les états élastique et thermoélastique/plastique

- Équation d'équilibre (principe des travaux virtuels) :

$$\delta U = \int \int [(\sigma_r + \Delta\sigma_r)\delta\varepsilon_r + (\sigma_\theta + \Delta\sigma_\theta)\delta\varepsilon_\theta + (\sigma_z + \Delta\sigma_z)\delta\varepsilon_z + (\tau_{rz} + \Delta\tau_{rz})\delta\gamma_{rz}] 2\pi r dr dz \quad (3.6)$$

3.4 Modèle d'enthalpie

- Le modèle d'enthalpie est préféré au modèle de chaleur spécifique ($C\rho$) pour prendre en compte la chaleur latente des transformations de phase (par exemple, $\gamma \rightarrow \alpha$ ou fusion solide-liquide).

- Les transformations métallurgiques dépendent de l'historique thermique et influencent la distribution de température via la chaleur latente.

3.5 modèle géométrique

Comme l'indique la Figure 4.4, nous avons utilisé deux composants dans notre simulation.

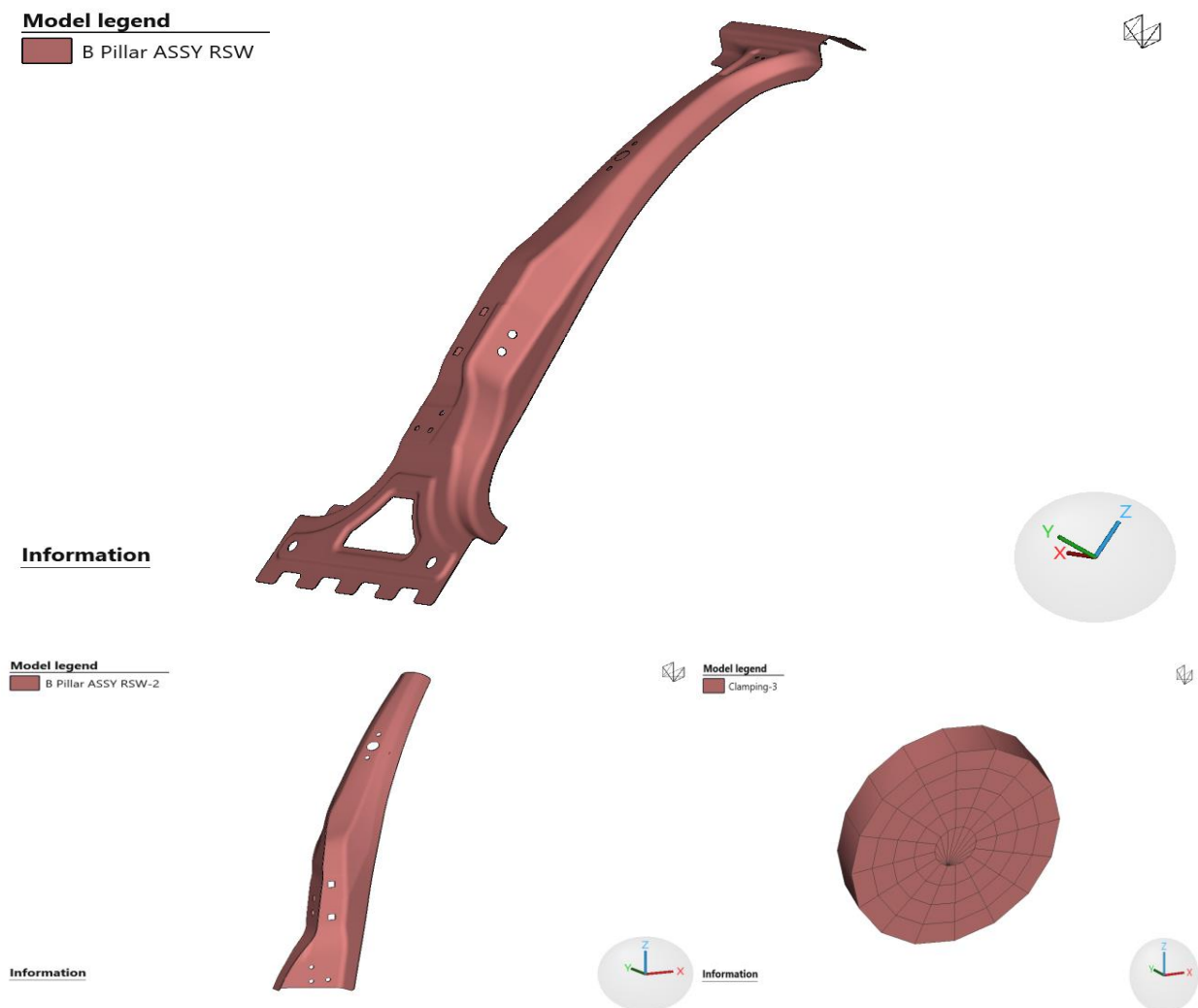


Figure 4.4- Représentations graphiques des paramètres géométriques.

Dans la Figure 4.5, les conditions aux limites pour les simulations de soudage comprennent naturellement des facteurs thermiques et mécaniques. La convection libre et le rayonnement du matériau font généralement partie de la composante thermique de la solution. Les

conditions aux limites mécaniques sont nécessaires pour une prévision précise des déformations et des contraintes.

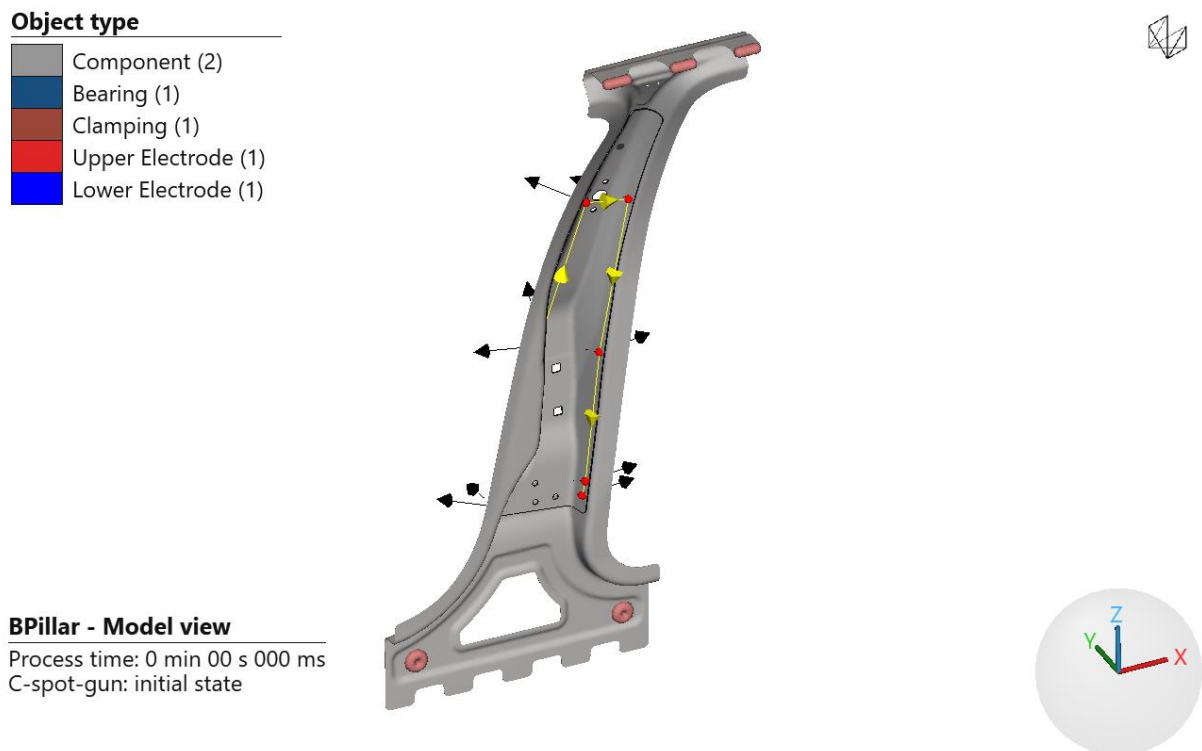


Figure 4.5- Représentation schématique des conditions aux limites structurales.

4. Propriétés chimiques, thermo-physiques et thermomécaniques

4.1 Composition chimique

Les fractions initiales de phase : 93% ferrite, 7% perlite.

Les effets résultants de la transformation de phase sont négligeables.

Les propriétés de l'alliage sont obtenues par l'application **JMatPro**.

La composition chimique est WT% : C=0.15, Cu=0.4, Fe=98.293, Mn=1.1, N=0.01, P=0.02, S=0.027

La taille de grain selon $_ASTM = 7.511734060316082$

La température d'austénitisation en °C = 1300.0

La vitesse de refroidissement (C/s) = 171.0106294169949

4.2 Propriétés électromagnétiques

a) Résistivité électrique (ρ)

Capacité d'un matériau à s'opposer au passage du courant. Dépend de la température.

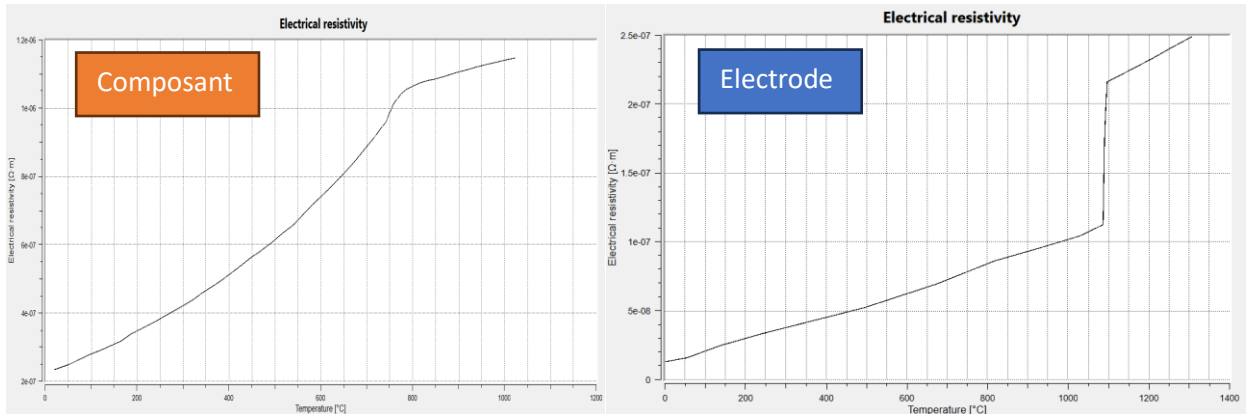


Figure 4.6- Représente la résistivité électrique des composants et de l'électrode

b) Conductivité électrique (σ)

Aptitude à conduire le courant électrique. Peut être définie comme fonction de la température.

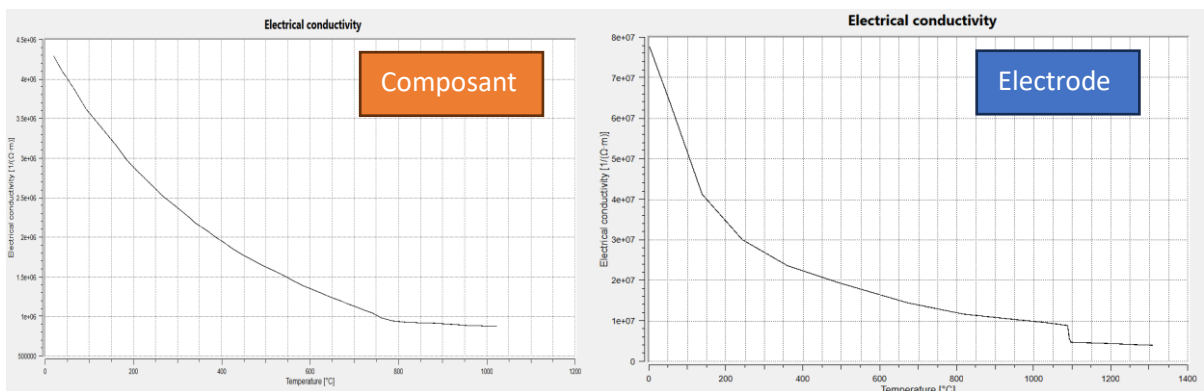


Figure 4.7- Représente la conductivité électrique des composants et de l'électrode

4.3 Propriétés thermiques

a) Conductivité thermique

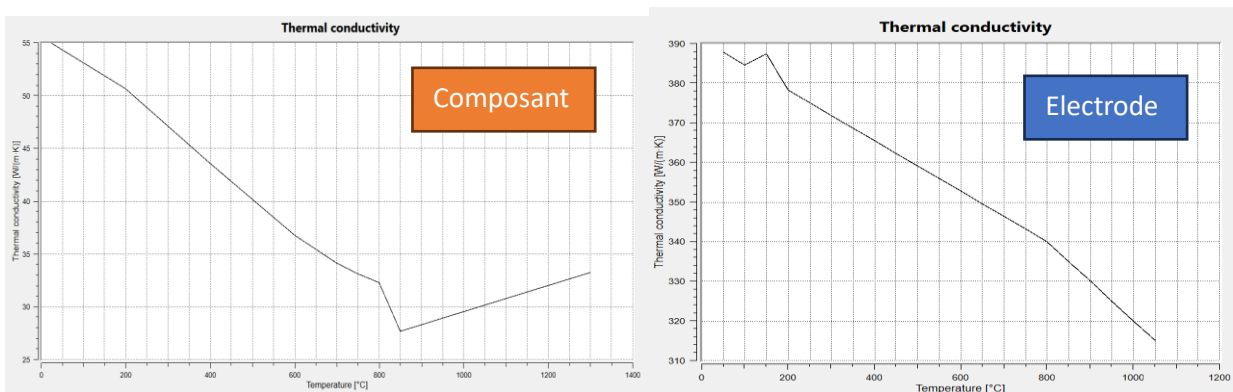


Figure 4.8- Représente la conductivité thermique des composants et de l'électrode

b) Capacité spécifique de la chaleur

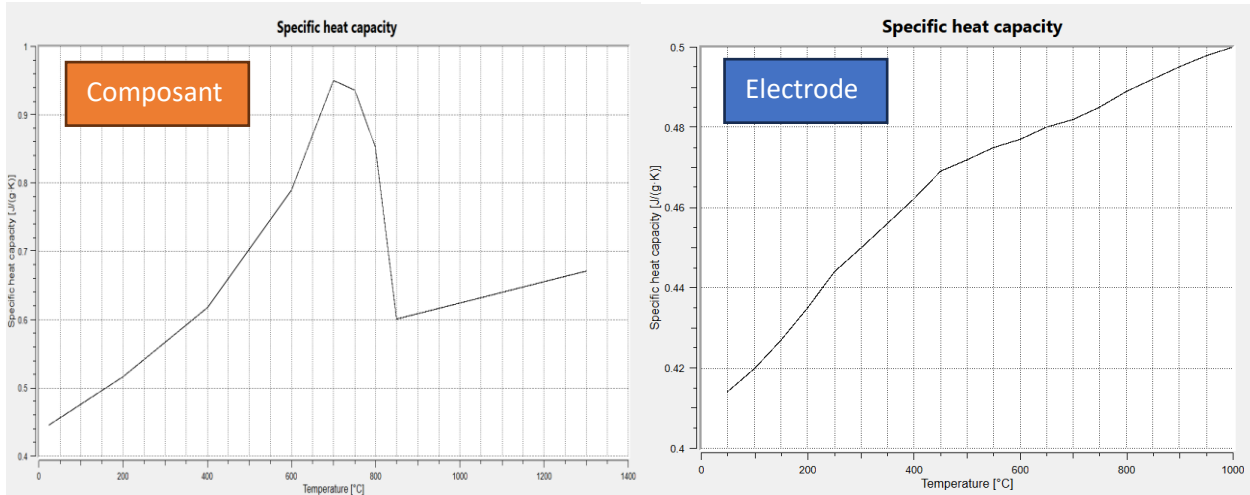


Figure 4.9- Représente la capacité spécifique de la chaleur des composants et de l'électrode

c) La densité

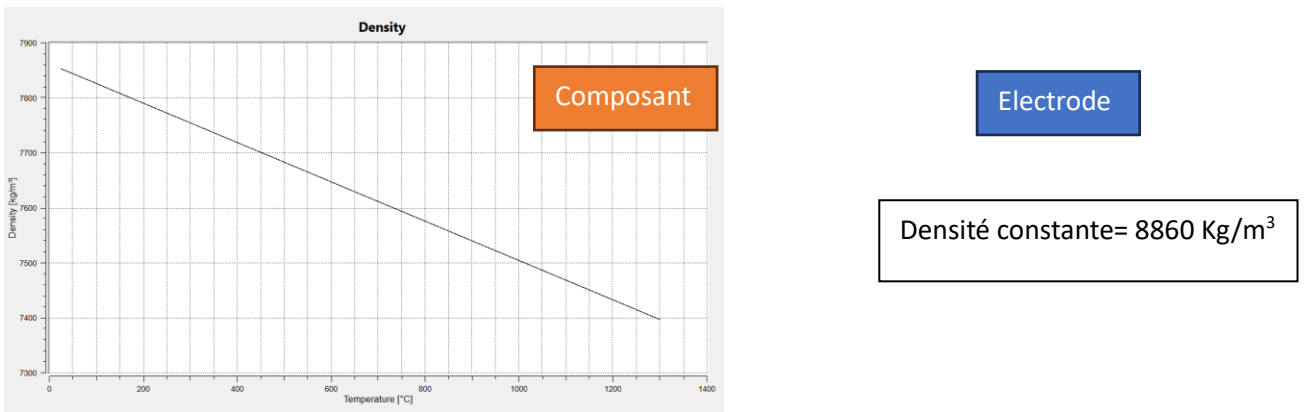


Figure 4.10- Représente la densité des composants et de l'électrode

4.4 Propriétés mécaniques

a) Module d'Young (E)

Décrit la relation entre la contrainte et la déformation élastique : $\sigma = E \cdot \epsilon$. Peut-être fonction de la température. Ne pas descendre en dessous de 5 GPa pour éviter les instabilités.

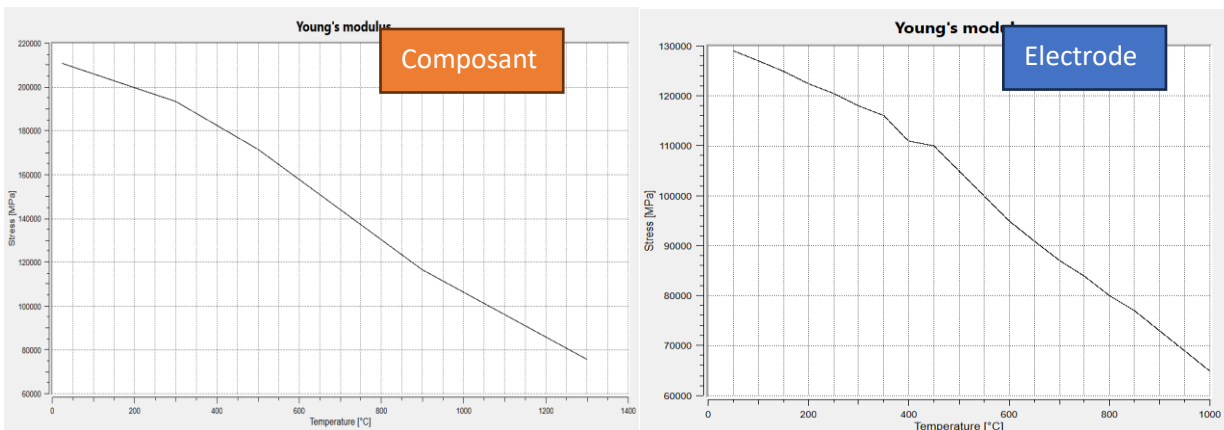


Figure 4.11- Représente le Module d'Young des composants et de l'électrode

b) Coefficient de Poisson (ν)

Rapport entre la déformation latérale et longitudinale : ν , Valeur typique pour les métaux : 0.25 - 0.35. Préférable de ne pas définir comme fonction de la température. Dans notre cas $\nu=0.3$ pour les composants et $\nu=0.34$ pour l'électrode.

c) Coefficient de dilatation thermique (α)

La dilatation thermique $\epsilon_t = \alpha \cdot \Delta T$ est sensible dans les simulations thermomécaniques.

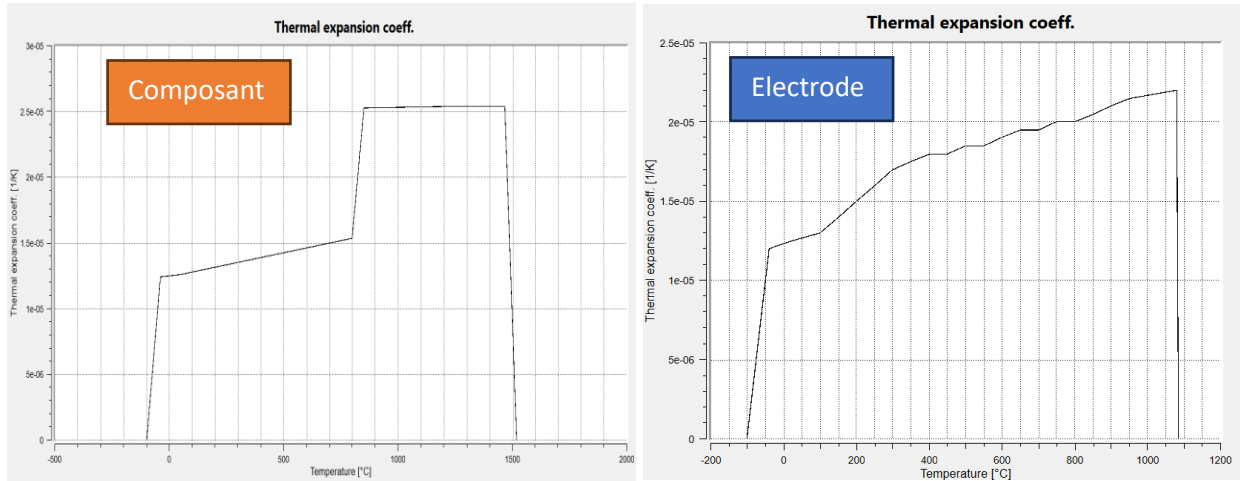


Figure 4.12- Représente le coefficient de dilatation thermique des composants et de l'électrode

4.5 Courbes de comportement (Flow Curves)

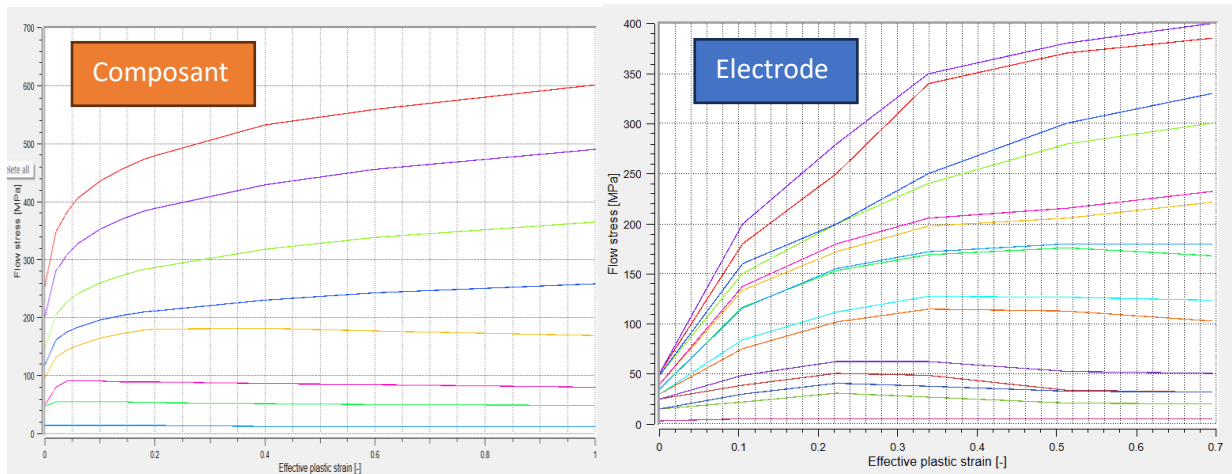


Figure 4.13- Représente les courbes de comportement des composants et de l'électrode

Les courbes peuvent être tabulées ou exprimées analytiquement. Éviter les extrapolations hors du domaine de validité (T, vitesse, déformation).

5. Analyse des résultats de simulation

L'évaluation des performances des modèles numériques développés pour le soudage par résistance par points (RSW) est une étape essentielle dans la validation des hypothèses physiques

et la qualité des prévisions. Dans cette section, deux approches de simulation thermomécanique sont analysées et comparées :

- Le modèle thermomécanique avec chauffage par effet Joule (modèle complet), et
- Le modèle utilisant un cycle thermique prédéfini (modèle simplifié).

5.1 Modèle thermomécanique avec chauffage par effet Joule

Dans cette section nous présentons les résultats de l'utilisation du modèle thermomécanique avec chauffage par effet Joule dont les avantages et les inconvénients sont discutés dans le tableau 3.1 du chapitre précédent.

5.1.1 Evaluation de la température

Les Figures 4.14 à 4.18 montrent l'évolution de la température maximale dans les tôles au cours du cycle de soudage. Trois points sur la partie supérieure du montant B (B-pillar) ont été instrumentés pour mesurer localement la température. Les résultats indiquent des pics thermiques bien définis, traduisant une bonne localisation du bain de fusion. Ces mesures confirment la capacité du modèle à prédire l'historique thermique local avec une bonne fidélité spatiale et temporelle.

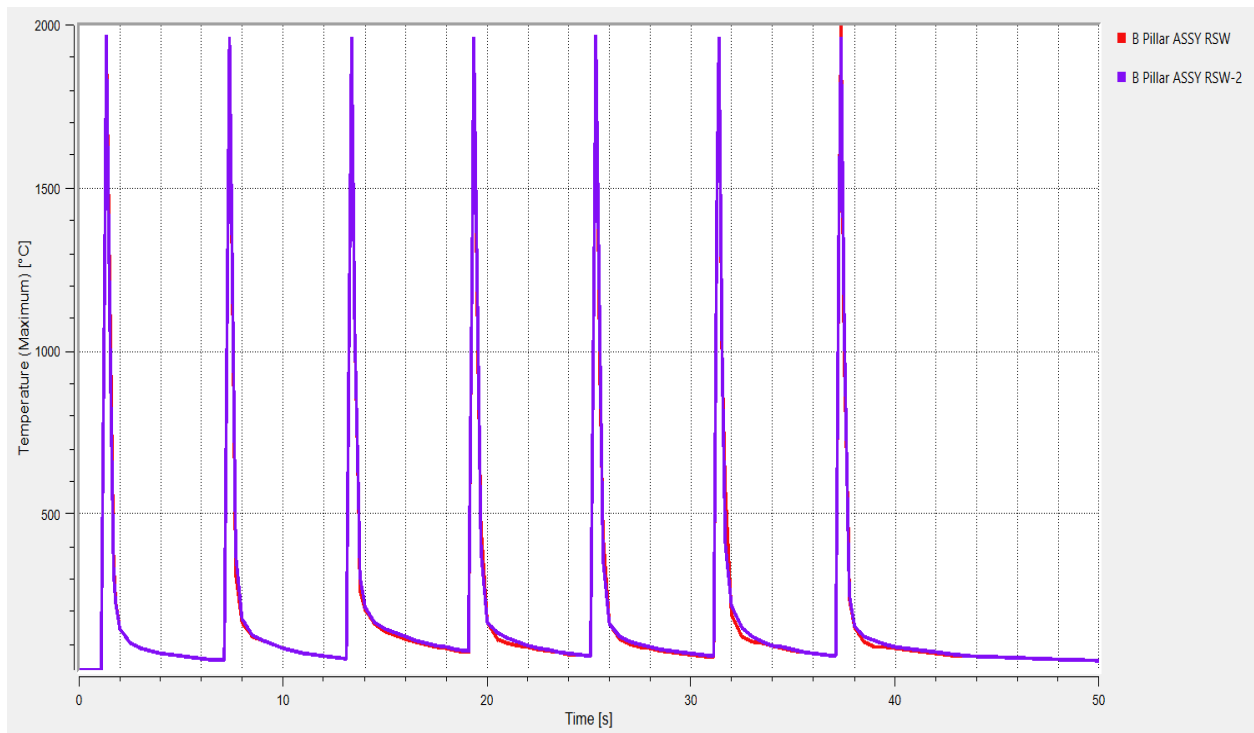


Figure 4.14- Changement de la température maximum de l'opération de soudage en fonction du temps pour les deux tôles.

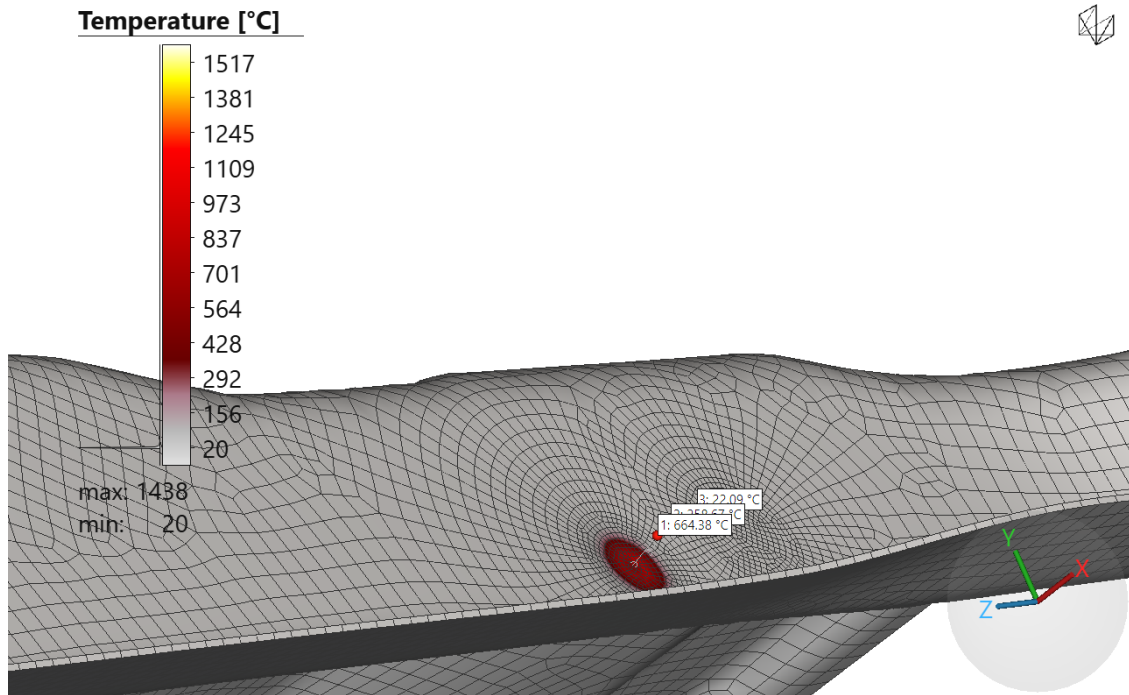


Figure 4.15- Localisation de trois points de mesure de la température sur la partie supérieure du B-pillar.

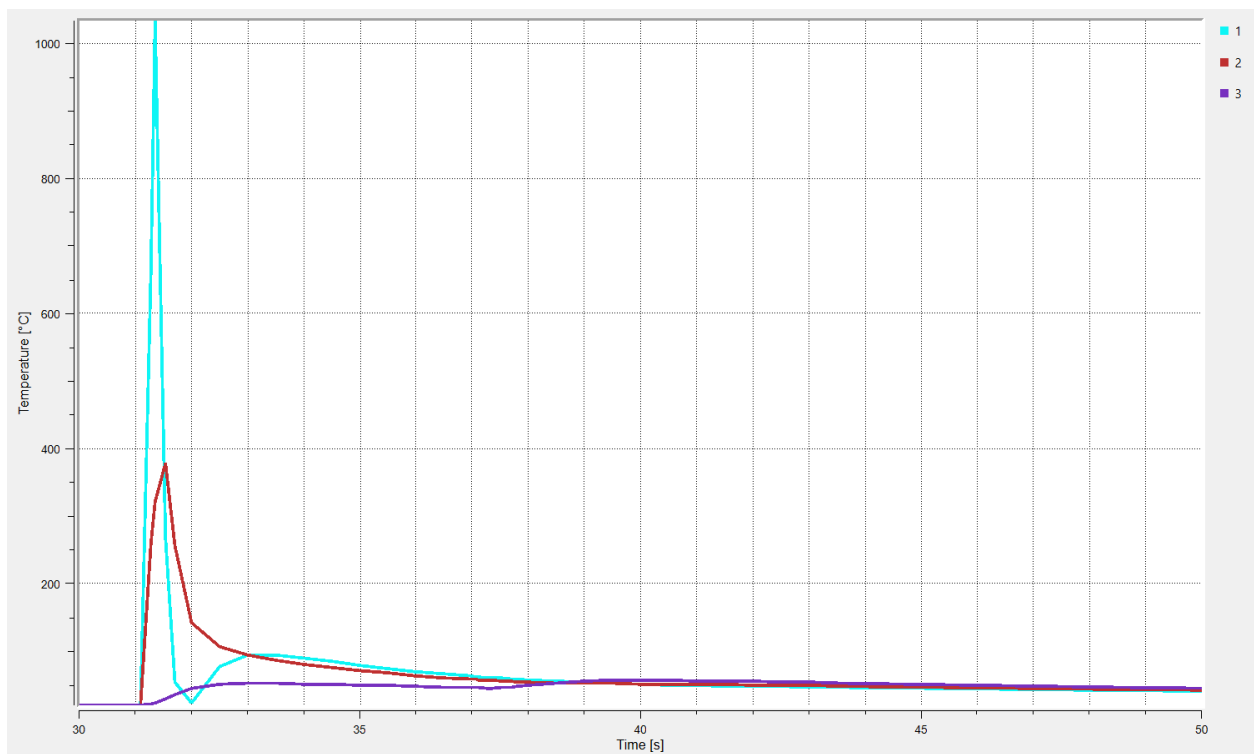


Figure 4.16- Mesure de la température en fonction du temps dans trois points sur la partie supérieure du B-pillar.

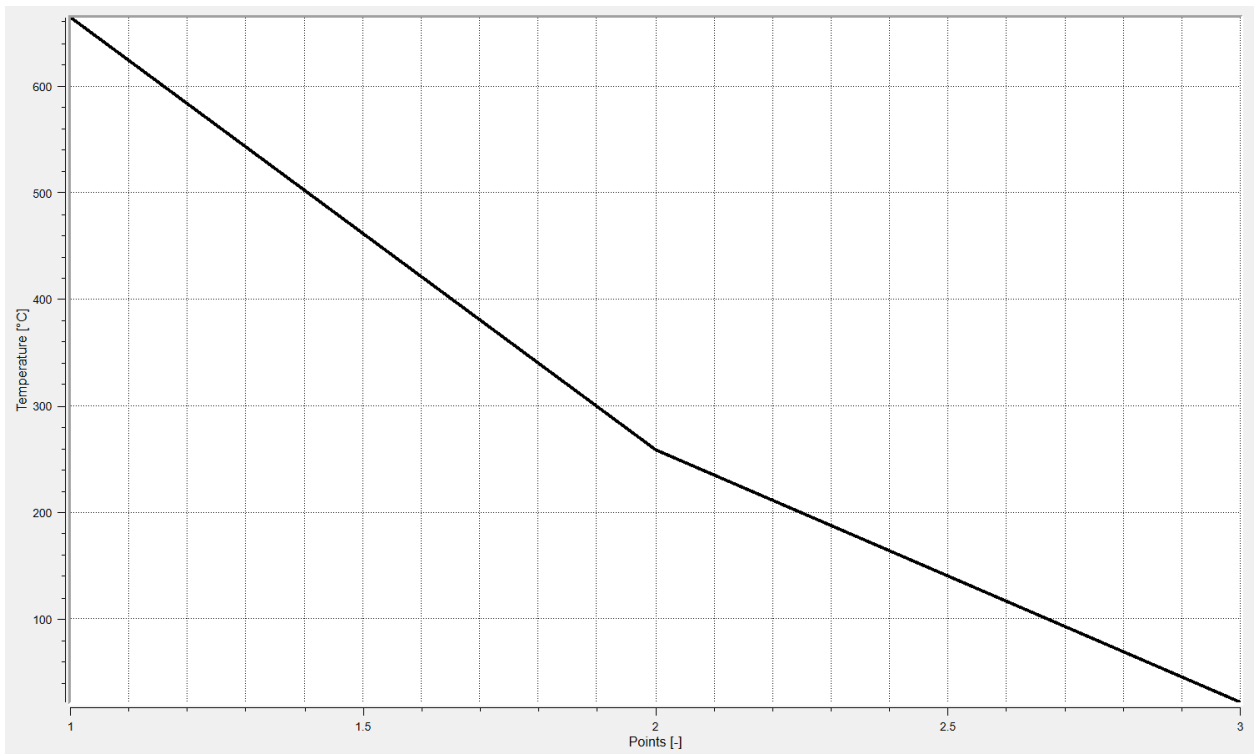


Figure 4.17- Mesure de la température en fonction des trois points localisés sur la partie supérieure du B-pillar.

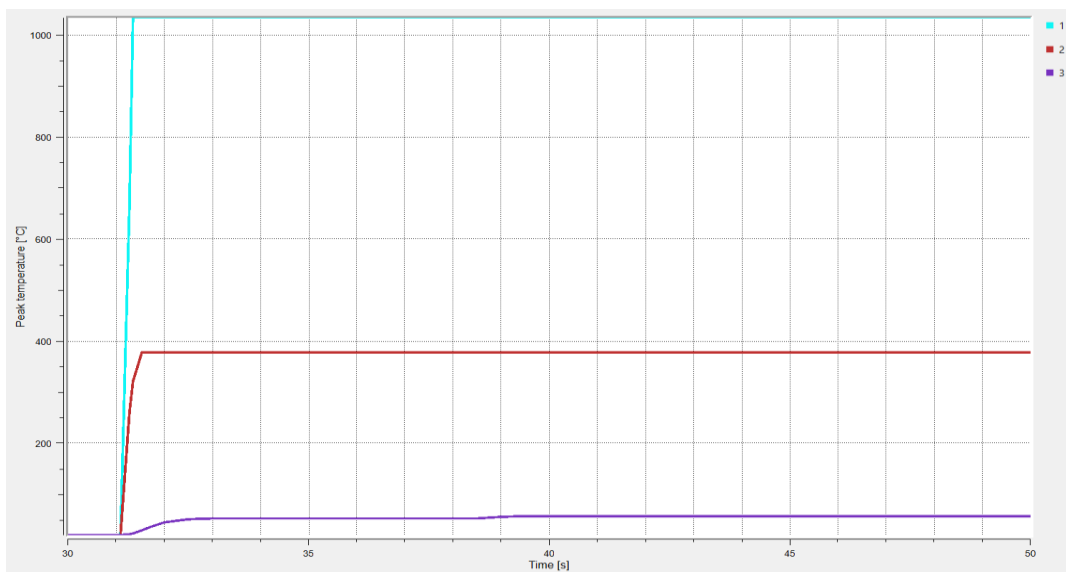


Figure 4.18- Représente les pics de température en fonction du temps dans trois points sur la partie supérieure du B-pillar.

5.1.2 Evaluation de la distorsion

Les figures 4.19 et 4.20 illustrent l'évolution de la distorsion totale après un temps de refroidissement de 200 secondes. Les résultats révèlent une accumulation significative de déformations résiduelles dans certaines zones critiques, soulignant l'influence du cycle thermique localisé sur les déplacements finaux de la structure.

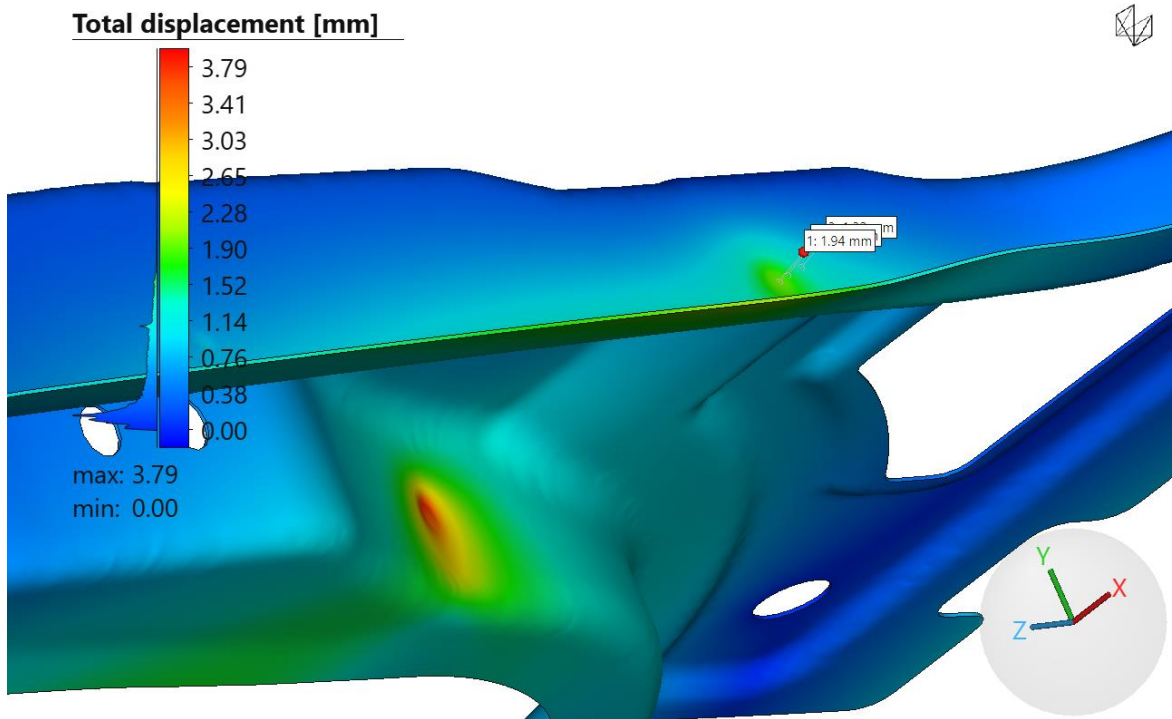


Figure 4.19- Variation de la distorsion totale après le refroidissement total à 200s.

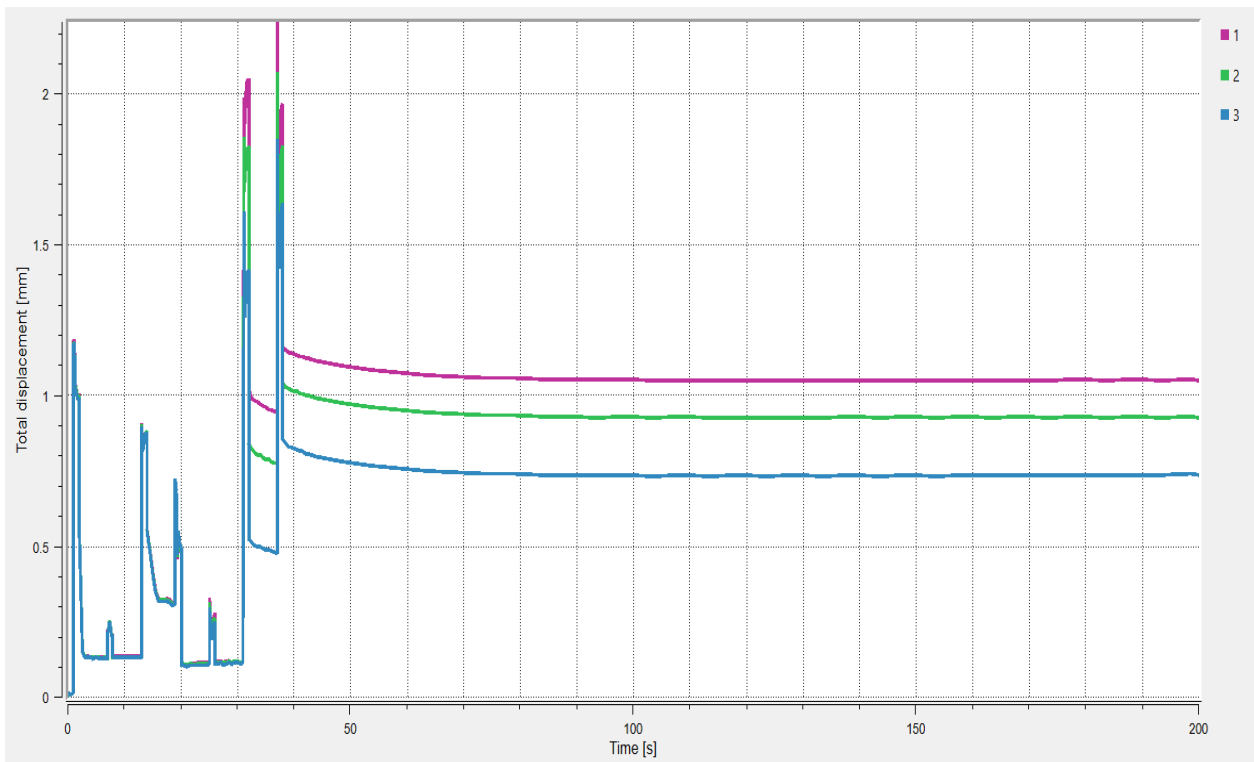


Figure 4.20- Evolution de la distorsion totale en fonction du temps dans les trois positions localisées sur la Figure 4.19.

5.1.3 Evaluation de la contrainte équivalente

L'analyse des contraintes de von Mises (figures 4.21 et 4.22) met en évidence des concentrations de contraintes aux abords de la zone fondue. La nature transitoire et localisée des pics de contrainte montre l'importance de coupler thermiquement et mécaniquement le modèle pour capter ces effets.

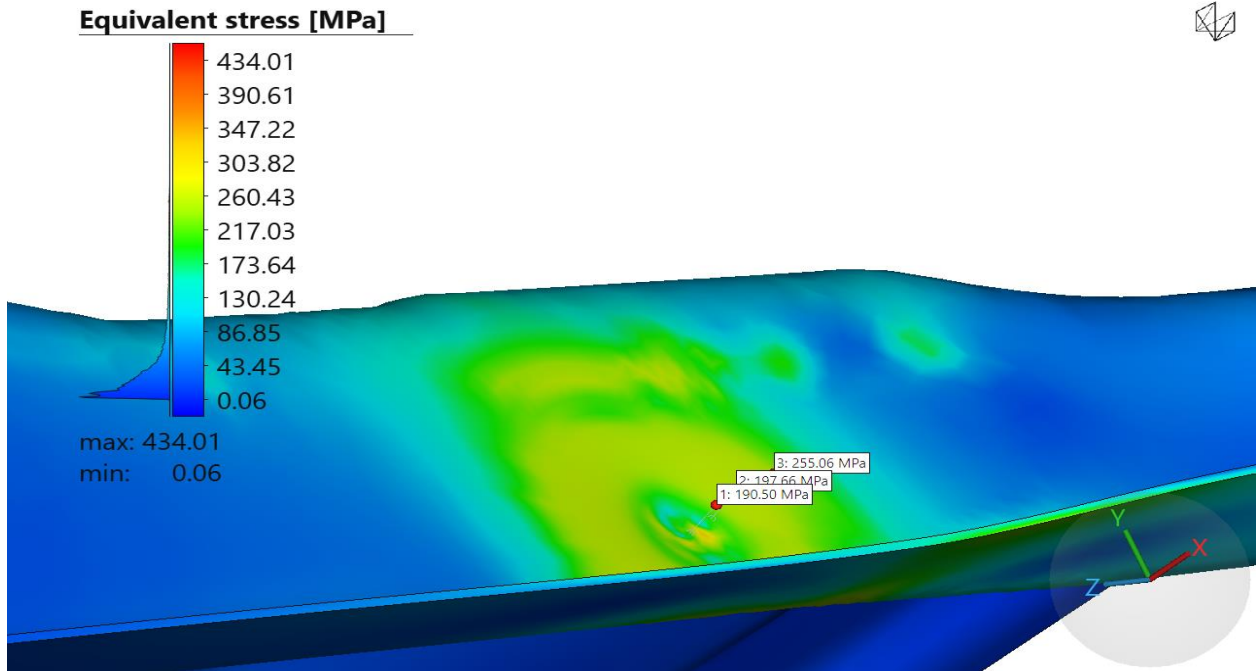


Figure 4.21a- Représente la variation de la contrainte équivalent après le refroidissement total à 200s.

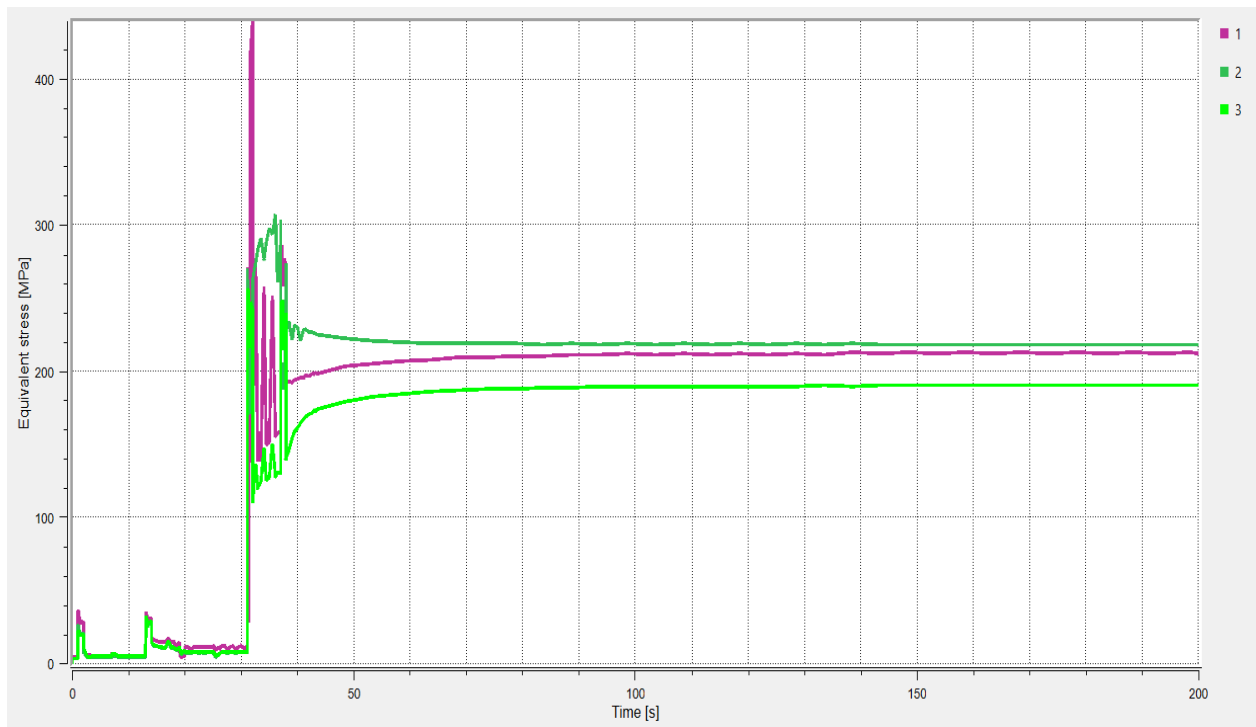


Figure 4.21b- Evolution de la contrainte équivalente en fonction du temps dans les trois positions localisées sur la Figure 4.20.

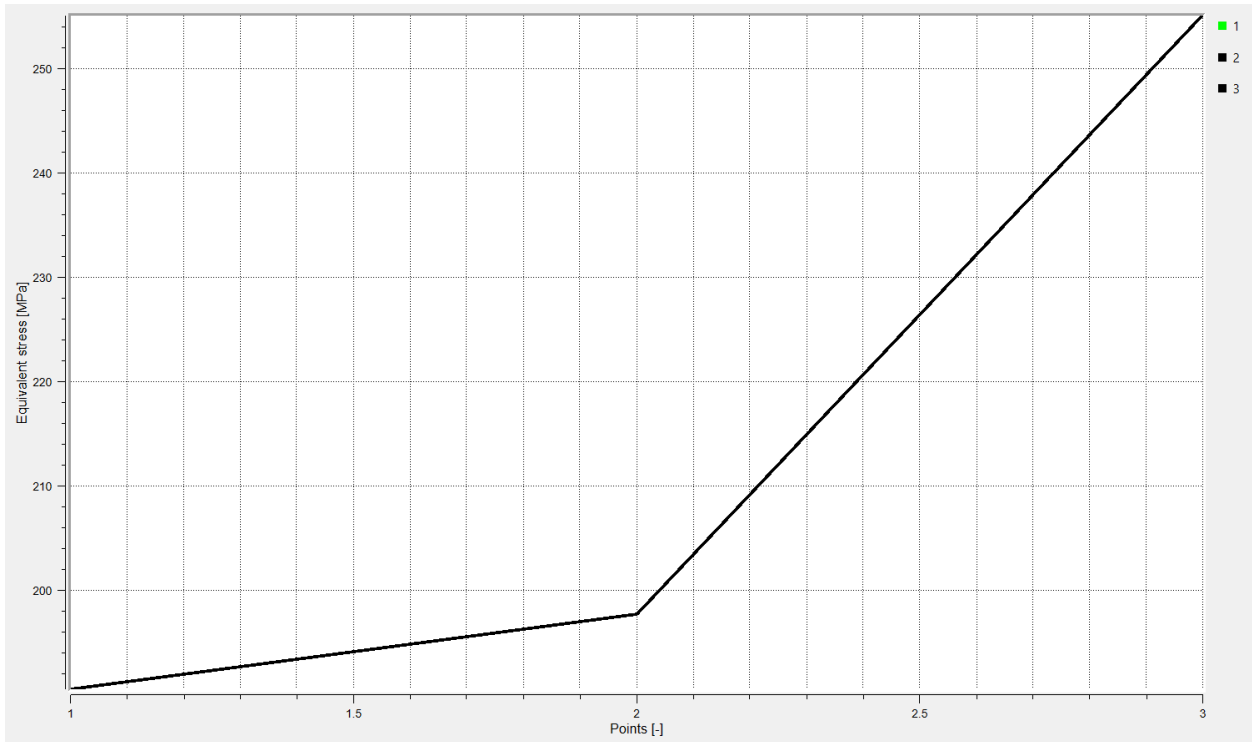


Figure 4.22- Représente la contrainte équivalente en fonction du temps dans trois points sur la partie supérieure du B-pillar.

5.1.4 Evaluation de l'effet de la fixation

Pour expliquer la variation de distorsion totale, 4 figures sont mentionnées : la Figure 4.23 présente le couple de torsion résultant. Les Figures (4.24a, 4.24b et 4.24c) détaillent l'effet des efforts de fixation sur l'évolution des distorsions selon les axes X, Y et Z. Il apparaît que les moments mécaniques induits lors du cycle de soudage influencent directement la redistribution des contraintes et la stabilité géométrique de l'assemblage.

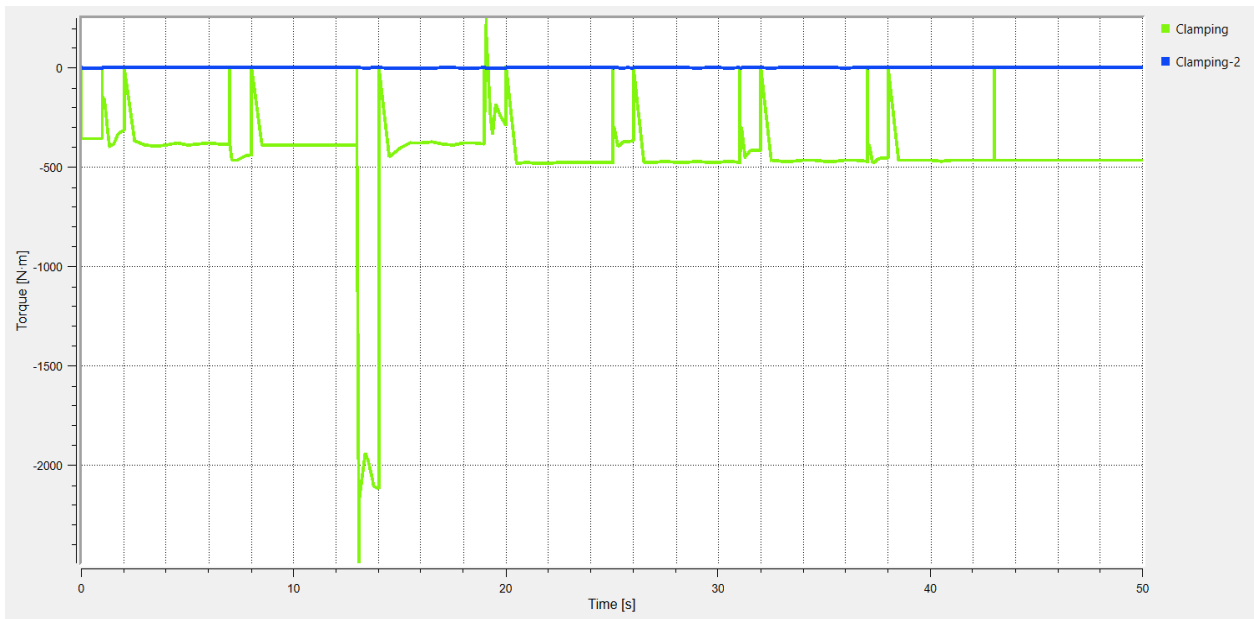


Figure 4.23- Représente le changement du couple de distorsion en fonction du temps.

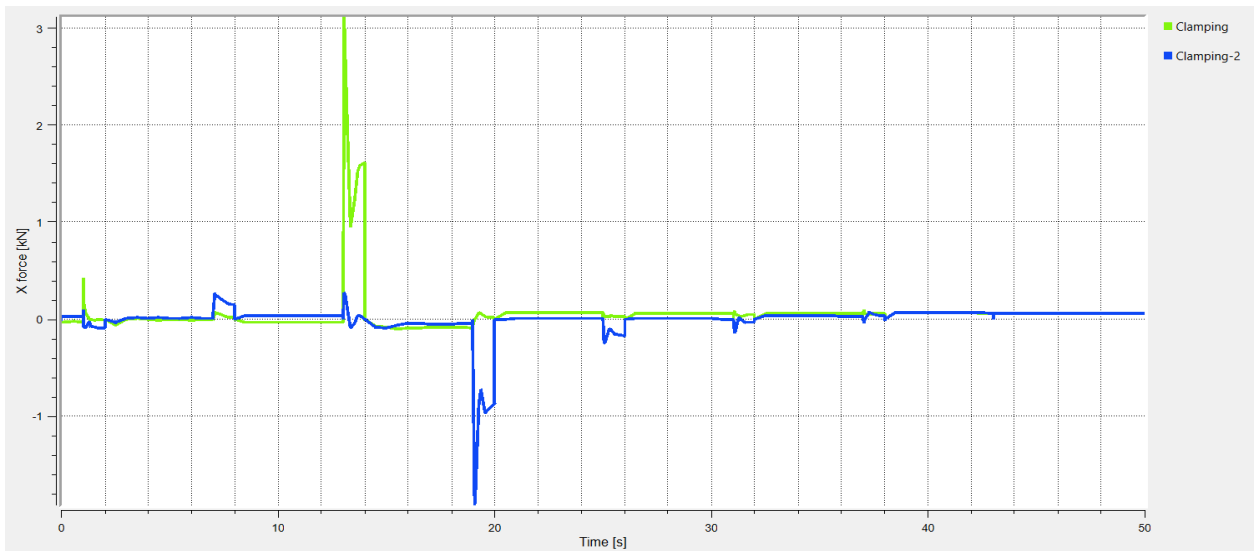


Figure 4.24a- Changement de force selon l'axe X en fonction du temps.

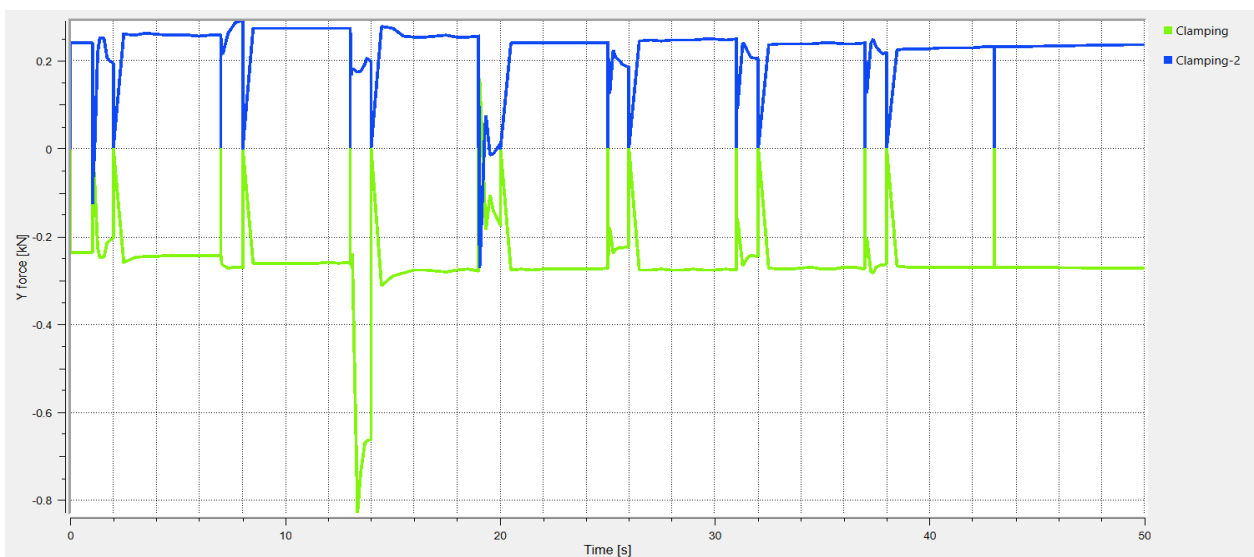
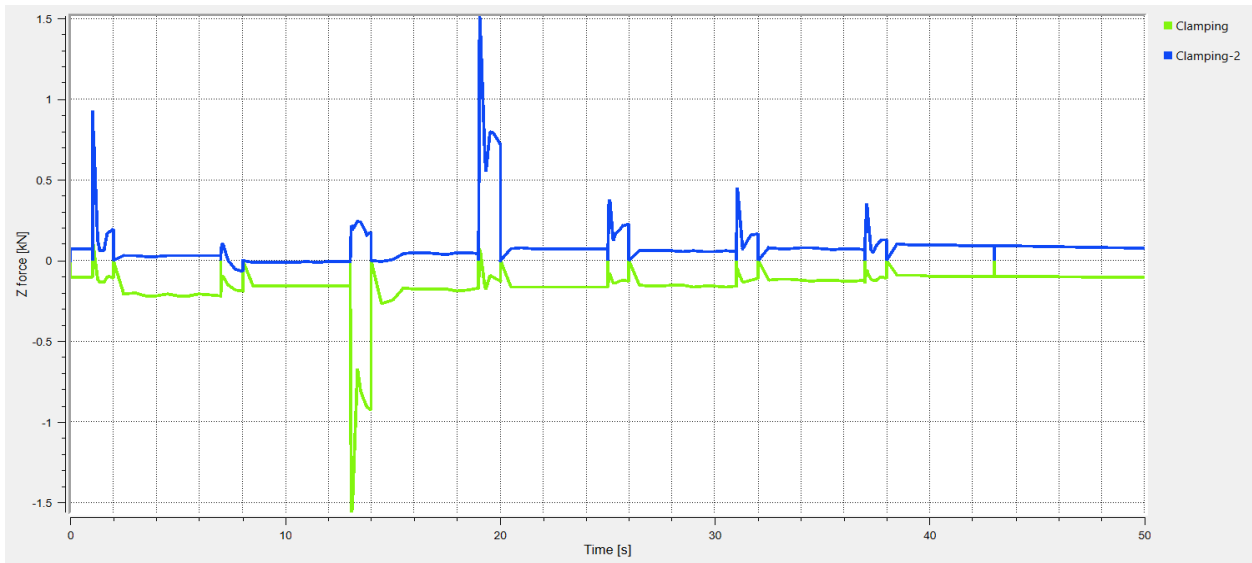


Figure 4.24b- Changement de force selon l'axe Y en fonction du temps.**Figure 4.24c-** Changement de force selon l'axe Z en fonction du temps.

Ces figures permettent de comprendre comment les forces appliquées aux composants évoluent pendant le processus de soudage.

Les forces et les moments appliqués aux objets peuvent entraîner des contraintes qui, à leur tour, provoquent des déformations et des distorsions. Ainsi, l'évolution de la distorsion totale peut être liée aux forces et aux moments appliqués et à leur interaction avec les propriétés des matériaux des objets.

5.2 Modèle thermomécanique avec cycle thermique

5.2.1 Evaluation de la distorsion

Les figures 4.25 à 4.27 comparent les déplacements prédits par les deux modèles. Le modèle avec cycle thermique tend à sous-estimer les déplacements globaux, traduisant une simplification excessive de la réalité physique du processus. À l'inverse, le modèle complet restitue des valeurs plus proches des comportements observés expérimentalement.

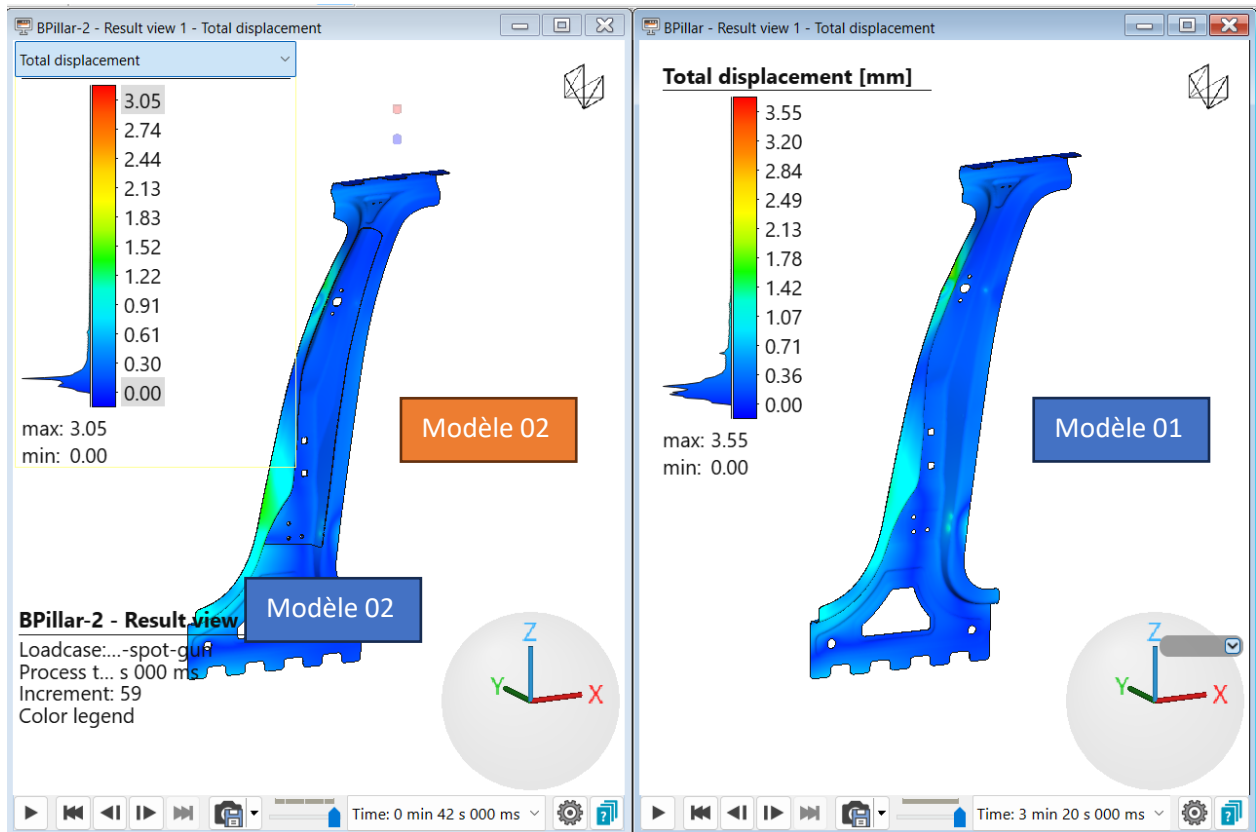


Figure 4.25- Comparaison du déplacement total des deux modèles

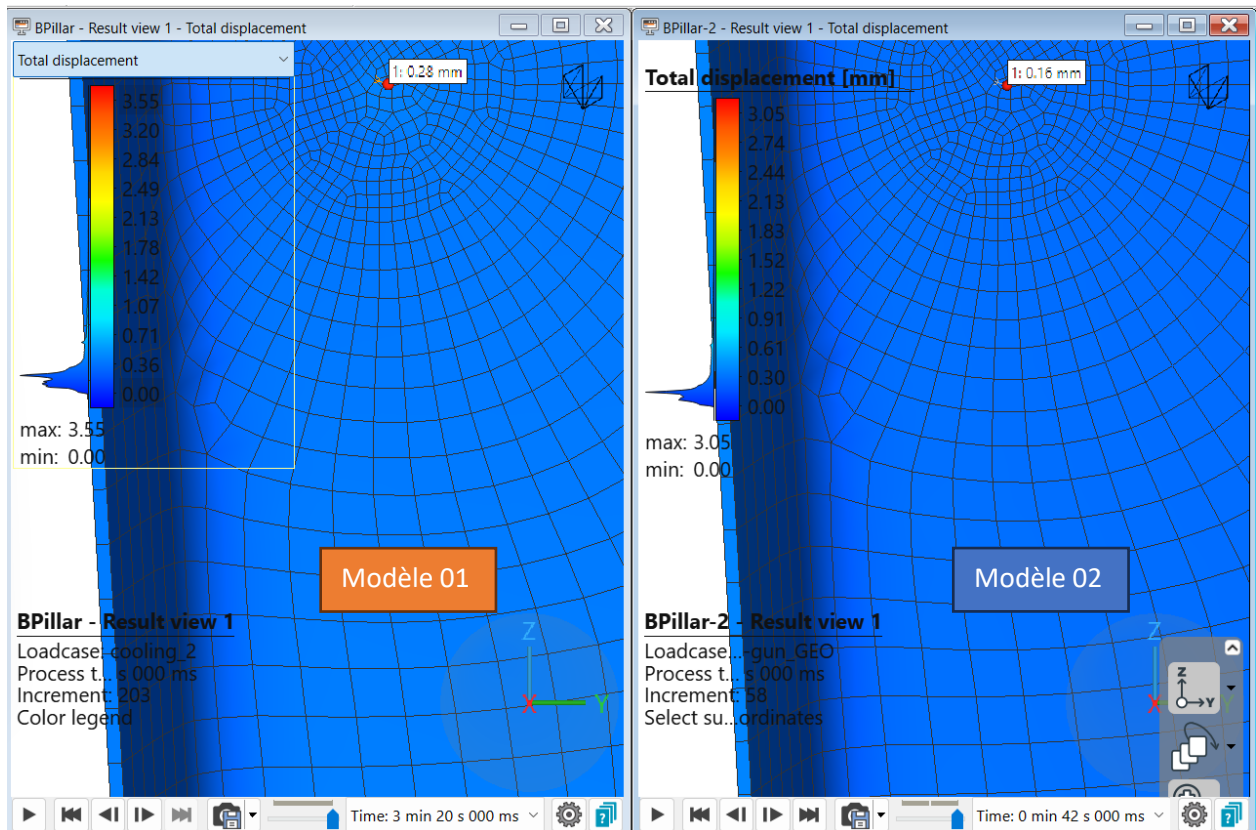


Figure 4.26- Comparaison du déplacement total dans le même point par les deux modèles.

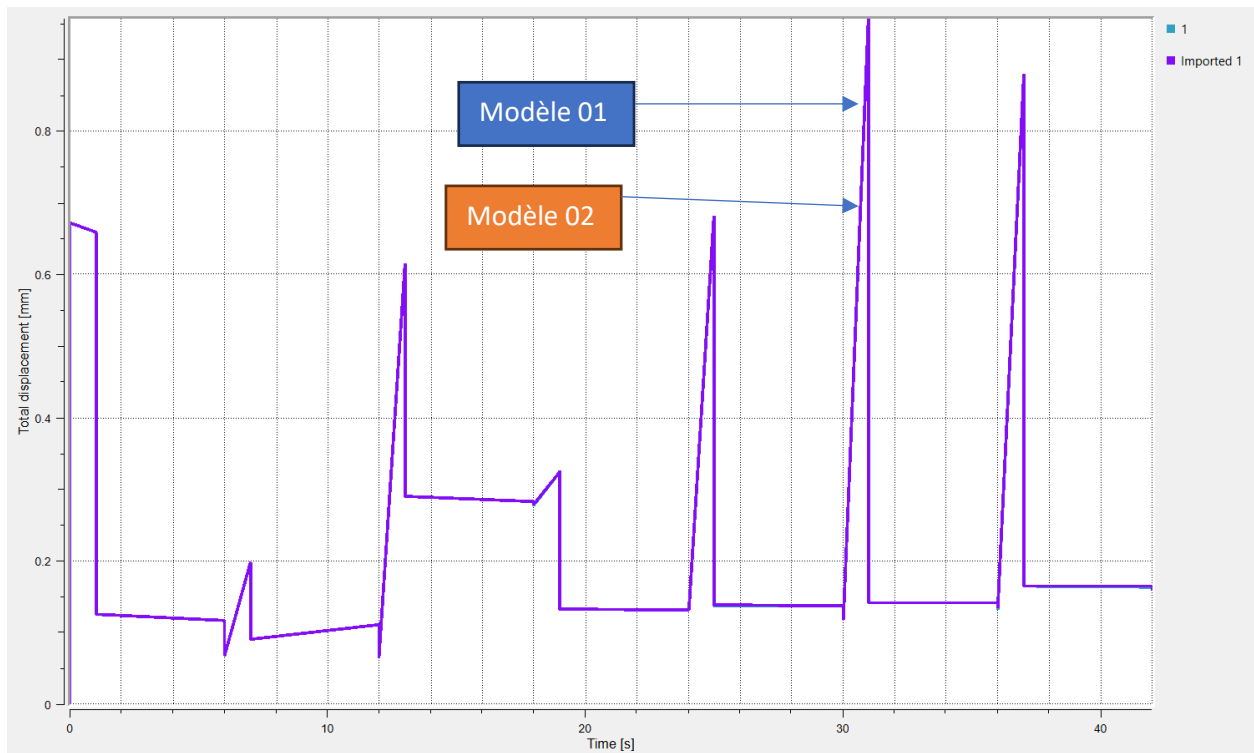


Figure 4.27- Evolution du déplacement total dans le même point par les deux modèles.

5.2.2 Evaluation de la contrainte équivalente

Les figures 4.28 à 4.31 montrent que le modèle à cycle thermique prédit également des contraintes moindres et moins localisées que le modèle couplé. Cette sous-estimation peut conduire à une évaluation inadéquate de la résistance mécanique au cours du temps dans de la soudure.

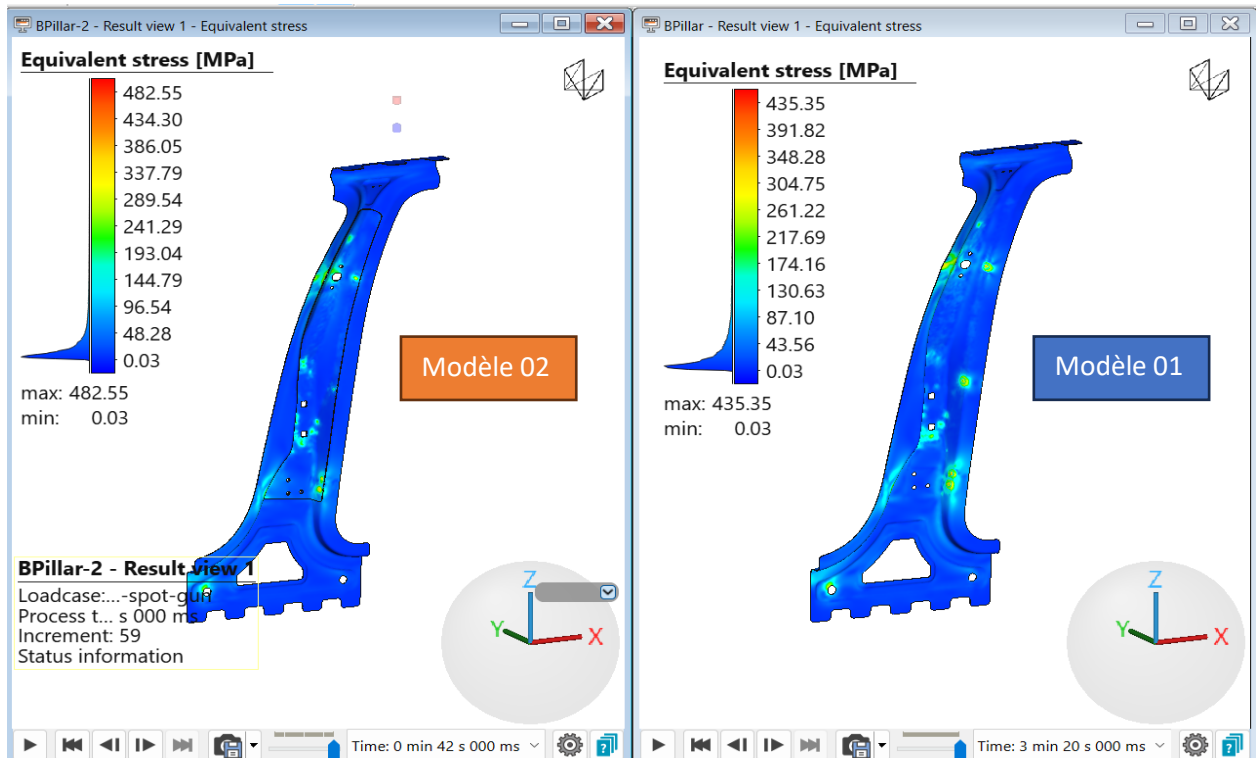


Figure 4.28- Comparaison la contrainte équivalente évaluée par les deux modèles

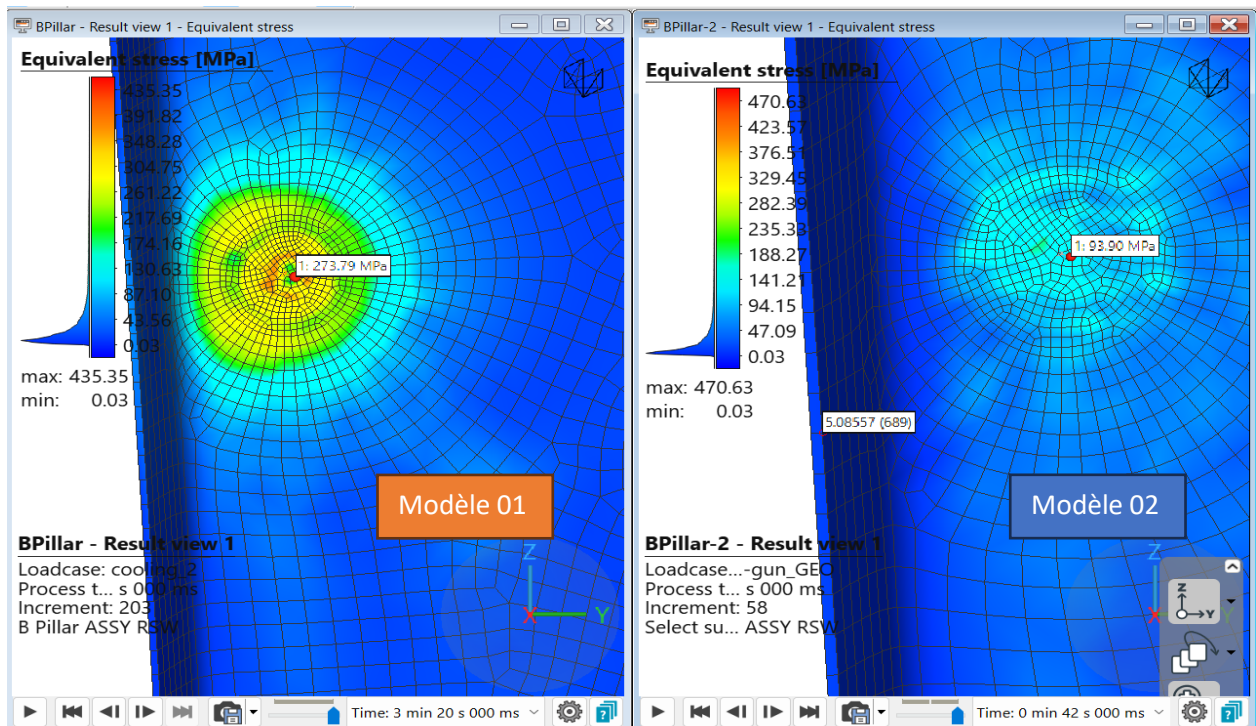


Figure 4.29- Comparaison la contrainte équivalente évaluée dans le même pont de mesure par les deux modèles

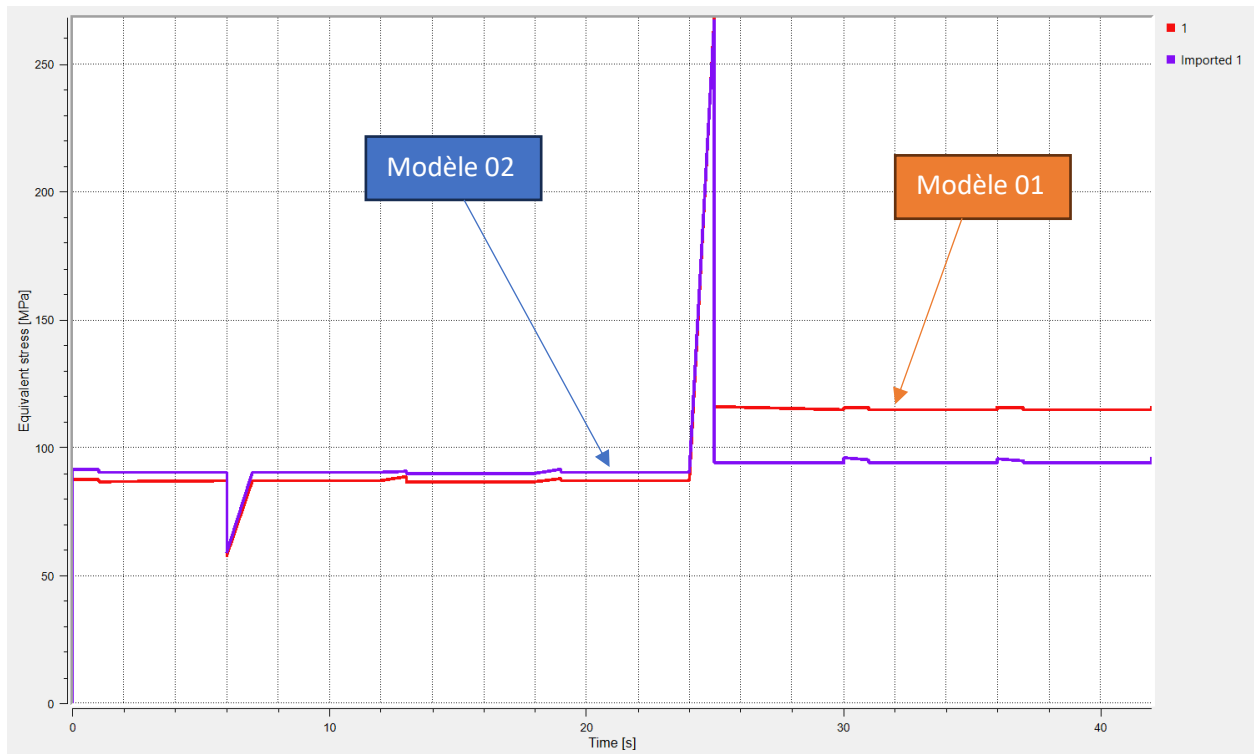


Figure 4.30- Evolution de la contrainte équivalente en fonction du temps évaluée dans le même pont de mesure par les deux modèles

L'analyse des deux modèles permet de conclure que :

- Le modèle avec effet Joule, bien que plus coûteux en ressources de calcul, fournit une représentation plus fidèle des phénomènes couplés dans le soudage par points.
- Le modèle basé sur un cycle thermique est plus rapide à mettre en œuvre, mais au prix d'une perte notable de précision, notamment en ce qui concerne la prédiction des distorsions et des contraintes équivalentes.

Ainsi, pour des applications industrielles où la robustesse des assemblages est critique, le recours à une simulation couplée électrothermique et thermomécanique apparaît indispensable.

La Figure 4.31 présente la distribution spatiale des contraintes équivalentes (de von Mises) dans une coupe de la soudure obtenue à l'issue du cycle de refroidissement. Les iso-contraintes permettent d'identifier les zones critiques où les niveaux de contrainte atteignent des valeurs élevées, potentiellement proches de la limite d'élasticité du matériau.

L'analyse révèle une concentration importante des contraintes dans la zone affectée thermiquement (ZAT) et au niveau de l'interface entre les deux tôles. Cela s'explique par les forts gradients thermiques et les différences de dilatation thermique qui apparaissent lors du cycle de soudage. Ces zones sont donc particulièrement vulnérables à la fissuration ou à la fatigue à long terme.

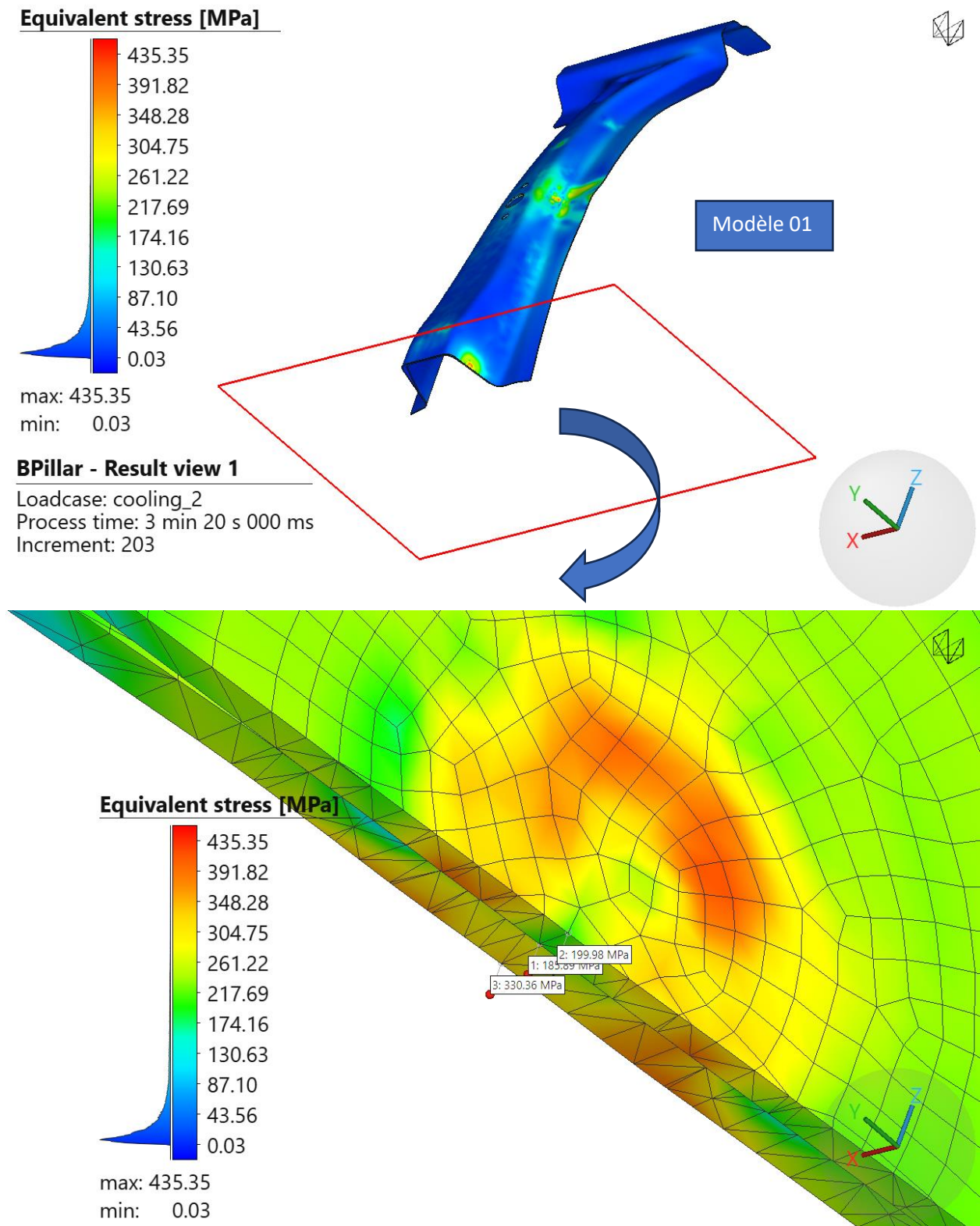


Figure 4.31- Représentation des iso-contraintes dans trois points d’une section de la soudure par point.

La Figure 4.32 montre une courbe temporelle des contraintes équivalentes en trois points distincts choisis dans la même section que celle illustrée par la Figure 4.31. Cette évolution temporelle est essentielle pour évaluer les phases critiques du cycle thermique, notamment :

- La montée en température, où les contraintes thermiques initiales commencent à apparaître.
- Le palier thermique, pendant lequel les contraintes peuvent temporairement se stabiliser.
- La phase de refroidissement, qui engendre des variations rapides et souvent importantes des contraintes internes.

Les courbes montrent des pics bien marqués pendant le refroidissement, ce qui est cohérent avec le retrait thermique différentiel entre les matériaux. Le modèle couplé permet ainsi de capter ces évolutions fines et d'anticiper les zones à risque dans la soudure.

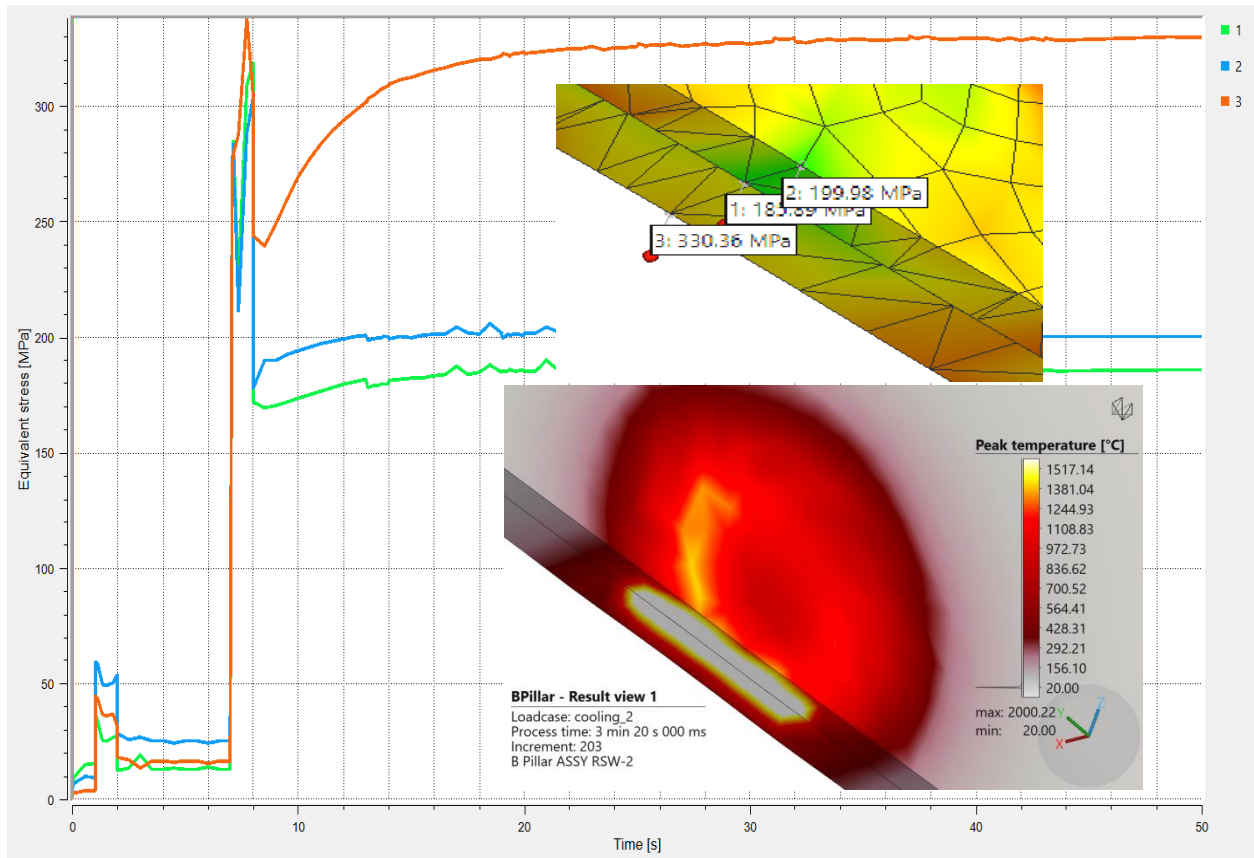


Figure 4.32- Evolution des contraintes équivalentes en fonction du temps dans trois points d'une section de la soudure par point.

6. Conclusion

La modélisation du soudage par résistance par points (RSW) constitue un outil fondamental pour analyser, comprendre et optimiser ce procédé clé de l'industrie automobile. Ce chapitre a permis de décrire une démarche complète de simulation du RSW, intégrant les phénomènes électrothermiques, thermomécaniques et métallurgiques à travers des modèles numériques avancés.

Deux approches de modélisation thermomécanique ont été explorées : l'une basée sur un couplage direct avec le chauffage par effet Joule, et l'autre utilisant un cycle thermique

préalablement défini. L'analyse comparative entre ces deux modèles, à travers les figures 4.25 à 4.31, révèle des différences significatives en termes de précision et de comportement prédictif :

- Déplacement total : Le modèle avec chauffage par effet Joule (modèle complet) prédit des déplacements légèrement plus importants que le modèle basé sur un cycle thermique. Cela s'explique par une meilleure prise en compte des interactions thermomécaniques instantanées pendant le cycle de soudage (Figures 4.25 à 4.27).
- Contraintes équivalentes : Le modèle couplé donne des valeurs de contrainte plus élevées et mieux localisées, traduisant une simulation plus réaliste des gradients thermiques et des effets mécaniques (Figures 4.28 à 4.31).
- Évolution temporelle : Le modèle complet suit avec plus de fidélité les variations rapides des paramètres, offrant une résolution temporelle plus fine.

Ces résultats mettent en évidence que, bien que plus coûteux en ressources de calcul, le modèle thermomécanique couplé avec chauffage par effet Joule permet une représentation plus fidèle du comportement réel du procédé, en particulier pour les applications critiques où la précision est primordiale.

En définitive, la simulation du RSW permet non seulement de prédire avec justesse la qualité de la soudure, les distorsions et les contraintes résiduelles, mais elle offre aussi un levier puissant pour améliorer la robustesse des assemblages, adapter les paramètres aux matériaux avancés et réduire les essais expérimentaux. Elle s'inscrit donc comme un pilier indispensable de l'ingénierie virtuelle dans la conception moderne des structures soudées.

Conclusion générale et perspectives

a) Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire a permis d'explorer de manière approfondie le procédé de soudage par résistance par points (RSW), depuis ses principes de fonctionnement jusqu'à sa modélisation numérique avancée à l'aide du logiciel *Simufact-Welding*. L'étude a été structurée en quatre chapitres complémentaires, chacun contribuant à construire une compréhension complète, progressive et rigoureuse du procédé étudié.

Le premier chapitre a établi un état de l'art détaillé sur le soudage par points, en abordant son principe, ses composants techniques, les méthodes de contrôle de qualité (destructives et non-destructives), ainsi que les modèles numériques utilisés pour simuler la formation du noyau de soudure. Cette base théorique a mis en lumière les enjeux industriels liés à la maîtrise de la qualité des soudures, en particulier dans les secteurs à haute exigence comme l'automobile.

Dans le deuxième chapitre, l'attention a été portée sur l'application du RSW dans l'industrie automobile, avec une étude de cas centrée sur le composant B-pillar. Ce volet a permis d'analyser les spécificités industrielles du procédé, ses avantages en matière de productivité et de qualité, mais également ses limites, notamment vis-à-vis de l'assemblage de matériaux de formes plus en plus complexes.

Le troisième chapitre a introduit les bases physiques du procédé et détaillé les fonctionnalités du logiciel *Simufact-Welding*, outil utilisé pour la modélisation. Les éléments fondamentaux tels que la résistance électrique, la cinématique du système de soudage, et les différents modes de simulation ont été présentés. Ce chapitre a permis d'établir les conditions numériques nécessaires pour la construction des modèles réalistes.

Le quatrième chapitre a constitué le cœur de ce travail en présentant la modélisation détaillée du RSW, incluant le couplage des phénomènes physiques (thermiques, électriques, mécaniques), les propriétés des matériaux, les conditions aux limites, et surtout l'analyse des résultats issus des simulations. Deux modèles ont été comparés : un modèle thermomécanique avec chauffage par effet Joule, et un modèle plus simplifié utilisant un cycle thermique prédéfini. L'évaluation des distorsions, des températures, des contraintes équivalentes et de l'effet des fixations a clairement montré que le modèle complet offrait une représentation plus fidèle des phénomènes en jeu, bien qu'il soit plus exigeant en termes de calcul.

b) Perspectives

Ce travail ouvre plusieurs perspectives de recherche et d'optimisation :

- L'intégration de lois de comportement avancées pour mieux représenter les matériaux modernes (aciers à ultra-haute résistance, alliages d'aluminium).
- L'étude des défauts de soudure tels que l'expulsion ou les fissures par simulation prédictive.

En conclusion, la **modélisation numérique du soudage par points** s'impose comme un outil stratégique pour le contrôle qualité, la conception virtuelle et l'innovation industrielle. Elle permet de réduire les essais physiques, d'anticiper les défauts et d'adapter les procédés aux défis technologiques actuels et futurs.

Bibliographie

- [1] Sibilia, C., & Raelison, R.N. (2015). Approche multiphysique du soudage par point : Simulation et validation expérimentale. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- [2] ArcelorMittal Internal Reports (2007–2018). Weldability of coated steel sheets in multi-sheet stack-ups. Technical documentation, R&D Department.
- [3] Cho, Y., & Rhee, S. (2002). Experimental analysis of nugget formation in resistance spot welding. *Welding Journal*, 81(9), 245s–252s.
- [4] Kaars, S., Füssel, U., & Bergmann, J.P. (2010). Dynamic resistance measurement as a method for real-time quality control in resistance spot welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(3), 443–449.
- [5] Füssel, U., et al. (2017). Infrared imaging for in-situ observation of nugget development in spot welding. *Measurement Science and Technology*, 28(5), 055403.
- [6] Upthegrove, D., & Zhang, H. (1999). High-speed observation of resistance spot welding using transparent electrodes. *Proceedings of the AWS Welding Conference*.
- [7] Ikeda, R., et al. (2016). Effect of two-stage current on nugget formation in dissimilar welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 21(4), 282–289.
- [8] Cho. Y et Rhee.S, “Experimental study of nugget formation in resistance spot welding”, *Weld. J.*, vol. 82, no. 8, pp. 195–201, 2003.
- [9] Sibilia. G, “Modélisation du soudage par point : Influence des conditions interfaciales sur le procédé”, Thèse de Doctorat de l’École Polytechniques de l’Université de Nantes, 2003.
- [10] Raelison. R. N, “Étude et modélisation des conditions interfaciales dans le procédé de soudage par résistance par point de tôles d’acier revêtues”, Thèse de Doctorat de l’Université Bretagne Sud, 2010.
- [11] Blondeau. R, *Procédés et applications industrielles du soudage*, Lavoisier, 2001.
- [12] Weman. K, *Welding Processes Handbook*, Woodhead Publishing Limited, 2003.
- [13] Gauthier. E, “Etude expérimentale et numérique de la dégradation cyclique des électrodes en CuCr1Zr lors du soudage par résistance par point”, Thèse de Doctorat de l’Université Bretagne Sud, 2014.
- [14] Dupuy. T, “La dégradation des électrodes lors du soudage par points de tôles d’acier zinguées”, Thèse de Doctorat de l’École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1998.
- [15] Alfaro. S. C. A, Vargas.J. E, Wolff.M. A, et Vilarinho. L. O, “Comparison between AC and MFDC resistance spot welding by using high speed filming”, *Achiev. J. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 24, no. 1, pp. 333–339, 2007.

- [16] Li. W et Cerjanec. D, “A comparative study of AC and MFDC resistance spot welding”, Proceeding of IMECE04, 2004.
- [17] Costa. H. R. M, Dias. J. S, Aguiar. R. A. A, Lima. R. A. A, et Lopes D. M, “Effect of process parameters on lifetime of copper electrodes used in spot welding of IF steel sheets”, *Weld. Equip. Technol.*, vol. 27, 2016.
- [18] AFNOR, “NF EN ISO 5821.” 2010.
- [19] Martín.Ó, Ahedo.V, Santos J. I, De Tiedra. P, et Galán J. M, “Quality assessment of resistance spot welding joints of AISI 304 stainless steel based on elastic nets”, *Mater. Sci. Eng. A*, vol.676, pp. 173–181, 2016.
- [20] Lee.S, Nam. J, Hwang. W, Kim. J, et Lee. B, “A study on integrity assessment of the resistance spot weld by infrared thermography”, *Procedia Eng.*, vol. 10, pp. 1748–1753, 2011.
- [21] Wyant.R. A, “Measurement and Effect of Contact Resistance in Spot Welding”, *Electr. Eng.*, Vol. 65, pp. 26–33, 1946.
- [22] Savage W. F, E. F. Nippes. E. F, et Wassell F. A, “Dynamic Contact Resistance of Series Spot Welds”, *Weld. Reseach Suppl.*, vol. 7, pp. 43–50, 1978.
- [23] Kaars. J, Mayr. P, et Koppe. K, “Generalized dynamic transition resistance in spot welding of aluminized 22MnB5”, *Mater. Des.*, vol. 106, pp. 139–145, 2016.
- [24] Cho.Y et Rhee.S, “New technology for measuring dynamic resistance and estimating strength in resistance spot welding”, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 11, pp. 1173–1178, 2000.
- [25] Rogeon.P, Carré.P, Mary.L, Bouygues.B, et Barré.J, “Méthode de soudage avec détermination des paramètres de soudage par le calcul d’une impédance cible, et mise en œuvre du procédé”, Brevet n°14/50655, 2014.
- [26] Wang.H, Zhang.Y, et Chen.G, “Resistance spot welding processing monitoring based on electrode displacement curve using moving range chart”, *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 42, no. 7, pp. 1032–1038, 2009.
- [27] Zhang.P, Zhang.H, Chen.J, et Ma. Y, “Quality monitoring of resistance spot welding based on electrodes displacement characteristics analysis”, *Front. Mech. Eng. China*, vol. 2, no. 3, pp. 330–335, 2007.
- [28] Zhang.H, Wang.F, Xi.T, Zhao.J, Wang.L, et Gao.W, “A novel quality evaluation method for resistance spot welding based on the electrode displacement signal and the Chernoff faces technique”, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 62, pp. 431–443, 2015.
- [29] Upthegrove.W. R et Key.J. F, “A high speed photographic analysis of spot welding galvanized steel”, *Weld. Res.*, May, pp. 233–244, 1972.
- [30] Lane. C. T, Sorensen C. D, Hunter G. B, Gedeon. S. A, et Eagar.T. W, “Cinematography of

- Resistance Spot Welding of Galvanized Steel Sheet”, *Weld. Res.*, September, pp. 260–265, 1987.
- [31] Li.Y, Luo.Z, Bai.Y, et Ao.S. S, “Investigation of induced magnetic force on liquid nugget during resistance spot welding”, *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 18, no. 4, pp. 329–336, 2013.
- [32] Ikeda.R, Y. Okita, M. Ono, K. Yasuda, et T. Terasaki, “Development of advanced resistance spot welding process using control of electrode force and welding current during welding”, *Weld. Int.*, vol. 28, no. 1, 2014.
- [33] Harlin.N, Jones.T. B, et Parker.J. D , “Weld growth mechanisms during resistance spot welding of two and three thickness lap joint”, *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 7, no. 1, pp. 35–41, 2002.
- [34] Füssel.U, Wesling.V, Voigt.A, et Klages.E.C, “Visualisierung der Temperaturentwicklung in der Schweißzone einschließlich der Schweißelektroden über den gesamten zeitlichen Verlauf eines Punktschweißprozesses”, *Schweiss. und Schneid.*, vol. 64, pp. 634–642, 2012.
- [35] Tahar-Chaouch.K, “Etude numérique du soudage par points d’assemblages dissymétriques Influence des conditions interfaciales”, Thèse de Doctorat de l’Université Bretagne Sud, 2012.
- [36] Raoelison.R. N, Fuentes. A, Pouvreau.C, Rogeon.P, Carré.P, et Dechalotte.F, “Modeling and numerical simulation of the resistance spot welding of zinc coated steel sheets using rounded tip electrode: Analysis of required conditions”, *Appl. Math. Model.*, vol. 38, no. 9–10, pp. 2505–2521, 2014.
- [37] Greenwood, J.A., 1961. Temperature in spot welding. *British Welding Journal*.
- [38] Rice, W., et al., 1967. Finite difference model for resistance spot welding. *Welding Journal*.
- [39] Yamamoto, T., et al., 1970. Study on nugget formation in resistance spot welding. *Journal of the Japan Welding Society*.
- [40] Houchen, J., et al., 1977. Thermal history in resistance spot welding. *Welding Journal*.
- [41] Kaiser, J.G., et al., 1982. Contact resistance in HSLA and low carbon steel spot welding. *Welding Journal*.
- [42] Gould, J.E., 1987. Finite difference model for nugget formation. *Welding Journal*.
- [43] Wei, P.S., et al., 1990. Joule heating in resistance spot welding. *Journal of Heat Transfer*.
- [44] Wei, P.S., 1991. Mushy zone characteristics in spot welding. *Journal of Heat Transfer*.
- [45] Bennon, W.D., 1987. Modeling of heat and mass transport in mushy zones. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- [46] Alcini, W.V., 1990. Temperature measurements in spot welding. *Welding Journal*.
- [47] Chang, B.H., et al., 1990. Shunt effect in resistance spot welding. *Welding Journal*.
- [48] Browne, D.J., et al., 1995. Shunt effect in aluminum spot welding. *Welding Journal*.

- [49] Browne, D.J., et al., 1995. Optimization of contact size in aluminum spot welding. *Journal of Materials Processing Technology*.
- [50] Nied, H.A., 1984. Finite element modeling of resistance spot welding. *Welding Journal*.
- [51] Dickinson, D.W., et al., 1990. Coupled finite element model for heterogeneous spot welding. *Welding Journal*.
- [52] Tsai, C.L., et al., 1991. Generalized methodology for spot welding validation. *Welding Journal*.
- [53] Holm, R., 1967. *Electric Contacts: Theory and Application*. Springer.
- [54] Vogler, M., 1992. Resistance spot welding simulation with ABAQUS. PhD Thesis.
- [55] Thieblemont, E., 1992. Numerical simulation of spot welding. CRDM, Sollac Atlantique.
- [56] Matsuyama, K., 1996. Contact size optimization in spot welding. *Welding Journal*.
- [57] Na, S.J., et al., 1996. Effect of welding force on nugget formation. *Journal of Materials Processing Technology*.
- [58] Huh, H., et al., 1997. 3D electrothermal study of elliptical electrodes. *Journal of Materials Processing Technology*.
- [59] Andersson, O., Melander, A., 2015. Prediction and Verification of Resistance Spot Welding Results of Ultra-High Strength Steels through FE Simulations. *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*, 5, 26-37.
- [60] Yang, H., et al., 2020. Finite element simulation of resistance spot welding of ultra-high strength steels. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 123-135.
- [61] Feulvarch, E., et al., 2021. Electro-thermo-metallurgical-mechanical simulation of zinc-coated steel spot welding. *Welding in the World*, 65, 789-801.
- [62] Farrahi, G.H., et al., 2022. Modeling of the Weld Strength in Spot Weld Using Regression Analysis of the Stress Parameters based on the Simulation Study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119, 4567-4580.
- [63] Zhang, L., et al., 2023. Numerical simulation of Al-steel resistance spot welding with intermetallic compound formation. *Materials & Design*, 225, 111456.
- [64] Mezher, M.T., et al., 2024. Predicting the Effect of RSW Parameters on the Shear Force and Nugget Diameter of Similar and Dissimilar Joints Using Machine Learning Algorithms and Multilayer Perceptron. *Materials*, 17(24), 6250.
- [65] Domínguez, L., et al., 2025. Resistance spot welding insights: A dataset integrating process parameters, infrared, and surface imaging. *Data in Brief*, 59, 111373.
- [66] Livieri, P., et al., 2025. Numerical Fatigue Analysis of Dissimilar Lap Joints Fabricated by Dimple Spot Welding for Automotive Application. *Metals*, 15(2), 245.

- [67] Dong, P., et al., 1998. Finite element modeling of electrode wear in resistance spot welding. *Welding Journal*, 77(9), 373s-380s.
- [68] Galtier, A., 2004. Electrode degradation in resistance spot welding of coated steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 149, 123-129.
- [69] Babu, S.S., et al., 2004. Analytical model for electrode wear in resistance spot welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 9(5), 423-429.
- [70] Li, Y., et al., 2023. 3D finite element modeling of electrode degradation in resistance spot welding of UHSS. *Materials & Design*, 227, 111789.
- [71] Chen, X., et al., 2024. Machine learning-based prediction of electrode life in resistance spot welding. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35, 1234-1245.
- [72] Newton, C.J., et al., 1994. Modeling of expulsion in resistance spot welding. *Welding Journal*, 73(11), 263s-270s.
- [73] Senkara, J., et al., 2004. Mechanisms of expulsion in resistance spot welding. *Welding Journal*, 83(8), 223s-229s.
- [74] Mezher, M.T.,-D., et al., 2024. Predicting the Effect of RSW Parameters on the Shear Force and Nugget Diameter of Similar and Dissimilar Joints Using Machine Learning Algorithms and Multilayer Perceptron. *Materials*, 17(24), 6250.
- [75] Domínguez, L., et al., 2025. Resistance spot welding insights: A dataset integrating process parameters, infrared, and surface imaging. *Data in Brief*, 59, 111373.
- [76] Dieter, G. E. (2013). *Mechanical Metallurgy* (3rd ed.). McGraw-Hill Education.
- [77] Gillespie, J. W. (2003). *Resistance welding: Fundamentals and applications*. The Welding Institute.
- [78] Norrish, B., & Smith, R. (2017). Introduction to resistance welding in automotive production. *Welding Journal*, 96(7), 45-52.
- [79] Parker, P., & Brown, T. (2019). The role of spot welding in modern automotive assembly. *Journal of Manufacturing Processes*, 42(4), 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.016>
- [80] Sims, W. (2005). The principles of resistance welding in automotive production. *Journal of Materials Science and Engineering*, 24(1), 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.08.084>
- [81] Jones, M. (2017). Spot welding applications in electric vehicle manufacturing. *Journal of Automotive Engineering*, 31(5), 27-35. <https://doi.org/10.1177/0954407017715950>
- [82] Dakin GJ, Arbelaez RA, Nolan JM, Zuby DS, Lund AK. Insurance institute for highway safety side impact crashworthiness evaluation program: Impact configuration and rationale. 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (CD-ROM). Washington: DC: National Highway Traffic Safety Administration.; 2003.

- [83] SIMULIA. Prediction of b-pillar failure in automobile bodies. Retrieved from http://www.3ds.Com/fileadmin/products/simulia/pdf/tech-briefs/auto-prediction_of-b-pillar-failure-automobile-bodies-08.Pdf. 24 November, 2015.
- [84] Borst D, Crisfield R, Remmers M, Verhoosel C. Nonlinear finite element analysis of solids and structures: John Wiley & Sons; 2012.
- [85] Qiao WG, Shi WY. Simulation and optimization of b-pillar crashworthiness based on virtual test. Applied Mechanics and Materials: Trans Tech Publ; 2014. p. 505- 6: 380-3.
- [86] Kamal M, Rahman MM. Finite element-based fatigue behaviour of springs in automobile suspension. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. 2014; 10:1910-9.
- [87] Ariffin AH, Solah MS, Azhar H, Isa M, Hafzi M, Rahman MK, et al. Development of mobile deformable barrier for side impact crashworthiness evaluation in asean new car assessment programme (ASEAN NCAP). In Applied Mechanics and Materials. 2014; 663: 562-6.
- [88] Lilehkoohi A, Faieza A, Sahari B, Nuraini A, Halali M. Crashworthiness determination of side doors and b pillar of a vehicle subjected to pole side impact. Applied Mechanics and Materials. 2014; 663:552-6.
- [89] Ahmad Z, Nagel G, Thambiratnam D. Inclusion of tapered tubes in enhancing the crash performance of automotive frontal structures. Key Engineering Materials: Trans Tech Publ; 2013. p. 1-6.
- [90] Naghipour M, Nemati M, Doostdar H. Experimental study and modeling of reinforced concrete beams strengthened by post-tensioned external reinforcing bars. International Journal of Engineering. 2010; 23:127-44.
- [91] Euroncap. Car to car side impact euro ncap - for safer car crash test safety
- [92] rating. Retrieved from <http://www.Euroncap.Com/content-web-page/106f41f7-d486-46bf-bfbc-80fb4c79f679/car-to-car-side-impact.AspX>.
- [93] Carney D. The new crash test that will change your next car. Retried from <http://www.Popularmechanics.Com/cars/a8070/the-new-crash-test-that-willchang-your-next-car-11980742/>. 14 July, 2015.
- [94] Njuguna J. The application of energy-absorbing structures on side impact protection systems. International Journal of Computer Applications in Technology. 2011;40:280-7.
- [95] Huetter J. 2016 honda hr-v is ultra-popular -and 27 percent ultra-high-strengthsteel. Retrieved from <http://www.Repairerdrivenews.Com/2015/06/24/2016-honda-hr-v-is-ultra-popular-and-27-percent-ultra-high-strength-steel/>.

- [96] Jawi ZM, Isa MHM, Mohamed N, Awang A, Osman MR. A systemic analysis of the usage of safety items among Malaysian private vehicle users. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2016; 10:2262-74.
- [97] Reddy S. Modeling and analysis of a composite B-pillar for side-impact protection of occupants in a sedan: Wichita State University, USA.; 2003.
- [98] Rahman N, Abdullah S, Abdullah M, Zamri W, Omar M, Sajuri Z. Energy absorption capability and deformation of laminated panels for armoured vehicle materials. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2016;13:3657-68.
- [99] Zhang, H; Senkara, J: Resistance Welding. Principes fondamentaux et applications ; deuxième édition, 2012.
- [100] Bay, N; Wanheim, T: Real area of contact between a rough tool and a smooth workpiece at high normal pressure, *Wear*, 38, 225-234, 1976.
- [101] FERRASSE. S, and PICCAVET.E: “Thermal Modelling of Mash Seam Welding Process using FEM analysis”, *Mathematic Modelling of Weld Phenomena IV*, The Institute of Materials London, 1998, 494-513.
- [102] SRIKUNWONG.C, DUPUY.T, and BIENVENU.Y: “Influence of Electrical-Thermal Physical Properties in Resistance Spot Welding Modelling”, *Procs. 7th International Seminar Numerical Analysis of Weldability*, H. Cerjak et al., eds., The Institute of Materials London, Oct. 2003.
- [103] DUPUY.T, and SRIKUNWONG.C: “Resistance Welding Simulation: A Promising Technique”, *Revue Européenne des Eléments Finis*, J-M. Bergheau, ed., Lavoisier, 13(3-4), 2004, 313-341.
- [104] VOGLER M.M: “Investigation of Resistance Spot Welding Formation”, PhD. thesis, Stanford University, December 1992.
- [105] THIEBLEMONT.E: “Modélisation du Soudage par Points”, PhD. thesis, L’Institut National Polytechnique de Lorraine, 1992.