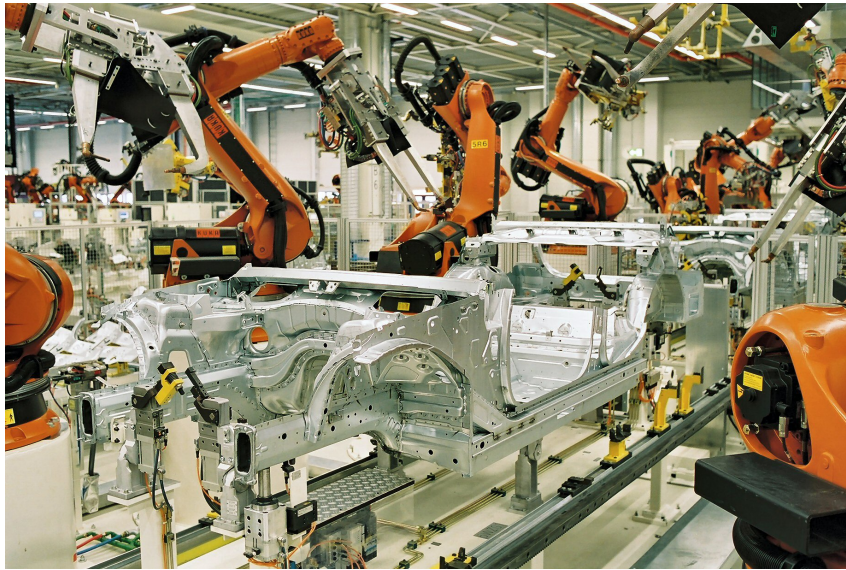


# SPOT WELDING PRO

Formations Professionnelles en Soudage



## Soudeuse à Points Expert

*Métallurgie avancée, automatisation et certification*

**Par Kangy Ham**

Ingénieur Procédés · Expert Batteries Lithium

**Niveau 3** · Expert · ~200 pages

© 2025 Spot Welding Pro. Tous droits réservés.

## **Soudeuse à Points — Expert**

© 2025 Spot Welding Pro — Tous droits réservés.

Prérequis : Formations Niveau 1 et 2 complétées  
Expérience pratique recommandée : 6+ mois

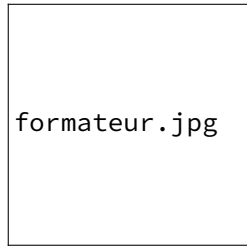
# Table des matières

<b>Le Mot du Formateur</b>	<b>3</b>
<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>1 Métallurgie Avancée</b>	<b>7</b>
1.1 Transformations de phase	7
1.1.1 Cycle thermique	7
1.1.2 Zones métallurgiques	8
1.2 Aciers avancés à haute résistance (AHSS)	8
1.2.1 Classification des aciers automobiles	9
1.2.2 Défis du soudage des AHSS	9
1.2.3 Profils de dureté caractéristiques	10
1.3 Analyse microstructurale	10
1.3.1 Techniques d'observation	10
1.3.2 Préparation des échantillons	10
<b>2 Simulation et Modélisation</b>	<b>12</b>
2.1 Modèles physiques	12
2.1.1 Couplage électro-thermique	12
2.1.2 Résistance de contact	12
2.2 Simulation numérique	13
2.2.1 Logiciels spécialisés	13
2.2.2 Résultats typiques d'une simulation	13
2.3 Modèles empiriques	14
2.3.1 Diamètre du noyau (règle des 5)	14
2.3.2 Diamètre d'électrode	14
2.3.3 Force d'électrode	14
<b>3 Automatisation et Robotique</b>	<b>15</b>
3.1 L'évolution vers l'automatisation	15
3.2 Types d'automatisation	16
3.2.1 Semi-automatique	16
3.2.2 Automatique dédié	16
3.2.3 Robotisé flexible	16
3.3 Conception d'une cellule robotisée	16

3.3.1	Composants principaux	17
3.3.2	Le robot	17
3.3.3	La pince de soudage	17
3.3.4	Le transformateur MFDC	18
3.4	Optimisation des temps de cycle	18
3.5	Contrôle qualité automatisé	18
3.5.1	Monitoring en temps réel	18
3.5.2	Contrôle adaptatif	19
<b>4</b>	<b>Normes et Certifications</b>	<b>20</b>
4.1	Normes internationales	20
4.1.1	Classification du procédé	20
4.1.2	Exigences ISO 14373	20
4.2	Normes automobiles	21
4.2.1	CQI-15 : Exigences spécifiques soudage	21
4.3	Certification du personnel	22
4.3.1	Niveaux de qualification	22
4.4	Système qualité	22
4.4.1	Documentation requise	22
<b>5</b>	<b>Études de Cas Industrielles</b>	<b>24</b>
5.1	Cas 1 : Pack batterie véhicule électrique	24
5.2	Cas 2 : Carrosserie automobile	25
5.3	Cas 3 : Optimisation de production	26
5.4	Cas 4 : Problème de collage d'électrodes	27
5.5	Cas 5 : Mise en conformité CQI-15	28
<b>A</b>	<b>Ressources Complémentaires</b>	<b>30</b>
A.1	Bibliographie recommandée	30
A.2	Logiciels de simulation	30
A.3	Organismes et certifications	30
<b>B</b>	<b>Glossaire Expert</b>	<b>31</b>
<b>C</b>	<b>Checklist Expert</b>	<b>32</b>
C.1	Checklist audit CQI-15	32

# Le Mot du Formateur

Bienvenue dans ce niveau Expert. Si vous êtes arrivé jusqu'ici, c'est que vous avez une vraie passion pour ce métier. Cette formation représente l'aboutissement de plus de 15 ans d'expérience dans l'industrie automobile et des batteries.



formateur.jpg

## Mon parcours vers l'expertise

J'ai commencé ma carrière comme technicien de production chez un équipementier automobile. Ma première mission ? Résoudre un problème de fissuration sur des points de soudure en acier DP600. Trois mois d'investigation, des centaines de coupes métallographiques, des nuits à analyser des courbes de résistance dynamique... C'est là que j'ai compris que le soudage par points était bien plus qu'un simple « appui sur le bouton ».

Depuis, j'ai eu la chance de travailler avec des ingénieurs de BMW, Tesla, et BYD sur des projets de pointe. Chaque projet m'a apporté de nouvelles perspectives sur ce procédé fascinant.

## Ce qui fait un expert

Un expert n'est pas quelqu'un qui sait tout — c'est quelqu'un qui sait :

- Poser les bonnes questions face à un problème
- Utiliser les bons outils d'analyse
- Tirer des conclusions valides des données
- Communiquer efficacement avec toutes les parties prenantes
- Continuer à apprendre, toujours

## Ce que vous allez maîtriser

Dans cette formation, nous allons explorer ensemble :

- La métallurgie avancée — comprendre ce qui se passe à l'échelle microscopique
- La simulation numérique — prédire avant d'expérimenter

- L'automatisation robotique — l'état de l'art industriel
- Les normes et certifications — parler le langage de la qualité
- Des études de cas réelles — apprendre des succès et des échecs

Prêt à devenir un expert? Allons-y!

*Kangy Ham*

# Introduction

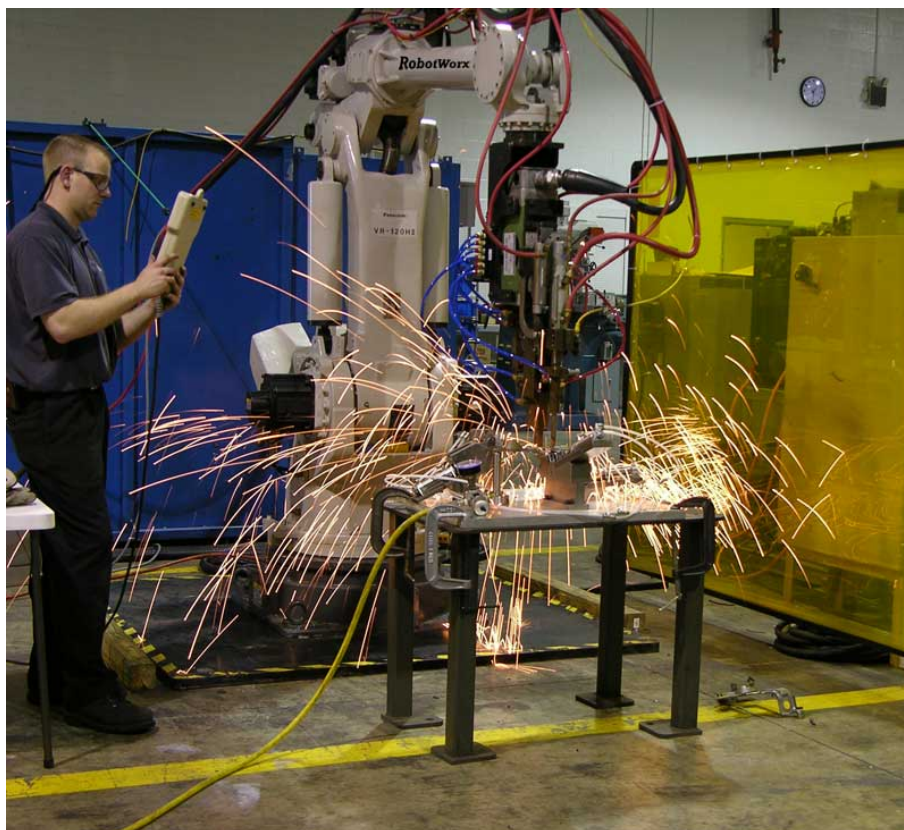
Bienvenue dans la formation Expert. Ce niveau s'adresse aux professionnels qui souhaitent atteindre l'excellence dans le domaine du soudage par points.

## Ce que vous allez apprendre

### © Objectifs du chapitre

- Comprendre la métallurgie avancée du soudage par résistance
- Maîtriser la simulation et la modélisation
- Concevoir et mettre en œuvre des systèmes automatisés
- Naviguer dans les normes et certifications industrielles
- Analyser des études de cas industrielles réelles
- Résoudre les problèmes les plus complexes





**FIGURE 1 :** Robot de soudage industriel moderne — la robotisation a révolutionné la production automobile

# Chapitre 1

## Métallurgie Avancée

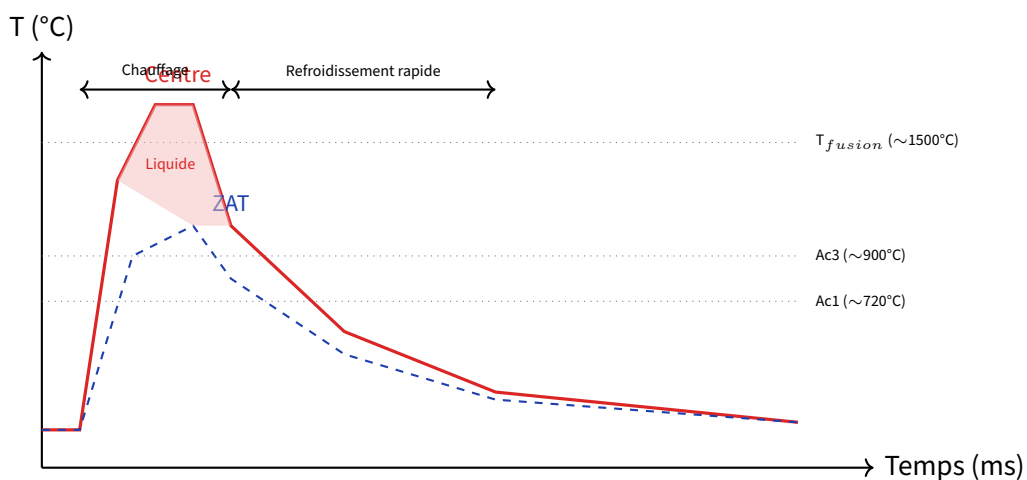
### 🎯 Objectifs du chapitre

- Comprendre les transformations métallurgiques pendant le soudage
- Analyser la microstructure des soudures
- Prédire et contrôler les propriétés mécaniques
- Maîtriser les défis des aciers modernes

### 1.1 Transformations de phase

Pendant le soudage par points, le métal subit des transformations complexes en quelques millisecondes. Comprendre ces transformations est essentiel pour maîtriser le procédé.

#### 1.1.1 Cycle thermique



**FIGURE 1.1 :** Cycle thermique typique au centre d'un point de soudure et en ZAT

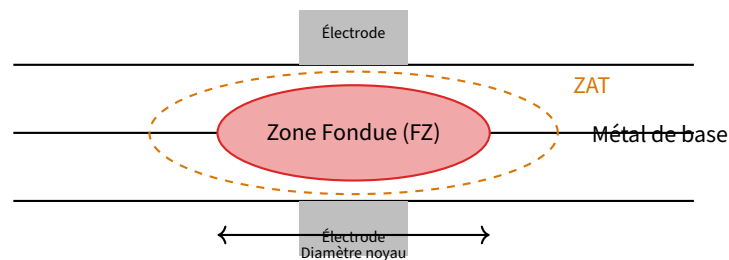
Le cycle thermique se caractérise par :

- **Vitesse de chauffage** : jusqu'à  $100\,000\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  au centre
- **Température maximale** :  $1500\text{--}1800^{\circ}\text{C}$  (fusion de l'acier)

- **Temps à haute température** : quelques millisecondes
- **Vitesse de refroidissement** : 1000-10 000 °C/s

Ces vitesses extrêmes créent des microstructures qu'on ne peut pas obtenir par d'autres procédés.

### 1.1.2 Zones métallurgiques



**FIGURE 1.2 :** Coupe schématique d'un point de soudure montrant les différentes zones

**Zone fondue (FZ)** Métal liquéfié puis solidifié. Structure de solidification dendritique orientée vers le centre. Composition homogénéisée par convection.

**Zone affectée thermiquement (ZAT)** Métal resté solide mais ayant subi des transformations de phase. Divisée en sous-zones :

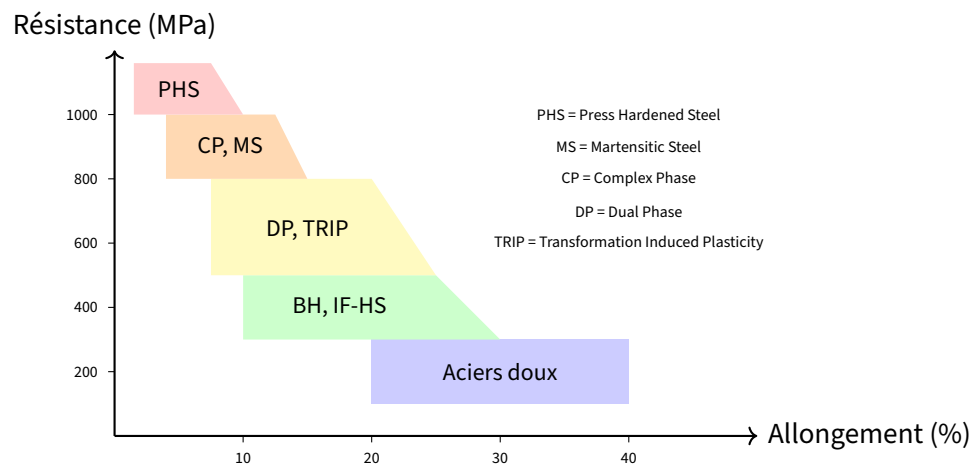
- ZAT à gros grains (près de la fusion)
- ZAT à grains fins (température intermédiaire)
- ZAT intercritique (entre Ac1 et Ac3)
- ZAT sous-critique (en dessous de Ac1)

**Zone de transition** Interface entre ZAT et métal de base. Gradient de propriétés. Zone souvent critique pour les ruptures.

**Métal de base (MB)** Non affecté thermiquement. Propriétés d'origine conservées.

## 1.2 Aciers avancés à haute résistance (AHSS)

### 1.2.1 Classification des aciers automobiles



**FIGURE 1.3 :** Diagramme résistance-allongement des aciers automobiles (« banana diagram »)

### 1.2.2 Défis du soudage des AHSS

#### Adoucissement de la ZAT

Les aciers AHSS subissent un **adoucissement** dans la ZAT en raison du revenu de la martensite. La dureté peut chuter de 30 à 50% dans cette zone, créant un point faible potentiel pour la fatigue.

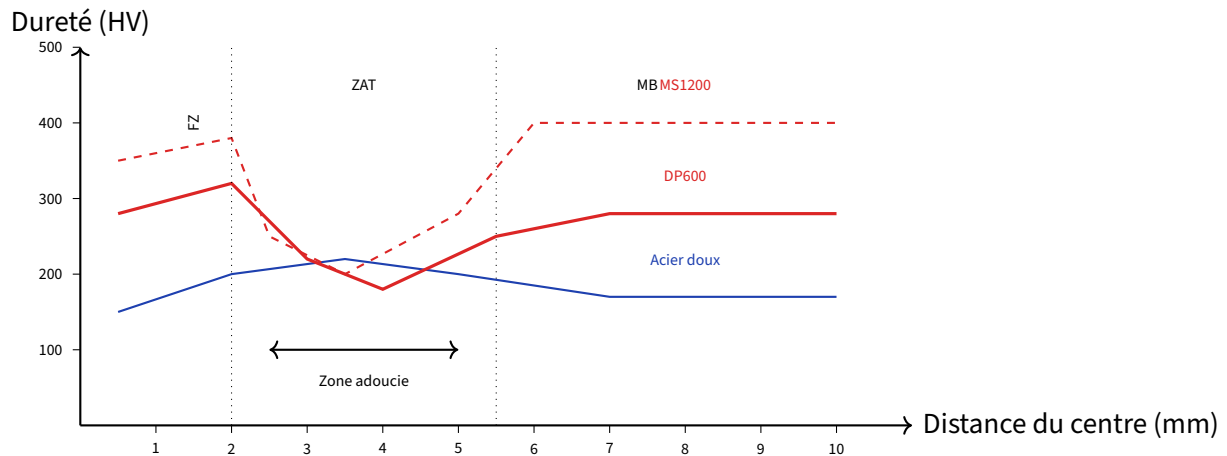
Ce phénomène est particulièrement critique pour :

- Aciers DP (Dual Phase) : 590, 780, 980 MPa
- Aciers martensitiques : MS1200, MS1500
- Aciers PHS (Press Hardened Steel) : 22MnB5

#### Solutions pour limiter l'adoucissement :

1. **Optimiser le cycle thermique** : temps court, courant élevé → ZAT étroite
2. **Séquences multi-pulse** : pulse de recuit pour réduire les gradients
3. **Conception adaptée** : éviter les sollicitations dans la ZAT
4. **Post-traitement** : traitement thermique localisé (rare)

### 1.2.3 Profils de dureté caractéristiques



**FIGURE 1.4 :** Profils de dureté comparés — l'adoucissement est marqué pour les AHSS

## 1.3 Analyse microstructurale

### 1.3.1 Techniques d'observation

Technique	Information	Résolution	Coût
Microscopie optique	Microstructure générale	~1 $\mu\text{m}$	Faible
MEB (électrons)	Détails fins, fracture	~10 nm	Moyen
EBSD	Orientation des grains	~50 nm	Élevé
Micro-dureté	Profil de dureté	Zone 50 $\mu\text{m}$	Faible
EDS/WDS	Composition chimique	~1 $\mu\text{m}$	Moyen

**TABLE 1.1 :** Techniques d'analyse microstructurale

### 1.3.2 Préparation des échantillons

1. **Découpe** : Scie diamantée sous eau, éviter l'échauffement
2. **Enrobage** : Résine époxy ou acrylique
3. **Polissage** : Papiers SiC (120  $\rightarrow$  2400), puis pâte diamantée (6  $\mu\text{m}$   $\rightarrow$  1  $\mu\text{m}$ )
4. **Attaque chimique** : Nital 2% (aciers au carbone), Kalling (inox)
5. **Observation** : Microscopie optique, puis MEB si nécessaire

**🕒 Conseil pratique**

Pour une analyse métallographique de qualité, le polissage est l'étape critique. Prenez le temps de polir correctement — un polissage bâclé donnera des images inexploitable. Changez de direction de polissage entre chaque grade de papier.

**💡 Points clés à retenir**

- Le soudage crée des zones à propriétés différentes (FZ, ZAT, MB)
- Les aciers AHSS peuvent s'adoucir de 30-50% dans la ZAT
- L'analyse microstructurale permet de comprendre et optimiser
- Chaque matériau nécessite une approche métallurgique adaptée
- Les profils de dureté sont essentiels pour caractériser la soudure

## Chapitre 2

# Simulation et Modélisation

### 🎯 Objectifs du chapitre

- Comprendre les modèles physiques du soudage par points
- Utiliser la simulation pour optimiser les paramètres
- Prédire les résultats avant expérimentation
- Interpréter les résultats de simulation

## 2.1 Modèles physiques

Le soudage par points implique des phénomènes couplés multi-physiques :

### 2.1.1 Couplage électro-thermique

L'équation de la chaleur avec source Joule :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \frac{J^2}{\sigma} \quad (2.1)$$

Où :

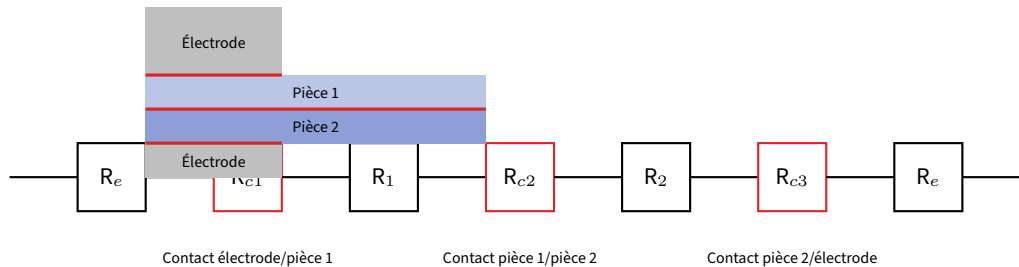
- $\rho c_p$  : capacité thermique volumique (J/m<sup>3</sup>·K)
- $k$  : conductivité thermique (W/m·K)
- $J$  : densité de courant (A/m<sup>2</sup>)
- $\sigma$  : conductivité électrique (S/m)
- Le terme  $J^2/\sigma$  représente l'effet Joule (W/m<sup>3</sup>)

### 2.1.2 Résistance de contact

La résistance de contact est le paramètre le plus difficile à modéliser car elle dépend de nombreux facteurs :

$$R_c = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \cdot \frac{H}{F} \cdot f(T, \text{rugosité, revêtement}) \quad (2.2)$$

Où  $H$  est la dureté et  $F$  la force appliquée.



**FIGURE 2.1 :** Schéma des résistances en série — les résistances de contact (en rouge) dominent au début

## 2.2 Simulation numérique

### 2.2.1 Logiciels spécialisés

Logiciel	Points forts	Éditeur
SORPAS	Spécialisé RSW, base de données matériaux	SWANTEC (Danemark)
SYSWELD	Suite complète soudage, couplage métallurgique	ESI Group (France)
Simufact Welding	Interface intuitive, intégration CAO	Hexagon (Suède)
ABAQUS + plugins	Flexibilité, personnalisation	Dassault Systèmes

**TABLE 2.1 :** Principaux logiciels de simulation du soudage par points

### 2.2.2 Résultats typiques d'une simulation

Une simulation fournit des informations précieuses :

- **Champ de température :** évolution  $T(x,y,z,t)$
- **Géométrie de la zone fondue :** diamètre, pénétration
- **Contraintes résiduelles :** distribution après refroidissement
- **Déformations :** retrait, distorsion
- **Prédiction de défauts :** risque d'expulsion, fissuration



**i Gain de temps**

Une campagne de simulation typique (100 combinaisons de paramètres) prend quelques heures de calcul, contre plusieurs jours d'expérimentation physique. Le gain en temps et matière est considérable, surtout pour les aciers coûteux ou les configurations complexes.

## 2.3 Modèles empiriques

Pour une utilisation quotidienne, des formules empiriques sont utiles :

### 2.3.1 Diamètre du noyau (règle des 5)

$$d_n \approx 5\sqrt{t_{min}} \quad (2.3)$$

Où  $t_{min}$  est l'épaisseur minimale des pièces (en mm) et  $d_n$  le diamètre du noyau recommandé (en mm).

**Exemple :** Pour deux tôles de 1.2 mm,  $d_n \approx 5 \times \sqrt{1.2} \approx 5.5$  mm

### 2.3.2 Diamètre d'électrode

$$d_e \approx 6\sqrt{t_{min}} \quad (\text{valeur nominale}) \quad (2.4)$$

### 2.3.3 Force d'électrode

$$F \approx (2 \text{ à } 5) \times d_e^2 \quad (\text{en daN, avec } d_e \text{ en mm}) \quad (2.5)$$

**? Points clés à retenir**

- La simulation permet d'optimiser sans essais coûteux
- Les modèles couplent thermique, électrique et mécanique
- La résistance de contact est le paramètre le plus critique
- Des formules empiriques guident les premiers choix
- La validation expérimentale reste toujours nécessaire

## Chapitre 3

# Automatisation et Robotique

### ◎ Objectifs du chapitre

- Concevoir des systèmes de soudage automatisés
- Intégrer des robots de soudage par points
- Optimiser les temps de cycle
- Mettre en place le contrôle qualité automatisé

### 3.1 L'évolution vers l'automatisation

L'industrie automobile a été pionnière dans l'automatisation du soudage par points. Aujourd'hui, une voiture moderne contient entre 3000 et 5000 points de soudure, pratiquement tous réalisés par des robots.



**FIGURE 3.1 :** Usine Willow Run (1943) — déjà à l'époque, l'industrie cherchait à automatiser le soudage pour augmenter la cadence de production

## 3.2 Types d'automatisation

### 3.2.1 Semi-automatique

- Positionnement manuel, soudage automatique
- Opérateur gère le chargement/déchargement
- Adapté aux petites et moyennes séries
- Investissement modéré (10-50 k€)

### 3.2.2 Automatique dédié

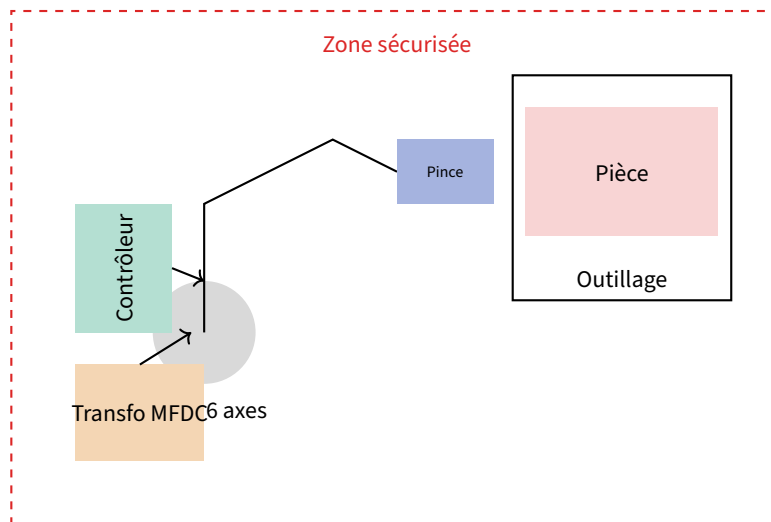
- Machine spéciale pour un produit unique
- Temps de cycle optimisé (0.5-1 s par point)
- Grande série, produit stable
- Investissement élevé (100-500 k€)

### 3.2.3 Robotisé flexible

- Robot 6 axes avec pince de soudage
- Flexibilité : plusieurs produits sur même ligne
- Reprogrammable rapidement
- Standard automobile actuel
- Investissement : 150-300 k€ par robot équipé

## 3.3 Conception d'une cellule robotisée

### 3.3.1 Composants principaux



**FIGURE 3.2 :** Architecture typique d'une cellule de soudage robotisée

### 3.3.2 Le robot

Caractéristiques typiques pour le soudage par points :

Caractéristique	Valeur typique
Nombre d'axes	6 (standard) ou 7 (extended reach)
Charge utile	150-250 kg (pince + transfo)
Portée	2.5-3 m
Répétabilité	$\pm 0.1$ mm
Vitesse max	2000 mm/s
Marques courantes	FANUC, ABB, KUKA, Yaskawa

**TABLE 3.1 :** Caractéristiques robot pour soudage par points

### 3.3.3 La pince de soudage

Deux types principaux :

**Pince en C** Accès latéral, très répandue. Effort de réaction déporté.

**Pince en X** Effort équilibré, plus compacte. Accès plus limité.

### 3.3.4 Le transformateur MFDC

#### MFDC — Medium Frequency Direct Current

Les transformateurs MFDC fonctionnent à 1000-2000 Hz (vs 50 Hz pour les anciens). Avantages :

- Poids réduit de 70% → pince plus légère → robot plus rapide
- Contrôle plus précis du courant
- Meilleur rendement énergétique
- Standard actuel dans l'automobile

## 3.4 Optimisation des temps de cycle

Pour minimiser le temps de cycle :

1. **Optimisation des trajectoires** : algorithmes TSP (voyageur de commerce)
2. **Regroupement par zone** : minimiser les grands déplacements
3. **Mouvements fluides** : interpolation spline vs point-à-point
4. **Overlap** : démarrer le déplacement avant fin de soudage
5. **Multi-robot** : répartir les points entre robots

#### i Temps de cycle typique

Un robot moderne réalise un point de soudure toutes les **1 à 2 secondes**, incluant :

- Déplacement vers le point : 0.4-0.8 s
- Fermeture pince (accostage) : 0.1-0.2 s
- Soudage (pulse) : 0.1-0.3 s
- Ouverture et dégagement : 0.1-0.2 s

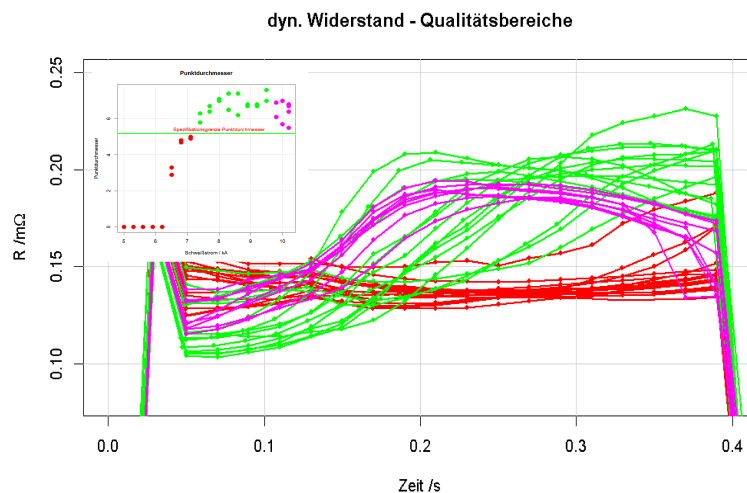
L'optimisation des trajectoires peut réduire ce temps de 10 à 20%.

## 3.5 Contrôle qualité automatisé

### 3.5.1 Monitoring en temps réel

Les systèmes modernes mesurent à chaque point :

- **Courbe de courant  $I(t)$**  : détection de court-circuit, expulsion
- **Résistance dynamique  $R(t)$**  : signature de la formation du noyau
- **Déplacement des électrodes  $d(t)$**  : indentation, expansion thermique
- **Énergie réellement délivrée** : intégrale  $I^2t$



**FIGURE 3.3 :** Courbe de résistance dynamique — signature caractéristique d’une bonne soudure

### 3.5.2 Contrôle adaptatif

Le contrôleur ajuste automatiquement les paramètres en fonction des mesures :

1. Mesure de la résistance initiale (indicateur d’état de surface)
2. Comparaison à la référence
3. Ajustement du courant ou du temps
4. Compensation de l’usure des électrodes
5. Alerte si hors limites

#### 🔑 Points clés à retenir

- L’automatisation augmente productivité et répétabilité
- Les robots offrent flexibilité et qualité constante
- Les transformateurs MFDC sont le standard actuel
- L’optimisation des trajectoires réduit les temps de cycle
- Le monitoring en temps réel permet le contrôle adaptatif

## Chapitre 4

# Normes et Certifications

### 🎯 Objectifs du chapitre

- Connaître les normes applicables au soudage par points
- Comprendre les exigences de certification
- Mettre en place un système qualité conforme
- Naviguer dans les référentiels automobiles

## 4.1 Normes internationales

### 4.1.1 Classification du procédé

Norme	Désignation	Description
ISO 4063	Procédé 21	Classification des procédés de soudage
AWS A3.0	RSW	Resistance Spot Welding
ISO 14373	–	Spécification du procédé RSW
ISO 18278-1	–	Soudabilité — Partie 1 : Généralités
ISO 18278-2	–	Soudabilité — Partie 2 : Aciers
ISO 14327	–	Essai de pelage par arrachement

**TABLE 4.1 :** Principales normes pour le soudage par points

### 4.1.2 Exigences ISO 14373

Cette norme spécifie les exigences pour le soudage par points :

- **Qualification du mode opératoire (QMOS) :** démontrer que les paramètres choisis produisent des soudures conformes
- **Qualification des opérateurs :** formation et certification
- **Exigences sur les équipements :** étalonnage, maintenance

- **Contrôles à effectuer** : fréquences, méthodes, critères
- **Documentation requise** : traçabilité complète

## 4.2 Normes automobiles

L'industrie automobile a ses propres standards, souvent plus stricts que les normes ISO :

Région	Organismes/Normes	Constructeurs
Allemagne	VDA, BMW GS, VW TL	VW, BMW, Daimler, Audi
USA	AIAG, CQI-15	GM, Ford, Chrysler
Japon	JAMA, JIS	Toyota, Honda, Nissan
Corée	KS standards	Hyundai, Kia

**TABLE 4.2 :** Standards régionaux automobiles

### ▼ Exigences automobiles

Les constructeurs automobiles imposent des exigences très strictes :

- **Cpk > 1.67** sur le diamètre du noyau (capabilité procédé)
- **Contrôle 100%** par monitoring temps réel
- **Traçabilité complète** de chaque point (VIN, position, paramètres)
- **Audit régulier** des fournisseurs (CQI-15 pour l'Amérique du Nord)
- **PPAP** (Production Part Approval Process) obligatoire

### 4.2.1 CQI-15 : Exigences spécifiques soudage

Le CQI-15 (Special Process : Welding System Assessment) est le référentiel AIAG pour le soudage :

1. **Section 1** : Gestion et responsabilités
2. **Section 2** : Planification qualité avancée
3. **Section 3** : Installation et équipements
4. **Section 4** : Gestion des processus
5. **Section 5** : Actions correctives et amélioration continue
6. **Job Audit** : Vérification de conformité par produit



## 4.3 Certification du personnel

### 4.3.1 Niveaux de qualification

Niveau	Responsabilités	Formation requise
Opérateur	Exécution, contrôle visuel, maintenance de base	Formation initiale (40h) + pratique supervisée
Régleur	Paramétrage, dépannage niveau 1, changement d'outillage	Formation technique (80h) + expérience
Spécialiste	Développement, qualification, résolution de problèmes complexes	Expertise métallurgie + procédé (160h+)
Ingénieur RSW	Conception, innovation, support multi-sites	Formation supérieure + certifications

**TABLE 4.3 :** Niveaux de qualification en soudage par points

## 4.4 Système qualité

### 4.4.1 Documentation requise

1. **DMOS** (WPS) : Descriptif du Mode Opératoire de Soudage
  - Configuration matériaux, épaisseurs
  - Paramètres de soudage (I, t, F)
  - Type d'électrodes, géométrie
  - Séquence de soudage
2. **QMOS** (WPQR) : Qualification du Mode Opératoire de Soudage
  - Essais de qualification (pelage, cisaillement, métallographie)
  - Résultats et conformité aux critères
  - Domaine de validité
3. **Instructions de travail** : pour chaque poste
4. **Plan de contrôle** : fréquences et méthodes
5. **Enregistrements** : traçabilité des paramètres

**🔑 Points clés à retenir**

- ISO 4063 classe le procédé (n°21)
- ISO 14373 et 18278 définissent les exigences générales
- L'automobile impose des standards plus stricts (CQI-15)
- La qualification du personnel est obligatoire
- Un système documentaire complet (DMOS, QMOS) est requis
- $Cpk > 1.67$  est l'exigence standard automobile

# Chapitre 5

## Études de Cas Industrielles

### 🎯 Objectifs du chapitre

- Analyser des problèmes industriels réels
- Appliquer les connaissances acquises
- Développer une approche systématique de résolution
- Apprendre des succès et des échecs

### 5.1 Cas 1 : Pack batterie véhicule électrique

#### 🔍 Étude de cas : Assemblage d'un pack 96S2P — Tesla Powerwall

**Contexte :** Fabrication de packs batteries pour systèmes de stockage domestique. 192 cellules 21700 assemblées en configuration 96S2P (345V nominal, 13.5 kWh).

**Problématique initiale :** Taux de défaut de 3.2% (objectif < 0.5%). Cellules endommagées thermiquement détectées lors des tests finaux d'isolation.

#### **Investigation :**

- Monitoring température par caméra IR : pics à 68°C sur certaines cellules
- Analyse de la séquence : points consécutifs sur même cellule (4 points en 8 secondes)
- Mesure de la température de surface : +45°C après le 4ème point
- Autopsie de cellules défaillantes : dégradation visible du séparateur

#### **Analyse des causes racines (5 pourquoi) :**

1. Pourquoi les cellules sont endommagées ? → Température excessive
2. Pourquoi température excessive ? → Accumulation de chaleur
3. Pourquoi accumulation ? → Points trop rapprochés dans le temps
4. Pourquoi séquence non optimisée ? → Trajectoire robot optimisée pour vitesse, pas pour thermique
5. Pourquoi pas de simulation thermique ? → Non requis dans le cahier des charges initial

**Actions correctives :**

1. Modification de la séquence : alternance entre cellules (leap-frog pattern)
2. Temps inter-points minimum : 5 secondes par cellule
3. Réduction de l'énergie par point : 45 J → 38 J (avec validation mécanique)
4. Installation de monitoring IR en production
5. Alarme si  $T > 55^{\circ}\text{C}$

**Résultat :** Taux de défaut réduit à 0.15% après 3 mois de production.

**Coût de la non-qualité initiale :**  $3.2\% \times 50 \text{ packs/jour} \times 2500\text{€/pack} = 4000\text{€/jour}$

**ROI des actions correctives :** < 2 semaines

## 5.2 Cas 2 : Carrosserie automobile

### 🔍 Étude de cas : Fissuration ZAT sur acier DP600 — BMW Série 3

**Contexte :** Assemblage de longerons en acier Dual Phase 600 MPa. Apparition de fissures en service après 50 000 km sur véhicules clients.

**Problématique :** 12 cas de fissures initiées dans la ZAT des points de soudure en 6 mois. Mode de rupture par fatigue. Rappel de 15 000 véhicules envisagé.

**Investigation approfondie :**

- Métallographie : zone adoucie marquée (180 HV vs 250 HV base)
- Mesure de contraintes résiduelles par DRX : 280 MPa en traction dans la ZAT
- Simulation fatigue : durée de vie prédite 40 000 cycles vs 100 000 requis
- Analyse vibratoire : fréquence de résonance du montant proche de l'excitation moteur

**Analyse :**

- La zone adoucie de la ZAT concentre les contraintes
- Les contraintes résiduelles s'ajoutent aux contraintes de service
- La résonance amplifie les cycles de fatigue

**Actions correctives multi-niveaux :**

1. **Procédé :** Cycle thermique optimisé (8 ms au lieu de 14 ms, courant +15%)
2. **Post-traitement :** Introduction d'un pulse de recuit (30% I, 100 ms) → réduction des contraintes résiduelles de 40%
3. **Conception :** Augmentation du nombre de points (8 → 12) → réduction de la contrainte unitaire
4. **Renforcement :** Ajout d'un raidisseur local (modification outillage)

**Validation :**

- Tests de fatigue accélérés : 200 000 cycles sans défaillance
- Validation véhicule complet : 300 000 km équivalent client
- Cpk sur dureté ZAT : 1.89 (vs 0.87 avant)

**Résultat :** Rappel évité. Coût des modifications : 1.2 M€ vs coût du rappel estimé : 45 M€

### 5.3 Cas 3 : Optimisation de production

#### Q Étude de cas : Réduction du temps de cycle — Éviers inox

**Contexte :** Ligne de production d'éviers en acier inoxydable 304. 48 points par pièce. Temps de cycle actuel : 72 secondes. Demande client en hausse de 40%.

**Objectif :** Réduire le temps de cycle à 50 secondes sans investissement majeur.

**Analyse du temps de cycle actuel :**

- Temps de soudage effectif : 29 s (40%)
- Déplacements robot : 25 s (35%)
- Attentes (recharge, maintien) : 18 s (25%)

**Identification des gisements d'amélioration :**

1. Trajectoires non optimisées (ordre des points arbitraire)
2. Temps de recharge condensateurs : 1.5 s entre chaque point
3. Temps de maintien post-soudage excessif (0.5 s vs 0.2 s nécessaire)
4. Vitesses robot conservatrices (70% du maximum)

**Actions mises en œuvre :**

1. **Optimisation trajectoires :** Algorithme TSP → réduction déplacements de 35%
2. **Upgrade alimentation :** Passage à 40 kVA (recharge 0.8 s vs 1.5 s)
3. **Réduction temps de maintien :** 0.5 s → 0.25 s (validé par tests)
4. **Augmentation vitesses robot :** 70% → 90% (après vérification trajectoires)
5. **Overlap accostage :** Fermeture pince pendant approche finale

**Résultats :**

- Nouveau temps de cycle : 45 secondes (-37%)
- Capacité : +60% (dépasse l'objectif de +40%)
- Qualité maintenue : 0 défaut sur 10 000 pièces de validation

**Investissement :** 35 k€ (principalement upgrade alimentation)

**ROI :** 4 mois (évitements d'investissement ligne supplémentaire estimé 400 k€)

## 5.4 Cas 4 : Problème de collage d'électrodes

### Q Étude de cas : Collage répétitif — Pièces galvanisées

**Contexte :** Assemblage de panneaux de porte en acier galvanisé (Z140). Collage des électrodes toutes les 200-300 soudures, causant des arrêts ligne.

**Impact :** 8 à 12 arrêts par équipe de 8h. Temps d'arrêt moyen : 3 minutes. Perte de productivité : 5%.

#### Investigation :

- Analyse des électrodes collées : couche de zinc + cuivre alliés
- Mesure de température électrode : 450°C en fin de séquence (vs 250°C en début)
- État de surface des tôles : épaisseur de zinc variable (8-12 µm)

#### Mécanisme identifié :

1. Le zinc fond à 420°C pendant le soudage
2. Une partie du zinc s'allie avec le cuivre de l'électrode
3. L'alliage Cu-Zn (laiton) adhère à la tôle lors du refroidissement
4. Le phénomène s'aggrave avec l'échauffement progressif des électrodes

#### Solutions testées :

Solution	Efficacité	Commentaire
Augmenter la force	20%	Améliore mais ne résout pas
Électrodes Cu-Cr-Zr	40%	Meilleure tenue mais coût 3×
Refroidissement eau	60%	Efficace mais modification importante
Pré-pulse « cleaning »	80%	Solution retenue

**Solution finale :** Séquence double pulse avec pré-pulse de nettoyage

- Pulse 1 : 40% courant, 4 ms → vaporise le zinc de surface
- Pause : 20 ms
- Pulse 2 : 100% courant, 10 ms → soudage effectif

**Résultat :** Intervalle de rafraîchissement passé de 250 à 1500 soudures. Arrêts réduits de 85%.

## 5.5 Cas 5 : Mise en conformité CQI-15

### Q Étude de cas : Audit CQI-15 — Équipementier rang 1

**Contexte :** Équipementier automobile fournissant des sous-ensembles soudés pour General Motors. Audit CQI-15 annoncé avec 3 mois de préparation.

**Situation initiale :** Auto-évaluation révélant 42 non-conformités sur 180 exigences (score 76%, minimum requis 85%).

**Non-conformités majeures :**

1. Absence de QMOS formalisés (15 combinaisons matériaux)
2. Traçabilité incomplète (paramètres non enregistrés)
3. Calibration des équipements non documentée
4. Formation des opérateurs non certifiée
5. Plan de contrôle insuffisant (pelage 1×/jour vs requis 1×/500 pièces)

**Plan d'action (12 semaines) :**

**Semaines 1-4 : Documentation**

- Rédaction de 15 DMOS complets
- Réalisation des essais de qualification (QMOS)
- Création des instructions de travail

**Semaines 5-8 : Infrastructure**

- Installation système d'acquisition données (monitoring)
- Mise en place étalonnage périodique
- Formation et certification des 24 opérateurs

**Semaines 9-12 : Validation**

- Mise en œuvre du nouveau plan de contrôle
- Audit interne (simulation CQI-15)
- Corrections des dernières non-conformités

**Résultat audit :** Score 94%. Certification obtenue.

**Investissement total :** 180 k€ (monitoring, formation, documentation)

**Bénéfice :** Maintien du contrat GM (CA annuel : 12 M€)

### 🔑 Points clés à retenir

- Les problèmes industriels sont souvent multi-factoriels
- L'analyse systématique (5 pourquoi, Ishikawa) est essentielle

- La solution optimale combine souvent plusieurs actions
- Le suivi des résultats valide l'efficacité des actions
- Le ROI des actions qualité est généralement très favorable
- La documentation et la traçabilité sont critiques



## Annexe A

# Ressources Complémentaires

### A.1 Bibliographie recommandée

**Resistance Welding Manual** (RWMA, AWS) — Référence complète sur le soudage par résistance. 500+ pages de données techniques.

**Weld Quality Handbook** (AWS D8.1) — Spécifique automobile, critères de qualité détaillés.

**Metallurgy of Welding** (J.F. Lancaster) — Métallurgie fondamentale du soudage. Indispensable pour comprendre les transformations.

**Battery Pack Design** (John Warner) — Conception de packs batteries, incluant assemblage.

**Automotive Body Manufacturing Systems** (Mohammed Omar) — Vue d'ensemble de la production automobile.

### A.2 Logiciels de simulation

Logiciel	Spécialité	Contact
SORPAS	Simulation RSW spécialisée	swantec.com
SYSWELD	Suite soudage complète	esi-group.com
Simufact Welding	Interface intuitive	simufact.com
ABAQUS	Personnalisation avancée	3ds.com

**TABLE A.1 :** Logiciels de simulation recommandés

### A.3 Organismes et certifications

- **AWS** (American Welding Society) — [aws.org](http://aws.org)
- **IIW** (International Institute of Welding) — [iiwelding.org](http://iiwelding.org)
- **DVS** (Deutscher Verband für Schweißen) — [dvs-ev.de](http://dvs-ev.de)
- **AIAG** (Automotive Industry Action Group) — [aiag.org](http://aiag.org)

## Annexe B

# Glossaire Expert

**AHSS** Advanced High Strength Steel — aciers avancés haute résistance (DP, TRIP, TWIP, CP, MS, PHS)

**Cpk** Indice de capacité du procédé — mesure la robustesse ( $Cpk > 1.67$  requis en automobile)

**CQI-15** Special Process : Welding System Assessment — référentiel AIAG pour le soudage

**DMOS** Descriptif du Mode Opérateur de Soudage (WPS en anglais)

**DP** Dual Phase — acier biphasé (ferrite + martensite)

**EBSD** Electron Backscatter Diffraction — technique d'analyse cristallographique

**FZ** Fusion Zone — zone fondue du point de soudure

**MEB** Microscope Électronique à Balayage (SEM en anglais)

**MFDC** Medium Frequency Direct Current — transformateur moyenne fréquence

**PHS** Press Hardened Steel — acier trempé sous presse (22MnB5)

**PPAP** Production Part Approval Process — processus d'approbation pièce

**QMOS** Qualification du Mode Opérateur de Soudage (WPQR en anglais)

**RSW** Resistance Spot Welding — soudage par points par résistance

**TRIP** Transformation Induced Plasticity — acier à plasticité induite par transformation

**ZAT** Zone Affectée Thermiquement (HAZ en anglais)

## Annexe C

# Checklist Expert

### C.1 Checklist audit CQI-15

Élément à vérifier	Conforme ?
DMOS disponible et à jour pour chaque configuration	<input type="checkbox"/>
QMOS réalisé et archivé	<input type="checkbox"/>
Personnel formé et qualifié (preuves)	<input type="checkbox"/>
Équipements étalonnés (certificats)	<input type="checkbox"/>
Plan de contrôle défini et appliqué	<input type="checkbox"/>
Enregistrements de production disponibles	<input type="checkbox"/>
Traçabilité complète (paramètres, opérateur, date)	<input type="checkbox"/>
Gestion des non-conformités documentée	<input type="checkbox"/>
Actions correctives et préventives tracées	<input type="checkbox"/>
Revue de direction soudage (annuelle)	<input type="checkbox"/>

**TABLE C.1 :** Checklist simplifiée audit CQI-15

---

### Fin de la Formation Niveau 3 — Expert

Félicitations! Vous avez complété l'ensemble du parcours de formation Spot Welding Pro.

**Vous êtes maintenant un expert en soudage par points.**

*Pour aller plus loin : consultations personnalisées,  
audits de production, formations sur site*

*[www.spotweldingpro.com](http://www.spotweldingpro.com)*

---