

SPOT WELDING PRO

Formations Professionnelles en Soudage



Soudeuse à Points Maîtrise Avancée

Optimisation, DIY et applications industrielles

Par Kangy Ham

Ingénieur Procédés · Expert Batteries Lithium

Niveau 2 · Intermédiaire · ~180 pages

Soudeuse à Points — Maîtrise Avancée

© 2025 Spot Welding Pro — Tous droits réservés.

Prérequis : Formation Niveau 1 complétée

Table des matières

Le Mot du Formateur	3
Introduction	5
1 Les Lobes de Soudure	6
1.1 Concept du lobe de soudure	6
1.1.1 Les quatre frontières du lobe	7
1.2 Construction d'un lobe expérimental	7
1.2.1 Méthodologie systématique	7
1.2.2 Interprétation du lobe	8
1.2.3 Facteurs qui modifient le lobe	9
2 Soudeuses DIY : Le Grand Comparatif	10
2.1 Le marché des soudeuses DIY	10
2.2 kWeld — La référence premium	11
2.2.1 Présentation	11
2.2.2 Caractéristiques techniques	12
2.2.3 Avantages et inconvénients	12
2.2.4 Mon expérience personnelle	12
2.3 Arduino Spot Welder (Malectrics)	13
2.3.1 Présentation	13
2.3.2 Caractéristiques techniques	13
2.3.3 Avantages et inconvénients	14
2.4 Sunkko — Le choix économique	14
2.4.1 Présentation	14
2.4.2 Caractéristiques techniques	14
2.4.3 Avantages et inconvénients	15
2.5 Tableau comparatif complet	15
2.6 Quelle soudeuse choisir?	15
2.6.1 Arbre de décision	16
2.6.2 Recommandations par profil	16
3 Construire et Améliorer sa Soudeuse	17
3.1 Architecture d'une soudeuse DIY	17
3.1.1 Schéma bloc	17

3.2	La source d'énergie	17
3.2.1	Batteries vs Condensateurs	18
3.2.2	Dimensionnement de la batterie	18
3.3	Le commutateur de puissance	19
3.3.1	MOSFETs pour haute intensité	19
3.4	Les câbles et connexions	19
3.4.1	Dimensionnement des câbles	19
3.5	Améliorations et modifications	20
3.5.1	Améliorer une Sunkko	20
3.5.2	Construire un système hybride	20
4	Soudage des Batteries Lithium	21
4.1	Contraintes thermiques des cellules	21
4.2	Configurations de packs batterie	22
4.2.1	Notation xSyP	22
4.2.2	Architectures courantes	22
4.3	Paramètres optimisés pour batteries	22
4.3.1	Règles fondamentales	22
4.3.2	Paramètres recommandés par configuration	23
4.4	Conception des assemblages	23
4.4.1	Patterns de soudure	23
4.4.2	Séquence de soudage optimale	23
4.5	Intégration du BMS	24
4.5.1	Rôle du BMS	24
4.5.2	Connexion du BMS	25
5	Cycles Multi-Pulse et Contrôle Adaptatif	26
5.1	Principe du multi-pulse	26
5.2	Types de séquences	26
5.2.1	Double pulse (pré-chauffe)	26
5.2.2	Triple pulse (avec recuit)	27
5.3	Paramètres typiques	27
5.4	Contrôle adaptatif	27
5.4.1	Principe	27
5.4.2	Modes de contrôle	28
6	Contrôle Qualité	30
6.1	Tests destructifs	30
6.1.1	Test de pelage (peel test)	30
6.1.2	Test de cisaillement	31
6.1.3	Coupe métallographique	31
6.2	Tests non destructifs	31
6.2.1	Mesure de résistance électrique	31

6.2.2	Inspection visuelle	32
6.2.3	Contrôle par ultrasons	32
6.3	Plan de contrôle type	32
7	Maintenance et Dépannage	34
7.1	Maintenance préventive	34
7.1.1	Programme de maintenance	34
7.1.2	Entretien des électrodes	34
7.2	Dépannage des problèmes courants	35
7.2.1	Méthodologie structurée	35
7.2.2	Guide de diagnostic	36
7.3	Outils de diagnostic avancé	36
7.3.1	Monitoring en temps réel	36
7.3.2	Analyse des tendances	36
A	Ressources Complémentaires	38
A.1	Communautés et forums	38
A.2	Fournisseurs recommandés	38
B	Formulaires de Contrôle	39
B.1	Fiche de paramètres	39
B.2	Checklist maintenance	39

Le Mot du Formateur

Bienvenue dans ce niveau 2. Si vous êtes ici, c'est que vous avez assimilé les bases et que vous voulez aller plus loin. Je me souviens encore de ma propre progression : après des mois à faire des soudures « qui tiennent », j'ai voulu comprendre *pourquoi* certaines configurations fonctionnaient mieux que d'autres.

C'est en construisant ma première soudeuse DIY à base d'Arduino que j'ai vraiment commencé à comprendre les subtilités du procédé. Voir les signaux sur l'oscilloscope, mesurer les temps réels de pulse, comparer avec les données constructeur... cette approche pratique m'a appris plus qu'aucun manuel.

formateur.jpg

Mon parcours dans le DIY

En 2016, j'ai commandé mon premier kit kWeld sur Kickstarter. Le projet de Keenlab promettait une révolution : le contrôle par énergie plutôt que par temps. J'étais sceptique, mais après les premiers tests, j'ai été converti.

Depuis, j'ai testé une dizaine de soudeuses différentes, de la Sunkko 737G chinoise à moins de 100€ jusqu'aux machines industrielles Miyachi à plusieurs dizaines de milliers d'euros. Cette expérience m'a permis de comprendre ce qui fait vraiment la différence.

Ce que vous allez découvrir

Dans cette formation, je vais partager :

- Les lobes de soudure — l'outil fondamental de l'optimisation
- Un comparatif honnête des soudeuses DIY du marché
- Comment construire et calibrer votre propre système
- Les techniques avancées pour les batteries lithium
- Les cycles multi-pulse et le contrôle adaptatif
- La maintenance préventive pour des années de fiabilité

Prêt à passer au niveau supérieur ? Allons-y !

Kangy Ham

Introduction

Félicitations ! Vous avez complété le Niveau 1 et maîtrisez les bases du soudage par points. Cette formation de niveau intermédiaire va vous permettre de passer à un niveau supérieur.

Ce que vous allez apprendre

Objectifs du chapitre

- Comprendre et utiliser les lobes de soudure
- Comparer et choisir une soudeuse DIY adaptée
- Construire ou améliorer votre propre système
- Maîtriser le soudage des batteries lithium
- Mettre en place un contrôle qualité efficace
- Comprendre les séquences multi-pulse
- Résoudre les problèmes complexes
- Maintenir votre équipement pour durer

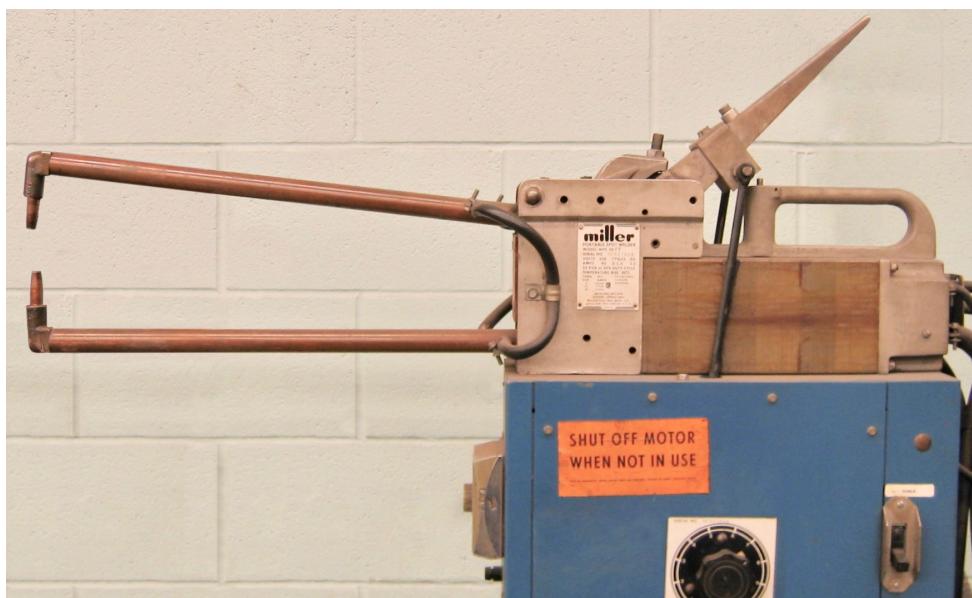


FIGURE 1: Soudeuse industrielle Miller — le standard de référence

Chapitre 1

Les Lobes de Soudure

② Objectifs du chapitre

- Comprendre le concept de lobe de soudure
- Construire un lobe expérimental
- Identifier la fenêtre de paramètres optimale
- Utiliser le lobe pour l'optimisation

1.1 Concept du lobe de soudure

■ Lobe de soudure (Weld Lobe)

Le **lobe de soudure** est un diagramme bidimensionnel (généralement courant vs temps) qui délimite la zone de paramètres produisant des soudures acceptables. C'est l'outil fondamental d'optimisation du procédé.

Le concept de lobe de soudure a été formalisé dans les années 1960 par les ingénieurs de l'industrie automobile. Avant cela, les paramètres étaient déterminés par essai-erreur, ce qui menait à une grande variabilité.

1.1.1 Les quatre frontières du lobe

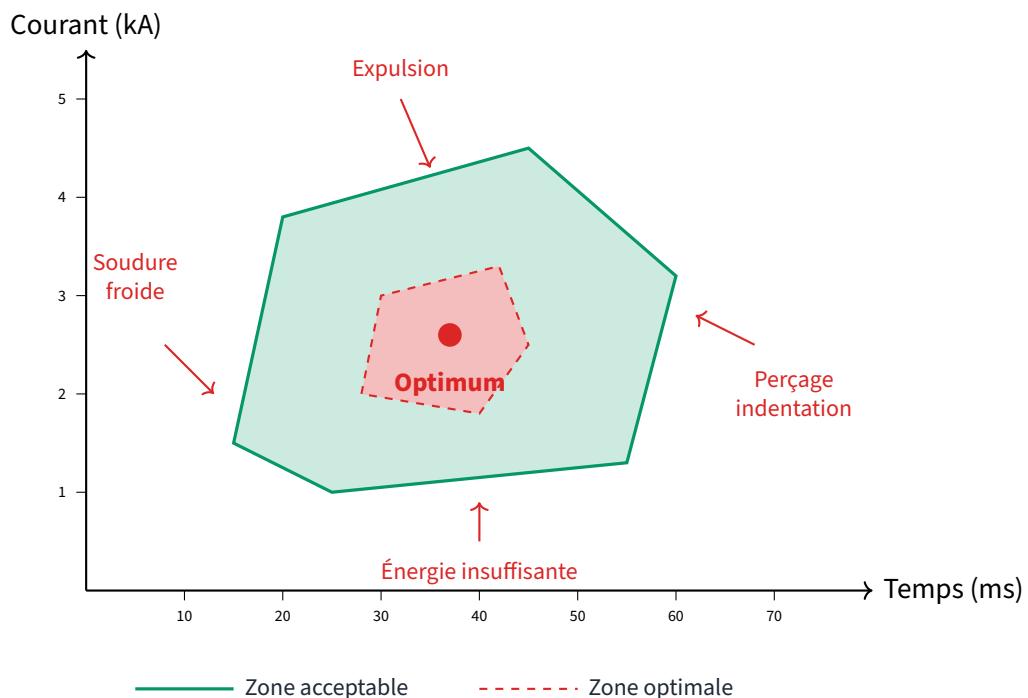


FIGURE 1.1 : Structure typique d'un lobe de soudure

Les quatre frontières du lobe correspondent aux quatre modes de défaillance :

1. **Frontière inférieure** : énergie insuffisante → soudure froide, pas de fusion
2. **Frontière gauche** : temps trop court → fusion incomplète, noyau trop petit
3. **Frontière supérieure** : courant trop élevé → expulsion du métal fondu
4. **Frontière droite** : temps trop long → perçage, déformation excessive, ZAT trop large

1.2 Construction d'un lobe expérimental

1.2.1 Méthodologie systématique

La construction d'un lobe nécessite une approche méthodique :

1. **Définir la configuration** : matériaux, épaisseurs, électrodes, force
2. **Créer une matrice de test** : typiquement 5×5 ou 7×7 points
3. **Réaliser les soudures** : 2-3 échantillons par condition
4. **Évaluer chaque point** : inspection visuelle + test de pelage

5. **Classifier les résultats** : OK / Froid / Expulsion / Perçage

6. **Tracer les frontières** : délimiter les zones

■ Exercice 1 : Construction d'un lobe pour nickel 0.15mm sur 18650

Matériel :

- 50+ échantillons de nickel 0.15mm
- 25 cellules 18650 (ou simulateurs)
- Soudeuse à condensateurs réglable
- Dynamomètre pour test de pelage

Procédure :

1. Fixer la force à la valeur nominale (ex : 2 kg)
2. Créer une matrice 5×5 :
 - Énergie : 15, 25, 35, 45, 55 J
 - Temps : 4, 8, 12, 16, 20 ms
3. Réaliser 2 soudures par combinaison (50 points total)
4. Pour chaque point, noter :
 - Aspect visuel (empreinte, expulsion, coloration)
 - Force de pelage (en kg)
 - Mode de rupture (bouton, décollage, arrachement)
5. Classifier : ≥ 2 kg avec bouton = OK
6. Tracer le lobe sur papier millimétré

Résultat attendu : Un lobe en forme de « banane » inclinée vers la droite, avec une zone optimale autour de 30-40 J et 10-14 ms.

1.2.2 Interprétation du lobe

ⓘ Règle des 80%

Pour une production stable, travaillez au **centre du lobe** avec une marge de sécurité d'au moins 20% par rapport à chaque frontière. Cela absorbe les variations naturelles du procédé (épaisseur, état de surface, usure des électrodes).

1.2.3 Facteurs qui modifient le lobe

Le lobe de soudure n'est pas fixe — il se déplace selon plusieurs facteurs :

Facteur	Effet sur le lobe	Compensation
Épaisseur ↑	Lobe déplacé vers haute énergie	Augmenter courant/temps
Résistivité ↑	Lobe rétréci, décalé vers bas courant	Réduire le courant
Force ↑	Lobe élargi, décalé vers haut courant	Augmenter légèrement le courant
Diamètre électrode ↑	Lobe déplacé vers haute énergie	Augmenter courant
État de surface sale	Lobe rétréci, instable	Nettoyer les pièces

TABLE 1.1 : Influence des paramètres sur le lobe de soudure

💡 Points clés à retenir

- Le lobe de soudure définit la fenêtre de paramètres acceptables
- Chaque configuration matériau/épaisseur a son propre lobe
- Travaillez au centre du lobe pour maximiser la robustesse
- Un lobe large indique un procédé tolérant
- Un lobe étroit nécessite un contrôle précis des paramètres
- Refaites le lobe après tout changement significatif

Chapitre 2

Soudeuses DIY : Le Grand Comparatif

⌚ Objectifs du chapitre

- Comprendre les différentes technologies disponibles
- Comparer objectivement les solutions DIY
- Choisir la soudeuse adaptée à vos besoins
- Évaluer le rapport qualité/prix

2.1 Le marché des soudeuses DIY

Le marché des soudeuses par points pour particuliers et petits ateliers a explosé depuis 2015, porté par la demande croissante en assemblage de batteries lithium pour vélos électriques, powerwalls et autres projets DIY.

On distingue trois grandes catégories :

1. **Les kits premium** : kWeld, Malectrics — contrôle avancé, prix élevé
2. **Les machines chinoises** : Sunkko, KNOKOO — bon marché, qualité variable
3. **Les projets open source** : Arduino Spot Welder — flexible, demande du travail



FIGURE 2.1 : Soudeuse industrielle pédale — inspiration pour les projets DIY

2.2 kWeld — La référence premium

2.2.1 Présentation

Le kWeld, développé par Keenlab en Allemagne, est considéré comme la référence des soudeuses DIY. Son innovation majeure : le contrôle par énergie plutôt que par temps.

■ Contrôle par énergie

Au lieu de définir un temps de pulse fixe, le kWeld mesure en temps réel la résistance et ajuste le temps pour délivrer une **énergie constante**. Cela compense automatiquement les variations de résistance de contact.

2.2.2 Caractéristiques techniques

Caractéristique	kWeld (2024)
Type de contrôle	Énergie (Joules)
Plage d'énergie	5 — 250 J (par pulse)
Résolution	1 J
Source d'alimentation	Batterie LiPo externe (14.8V min)
Courant max théorique	2000 A (dépend de la batterie)
Double pulse	Oui, programmable
Mesure de résistance	Oui, en temps réel
Connexion PC	USB, logiciel de diagnostic
Prix (2024)	~130€ (module seul)

TABLE 2.1 : Spécifications du kWeld

2.2.3 Avantages et inconvénients

Avantages :

- Contrôle précis par énergie
- Compensation automatique
- Documentation excellente
- Support communautaire actif
- Évolutif (firmware open)

Inconvénients :

- Nécessite une batterie LiPo puissante
- Prix total élevé (+ batterie + électrodes)
- Courbe d'apprentissage
- Pas de boîtier inclus

2.2.4 Mon expérience personnelle

⌚ Retour d'expérience — 5 ans avec le kWeld

J'utilise mon kWeld depuis 2019. Après avoir assemblé plus de 50 packs batterie (de 10S3P à 20S14P), voici mes conclusions :

Points forts confirmés :

- La régularité est impressionnante — moins de 2% de variation entre les points

- Le double pulse élimine quasiment les expulsions
- Le logiciel de diagnostic m'a sauvé plusieurs fois

Points à surveiller :

- Investissez dans une bonne batterie LiPo (au moins 75C de décharge)
- Les câbles fournis sont corrects mais pas optimaux
- Prévoyez un budget pour des électrodes de qualité

Total investi : kWeld 130€ + Batterie 4S 1500mAh 75C 45€ + Électrodes 25€ = **200€**

2.3 Arduino Spot Welder (Malectrics)

2.3.1 Présentation

L'Arduino Spot Welder, conçu par Malectrics, est un projet intermédiaire entre l'open source pur et le produit commercial. Le design est publié, mais des kits pré-assemblés sont disponibles.

2.3.2 Caractéristiques techniques

Caractéristique	Arduino Spot Welder V5
Type de contrôle	Temps (millisecondes)
Plage de temps	1 — 100 ms
Résolution	1 ms
Source d'alimentation	Batterie auto 12V (recommandé)
Courant max théorique	800-1200 A (selon batterie)
Double pulse	Oui (V4+)
Affichage	OLED ou LCD
Open source	Partiellement (schémas publiés)
Prix (kit)	~50€ (module)

TABLE 2.2 : Spécifications de l'Arduino Spot Welder

2.3.3 Avantages et inconvénients

Avantages :

- Prix très accessible
- Utilise des batteries auto courantes
- Schémas disponibles
- Communauté active (forum, YouTube)
- Bon pour apprendre

Inconvénients :

- Contrôle par temps uniquement
- Puissance limitée (0.2mm max)
- Qualité variable selon composants
- Nécessite du tuning
- Moins précis que le kWeld

2.4 Sunkko — Le choix économique

2.4.1 Présentation

Sunkko est une marque chinoise qui domine le marché des soudeuses économiques. Le modèle 737G est probablement la soudeuse DIY la plus vendue au monde.

2.4.2 Caractéristiques techniques

Caractéristique	Sunkko 737G
Type de contrôle	Temps + Énergie (combiné)
Plage d'énergie	1-99 (unités arbitraires)
Source d'alimentation	230V secteur
Courant max annoncé	1.5 kW (contesté)
Double pulse	Oui
Pédale	Incluse
Stylet mobile	Inclus
Prix (2024)	80 — 150€ (selon version)

TABLE 2.3 : Spécifications de la Sunkko 737G

2.4.3 Avantages et inconvénients

Avantages :

- Prix imbattable
- Solution tout-en-un
- Fonctionne « out of the box »
- Pédale et stylet inclus
- Pièces de rechange faciles

Inconvénients :

- Qualité de fabrication variable
- Puissance réelle « annoncée
- Pas de mesure de résistance
- Interface peu intuitive
- Fiabilité long terme incertaine

⚠️ Attention aux contrefaçons

Le marché est inondé de contrefaçons Sunkko. Les « Sunkko » vendus sur certaines plateformes chinoises peuvent être des copies de copies, avec des composants de qualité encore inférieure. Privilégiez les revendeurs établis (Amazon, AliExpress vendeurs Gold, etc.) et lisez les avis récents.

2.5 Tableau comparatif complet

Critère	kWeld	Arduino SW	Sunkko 737G	Industriel
Prix total	200€	100€	100€	2000€+
Type contrôle	Énergie	Temps	Temps/Énergie	Variable
Précision	非常好	非常好	非常好	非常好
Facilité	非常好	非常好	非常好	非常好
Fiabilité	非常好	非常好	非常好	非常好
Puissance max	0.3mm	0.2mm	0.2mm	1mm+
Double pulse	Oui	Oui	Oui	Oui
Support	Forum actif	YouTube	Limité	SAV pro
Évolutivité	Haute	Moyenne	Faible	Selon modèle

TABLE 2.4 : Comparatif des principales solutions de soudage DIY

2.6 Quelle soudeuse choisir ?

2.6.1 Arbre de décision

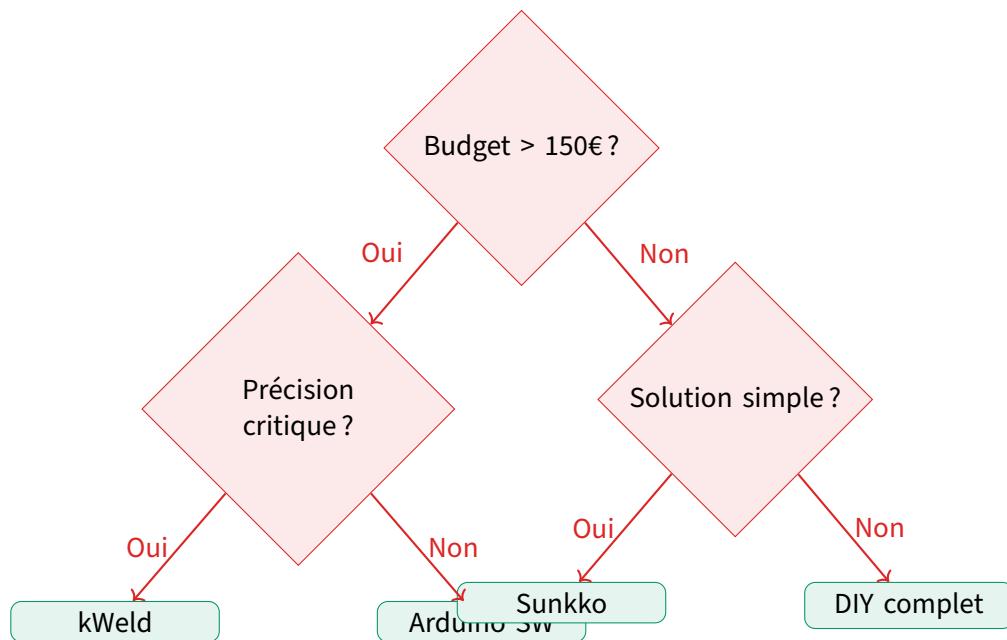


FIGURE 2.2 : Arbre de décision pour le choix d'une soudeuse

2.6.2 Recommandations par profil

Débutant / Premier projet Sunkko 737G ou clone — pour apprendre sans trop investir

Maker / DIY sérieux Arduino Spot Welder — bon compromis, permet d'apprendre

Production petite série kWeld — la précision justifie l'investissement

Professionnel Machine industrielle — le coût est amorti sur le volume

💡 Points clés à retenir

- Le kWeld offre le meilleur contrôle mais nécessite une batterie externe
- L'Arduino Spot Welder est idéal pour apprendre et bricoler
- Sunkko offre une solution complète à petit prix, mais qualité variable
- Le choix dépend de votre budget, volume et exigences de qualité
- Prévoyez toujours un budget pour des électrodes et consommables de qualité

Chapitre 3

Construire et Améliorer sa Soudeuse

Objectifs du chapitre

- Comprendre les composants d'une soudeuse DIY
- Dimensionner correctement les éléments
- Réaliser les câblages en toute sécurité
- Optimiser les performances

3.1 Architecture d'une soudeuse DIY

3.1.1 Schéma bloc

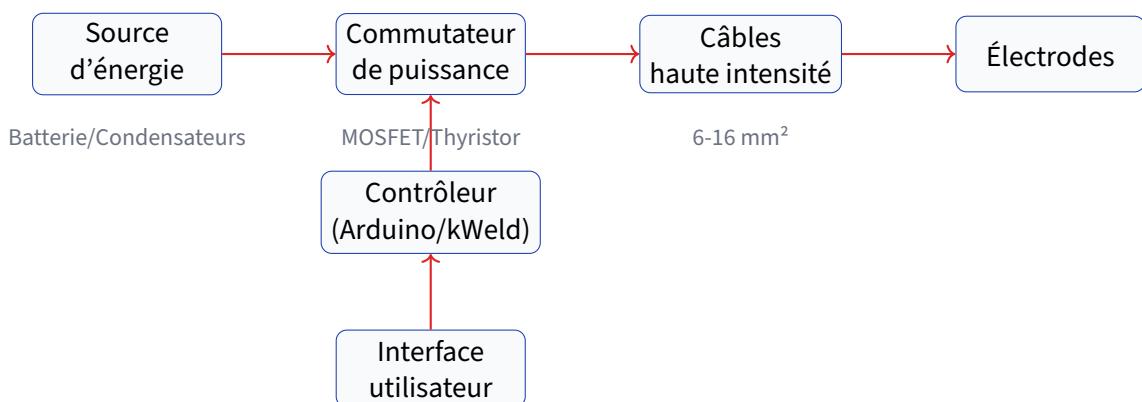


FIGURE 3.1 : Architecture typique d'une soudeuse DIY

3.2 La source d'énergie

3.2.1 Batteries vs Condensateurs

Critère	Batterie LiPo	Condensateurs
Énergie disponible	Très élevée	Limitée
Courant de pointe	Dépend du C-rating	Très élevé
Temps de recharge	Lent (heures)	Rapide (secondes)
Durée de vie	300-500 cycles	10000+ cycles
Coût initial	Modéré	Élevé
Complexité	BMS requis	Simple

TABLE 3.1 : Comparaison batteries vs condensateurs

3.2.2 Dimensionnement de la batterie

Pour le kWeld et systèmes similaires, la batterie doit fournir un courant très élevé pendant un temps court :

$$I_{max} = \frac{E}{t \times V} \times \eta^{-1}$$

Où :

- I_{max} : courant de pointe (A)
- E : énergie souhaitée (J)
- t : temps de pulse (s)
- V : tension de la batterie (V)
- η : rendement (~0.7-0.8)

Exercice 1 : Calcul de courant de pointe

Données :

- Énergie souhaitée : 50 J
- Temps de pulse : 10 ms
- Batterie : 4S LiPo (14.8V nominal)
- Rendement estimé : 75%

Calcul :

$$I_{max} = \frac{50}{0.010 \times 14.8 \times 0.75} = 450 \text{ A}$$

Conclusion : Il faut une batterie capable de fournir au moins 450 A de pointe. Pour une batterie

1500 mAh, cela correspond à un C-rating de 300C minimum. En pratique, on utilise des batteries 75C ou plus avec une capacité suffisante (ex : $1500 \text{ mAh} \times 75\text{C} = 112 \text{ A continu}$, mais le pic est plus élevé).

3.3 Le commutateur de puissance

3.3.1 MOSFETs pour haute intensité

Les MOSFETs de puissance sont le choix standard pour les soudeuses DIY modernes :

- **IRFB3607** : 80V, 80A, $R_{DS(on)} = 9 \text{ m}\Omega$ — classique, abordable
- **IRFB7430** : 40V, 195A, $R_{DS(on)} = 1.3 \text{ m}\Omega$ — haute performance
- **IPB019N08N3G** : 80V, 180A, $R_{DS(on)} = 1.9 \text{ m}\Omega$ — premium

⚠ Montage en parallèle

Pour augmenter la capacité en courant, on monte plusieurs MOSFETs en parallèle. Cependant :

- Utilisez des composants du même lot (matching)
- Ajoutez des résistances de gate (10-22 Ω) pour éviter les oscillations
- Montez-les sur le même dissipateur thermique
- La résistance totale $R_{DS(on)}$ se divise par le nombre de MOSFETs

3.4 Les câbles et connexions

3.4.1 Dimensionnement des câbles

La résistance des câbles est critique — elle absorbe une partie de l'énergie et génère de la chaleur :

Section (mm ²)	Résistance (/m)	Courant max pulse	Usage
6	3.1 m Ω	300 A	Arduino SW
10	1.8 m Ω	500 A	Standard
16	1.15 m Ω	800 A	kWeld
25	0.73 m Ω	1200 A	Haute puissance

TABLE 3.2 : Dimensionnement des câbles cuivre

⌚ Conseil pratique

Pour les connexions vers les électrodes, utilisez des câbles de démarrage auto de qualité (pas les premiers prix). Ils sont conçus pour des courants de plusieurs centaines d'ampères et sont faciles à trouver. Coupez-les à la longueur minimale nécessaire.

3.5 Améliorations et modifications

3.5.1 Améliorer une Sunkko

Les modifications les plus courantes sur les Sunkko :

1. **Remplacer les câbles internes** par du 10 mm² minimum
2. **Ajouter un voltmètre** pour surveiller la tension des condensateurs
3. **Remplacer les électrodes** par des électrodes cuivre-chrome
4. **Améliorer la ventilation** (perçage + ventilateur)
5. **Remplacer le thyristor** par un modèle de meilleure qualité

3.5.2 Construire un système hybride

Une approche intéressante combine les avantages de plusieurs systèmes :

- Contrôleur kWeld (précision)
- Alimentation par supercondensateurs (recharge rapide)
- Électrodes industrielles (durabilité)
- Pied de presse manuel (force constante)

💡 Points clés à retenir

- La source d'énergie (batterie ou condensateurs) détermine les performances
- Les câbles doivent être dimensionnés pour minimiser les pertes
- Les MOSFETs en parallèle augmentent la capacité en courant
- Les machines bon marché peuvent être significativement améliorées
- La sécurité électrique est primordiale — ces systèmes manipulent des courants mortels

Chapitre 4

Soudage des Batteries Lithium

⌚ Objectifs du chapitre

- Comprendre les contraintes spécifiques aux cellules lithium
- Maîtriser les paramètres critiques
- Concevoir des assemblages sûrs et fiables
- Éviter les modes de défaillance catastrophiques

4.1 Contraintes thermiques des cellules

Les cellules lithium-ion sont extrêmement sensibles à la chaleur. Le soudage par points représente un défi car il génère une chaleur intense, même si elle est très localisée.

Température	Seuil	Effet
Fonctionnement normal	< 45°C	Aucun effet
Zone de stress	45–60°C	Vieillissement accéléré
Zone critique	60–80°C	Dégradation de l'électrolyte
Danger imminent	> 80°C	Risque d'emballement
Point critique	> 100°C	SEI layer breakdown
Emballage thermique	> 130°C	Réaction en chaîne

TABLE 4.1 : Seuils de température critiques pour les cellules lithium-ion

⚠ Emballage thermique

L'emballement thermique est une réaction en chaîne auto-entretenue :

1. La chaleur déclenche des réactions chimiques exothermiques
2. Ces réactions produisent plus de chaleur
3. La température augmente exponentiellement
4. La cellule peut exploser ou s'enflammer

5. Les cellules adjacentes peuvent être entraînées (propagation)

Une fois déclenché, l'emballement ne peut pas être arrêté. La seule solution est la prévention.

4.2 Configurations de packs batterie

4.2.1 Notation xSyP

■ Configuration série/parallèle

La notation **xSyP** décrit l'architecture d'un pack :

- **x** = nombre de cellules en série → détermine la tension
- **y** = nombre de cellules en parallèle → détermine la capacité

Exemple : **10S4P** = 10 cellules en série (37V nominal) × 4 en parallèle (ex : 12 Ah avec cellules 3 Ah)

4.2.2 Architectures courantes

Application	Config.	Tension	Cellules typiques
Vélo électrique	10S4P - 14S5P	36-52V	18650, 21700
Trottinette	10S2P - 10S4P	36V	18650
Powerwall	7S jusqu'à 16S	24-48V	18650 recyclées
Outilage portatif	5S1P - 10S2P	18-36V	18650, 21700
Modélisme	3S-6S	11-22V	LiPo packs

TABLE 4.2 : Configurations courantes par application

4.3 Paramètres optimisés pour batteries

4.3.1 Règles fondamentales

1. **Pulses courts** : < 15 ms idéalement, 20 ms maximum absolue
2. **Énergie minimale** : juste assez pour une bonne soudure

3. **Cellules déchargées** : < 30% SOC recommandé
4. **Espacement temporel** : 5+ secondes entre les points sur la même cellule
5. **Espacement spatial** : points non adjacents en séquence
6. **Ventilation** : travaillez dans un espace ventilé

4.3.2 Paramètres recommandés par configuration

Configuration	Énergie	Temps max	Force
Ni 0.10mm sur 18650	15–25 J	8 ms	1.5-2 kg
Ni 0.15mm sur 18650	25–40 J	12 ms	2-2.5 kg
Ni 0.20mm sur 21700	40–60 J	15 ms	2.5-3 kg
Ni 0.25mm sur prismatique	60–80 J	18 ms	3-4 kg
Ni plaqué Cu 0.15mm	35–50 J	12 ms	2.5-3 kg

TABLE 4.3 : Paramètres recommandés pour le soudage de batteries

4.4 Conception des assemblages

4.4.1 Patterns de soudure

Pour les cellules cylindriques (18650, 21700), les patterns recommandés sont :



FIGURE 4.1 : Patterns de points de soudure selon l'intensité nominale

4.4.2 Séquence de soudage optimale

Pour un pack de plusieurs cellules, ne soudez jamais tous les points d'une cellule à la suite :

i Séquence « saut de grenouille »

Pour un pack 4S2P (8 cellules, 2 points par cellule = 16 points) :

1. Point 1, Cellule A1
2. Point 1, Cellule B1
3. Point 1, Cellule A2
4. Point 1, Cellule B2
5. ... (continuer pour toutes les cellules)
6. Point 2, Cellule A1
7. Point 2, Cellule B1
8. ... (continuer)

Chaque cellule a au moins 30 secondes pour refroidir entre deux points.

4.5 Intégration du BMS

4.5.1 Rôle du BMS

Le Battery Management System (BMS) est indispensable pour tout pack lithium :

- **Protection** contre surcharge, sous-charge, surintensité
- **Équilibrage** des cellules en série
- **Monitoring** de la température et tension
- **Communication** avec le système hôte (optionnel)

4.5.2 Connexion du BMS

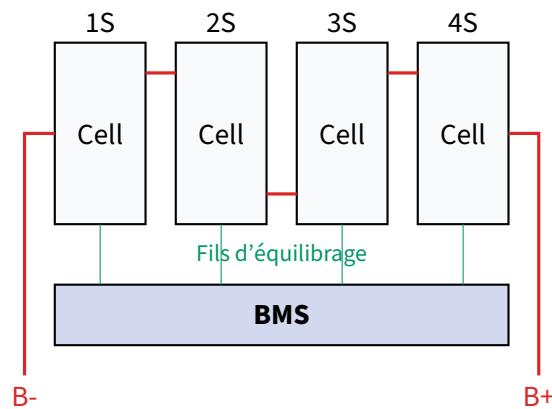


FIGURE 4.2 : Schéma de connexion BMS sur pack 4S

Points clés à retenir

- Les cellules lithium sont très sensibles à la chaleur
- Privilégiez les pulses courts et l'énergie minimale
- Espacez les points dans le temps et l'espace
- Le nombre de points dépend du courant nominal
- Le BMS est obligatoire pour la sécurité
- Surveillez la température des cellules pendant le soudage

Chapitre 5

Cycles Multi-Pulse et Contrôle Adaptatif

Objectifs du chapitre

- Comprendre les avantages du multi-pulse
- Configurer des séquences optimisées
- Implémenter un contrôle adaptatif
- Résoudre les problèmes spécifiques

5.1 Principe du multi-pulse

Au lieu d'un seul pulse de courant, on utilise plusieurs pulses successifs séparés par des temps de repos. Cette technique, issue de l'industrie automobile, améliore significativement la qualité sur les matériaux difficiles.

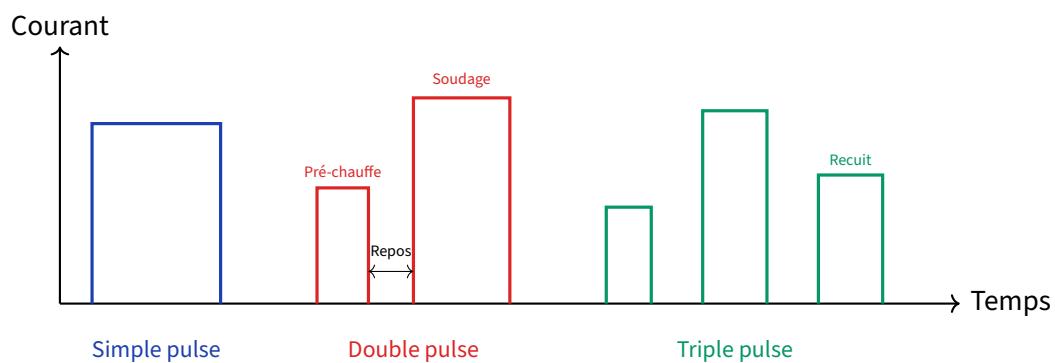


FIGURE 5.1 : Comparaison des profils de courant simple et multi-pulse

5.2 Types de séquences

5.2.1 Double pulse (pré-chauffe)

Pulse 1 (pré-chauffe) Courant modéré (50-70% du nominal), ramollit le métal et améliore le contact électrique en « nettoyant » l'interface.

Temps de repos 50-100 ms, permet aux électrodes de se repositionner sous l'effet de la force.

Pulse 2 (soudage) Courant principal (100%), crée le noyau de soudure.

Applications idéales :

- Matériaux revêtus (galvanisés, pré-peints)
- Surfaces oxydées ou légèrement contaminées
- Assemblages avec jeu initial

5.2.2 Triple pulse (avec recuit)

Ajoute un troisième pulse à courant réduit après le soudage pour un recuit contrôlé :

Pulse 1 Pré-chauffe (comme ci-dessus)

Pulse 2 Soudage (courant maximal)

Pulse 3 Recuit (30-50% du nominal, durée plus longue)

Applications idéales :

- Aciers à haute limite élastique (HSLA)
- Aciers martensitiques
- Applications où la ductilité de la ZAT est critique

5.3 Paramètres typiques

Phase	Courant	Temps	Repos après	Objectif
Pré-chauffe	50–70%	20–40%	50–100 ms	Ramollir, nettoyer
Soudage	100%	100%	0–50 ms	Fusion
Recuit (opt.)	30–50%	50–100%	–	Détente contraintes

TABLE 5.1 : Paramètres typiques d'une séquence triple pulse

5.4 Contrôle adaptatif

5.4.1 Principe

Les systèmes avancés (kWeld, machines industrielles) implémentent un contrôle adaptatif qui ajuste les paramètres en temps réel :

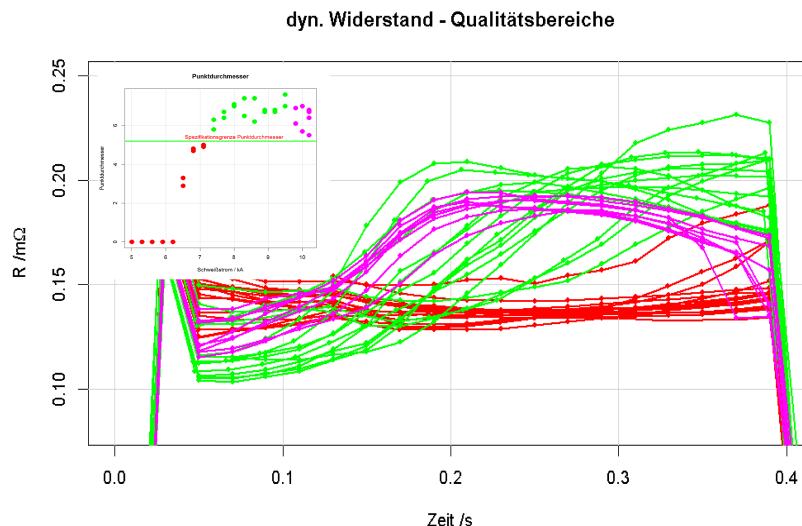


FIGURE 5.2 : Courbe de résistance dynamique pendant un pulse de soudage

Résistance dynamique

Pendant le pulse de soudage, la résistance du point évolue :

1. **Phase 1** : Résistance élevée (contact froid)
2. **Phase 2** : Chute rapide (ramollissement)
3. **Phase 3** : Minimum (fusion commencée)
4. **Phase 4** : Légère remontée (expansion du noyau)

Le système adaptatif détecte ces phases et peut couper le courant au moment optimal.

5.4.2 Modes de contrôle

Mode	Principe	Avantages
Temps constant	Pulse de durée fixe	Simple, reproductible
Énergie constante	Mesure et ajuste pour délivrer une énergie fixe	Compense les variations de résistance
Résistance dynamique	Coupe quand R atteint un seuil	Optimal pour chaque point
Déplacement	Surveille l'enfoncement des électrodes	Détecte l'expulsion précoce

TABLE 5.2 : Modes de contrôle adaptatif

💡 Points clés à retenir

- Le multi-pulse améliore la qualité sur matériaux difficiles
- Le pré-chauffe améliore le contact et réduit les expulsions
- Le recuit réduit les contraintes résiduelles dans la ZAT
- Le contrôle adaptatif compense les variations du procédé
- Chaque application nécessite une optimisation spécifique

Chapitre 6

Contrôle Qualité

Objectifs du chapitre

- Mettre en place un système de contrôle qualité
- Utiliser les méthodes de test destructives et non destructives
- Interpréter les résultats et prendre des décisions

6.1 Tests destructifs

6.1.1 Test de pelage (peel test)

Le test le plus simple et le plus courant :

1. Fixer une extrémité de l'assemblage
2. Tirer sur l'autre extrémité à 90° du plan
3. Observer le mode de rupture
4. Mesurer la force de rupture

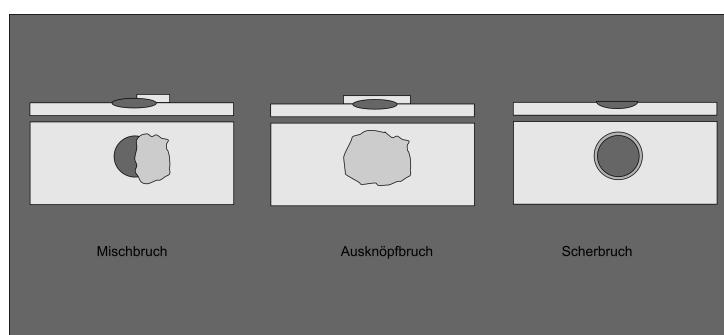


FIGURE 6.1 : Modes de rupture au test de pelage

Critères d'acceptation :

- Le feuillard doit se déchirer **autour** du point (bouton)
- Force de rupture $\geq 2 \text{ kg}$ pour feuillard 0.15 mm

- Pas de décollement interfacial (soudure froide)

6.1.2 Test de cisaillement

Pour les applications structurelles :

- Traction dans le plan des pièces
- Mesure de la force de rupture
- Comparaison aux spécifications
- Plus représentatif des sollicitations réelles

6.1.3 Coupe métallographique

Examen de la structure interne (pour analyse approfondie) :

1. Découpe de l'échantillon au centre du point
2. Enrobage dans une résine
3. Polissage progressif (jusqu'à 1 µm)
4. Attaque chimique pour révéler la structure
5. Observation au microscope

Mesures :

- Diamètre du noyau
- Pénétration dans chaque pièce
- Étendue de la ZAT
- Présence de défauts (porosités, fissures, retassures)

6.2 Tests non destructifs

6.2.1 Mesure de résistance électrique

- Mesure en micro-ohms de la résistance du point
- Une bonne soudure : typiquement $< 0.5 \text{ m}\Omega$
- Augmentation progressive = dégradation ou mauvaise soudure

- Nécessite un micro-ohmmètre (coût : 100-500€)

6.2.2 Inspection visuelle

Critères visuels d'acceptation :

- Empreinte régulière et centrée
- Pas d'expulsion visible (projections de métal)
- Coloration uniforme (pas de brûlure localisée)
- Pas d'indentation excessive (< 15% de l'épaisseur)
- Pas de fissure visible autour du point

6.2.3 Contrôle par ultrasons

Pour applications critiques (automobile, aéronautique) :

- Détection des défauts internes
- Mesure du diamètre du noyau
- Équipement spécialisé requis (> 10 000€)
- Formation spécifique nécessaire

6.3 Plan de contrôle type

Fréquence	Type de test	Action si échec
Chaque point	Visuel	Retouche immédiate
Toutes les 50 pièces	Pelage (destructif)	Arrêt + ajustement paramètres
Début/fin de série	Résistance électrique	Validation avant/après
Chaque changement	Lobe complet	Validation avant reprise
Hebdomadaire	Métallographie	Analyse tendance

TABLE 6.1 : Plan de contrôle type pour production en série

- Combinez tests destructifs et non destructifs
- Le test de pelage est le minimum obligatoire
- Documentez tous les résultats pour l'analyse de tendance
- Définissez des critères d'acceptation clairs AVANT la production
- Agissez immédiatement en cas de dérive

Chapitre 7

Maintenance et Dépannage

Objectifs du chapitre

- Mettre en place une maintenance préventive
- Diagnostiquer les problèmes courants
- Identifier les causes racines
- Prolonger la durée de vie de l'équipement

7.1 Maintenance préventive

7.1.1 Programme de maintenance

Fréquence	Opération	Durée
Quotidien	Inspection visuelle des électrodes	2 min
	Nettoyage des pointes	5 min
Hebdomadaire	Vérification des câbles et connexions	10 min
	Test de résistance de contact	5 min
Mensuel	Nettoyage complet du système	30 min
	Vérification calibration	15 min
Trimestriel	Remplacement des électrodes (si nécessaire)	30 min
	Inspection des composants électroniques	20 min
Annuel	Révision complète	2-4 h

TABLE 7.1 : Programme de maintenance préventive

7.1.2 Entretien des électrodes

Les électrodes sont le consommable principal. Leur état conditionne directement la qualité :

- **Nettoyage** : Utilisez du papier abrasif fin (400-600) ou une lime spéciale

- **Rafraîchissement** : Reformez la pointe quand le diamètre augmente de 20%
- **Remplacement** : Quand la longueur utilisable est épuisée

⌚ Astuce du pro

Gardez un jeu d'électrodes de rechange prêtes. Quand vous rafraîchissez vos électrodes, faites-le sur le jeu de rechange et échangez. Ainsi, vous n'avez jamais de temps d'arrêt.

7.2 Dépannage des problèmes courants

7.2.1 Méthodologie structurée

🔍 Étude de cas : Soudures froides récurrentes l'après-midi

Problème : Les soudures sont acceptables le matin mais deviennent froides l'après-midi.

Analyse 5 pourquoi :

1. Pourquoi les soudures sont froides ? → Énergie insuffisante au point
2. Pourquoi l'énergie est insuffisante ? → La résistance de contact augmente
3. Pourquoi la résistance augmente ? → Les électrodes s'usent/s'encaissent
4. Pourquoi l'usure s'accélère l'après-midi ? → Production plus intensive sans pause
5. Pourquoi pas de pause ? → Planning non adapté à la cadence réelle

Solution : Planifier des pauses de rafraîchissement des électrodes toutes les 200-500 points selon le matériau.

7.2.2 Guide de diagnostic

Symptôme	Causes possibles	Actions
Soudure froide	Énergie insuffisante	Augmenter énergie/temps
	Électrodes usées	Rafraîchir/remplacer
	Mauvais contact	Nettoyer pièces et électrodes
Expulsion	Énergie excessive	Réduire courant ou temps
	Force insuffisante	Augmenter la force
	Contamination	Nettoyer les surfaces
Points décentrés	Alignement électrodes	Réaligner
	Jeu mécanique	Resserrer fixations
Indentation excessive	Force trop élevée	Réduire la force
	Électrodes trop pointues	Rafraîchir avec rayon correct
Variation aléatoire	Source d'énergie instable	Vérifier batteries/condensateurs
	Connexions desserrées	Resserrer toutes les connexions

TABLE 7.2 : Guide de diagnostic rapide

7.3 Outils de diagnostic avancé

7.3.1 Monitoring en temps réel

Les soudeuses modernes (kWeld, industrielles) permettent de surveiller :

- Courbe de courant vs temps
- Résistance dynamique
- Énergie réellement délivrée
- Déplacement des électrodes (si capteur)

7.3.2 Analyse des tendances

Tracez l'évolution des paramètres clés pour anticiper les problèmes :

- Énergie moyenne par point
- Taux de rejet
- Fréquence de rafraîchissement des électrodes

- Temps entre les défauts

💡 Points clés à retenir

- La maintenance préventive évite 80% des problèmes
- Les électrodes sont le premier élément à vérifier
- Utilisez une approche structurée (5 pourquoi, Ishikawa)
- Distinguez les problèmes progressifs des changements brutaux
- Documentez les problèmes et solutions pour capitaliser

Annexe A

Ressources Complémentaires

A.1 Communautés et forums

Endless Sphere Forum international sur les véhicules électriques, section battery building très active

Forum kWeld Support officiel et retours d'expérience

Reddit r/batterypack Communauté anglophone sur l'assemblage de batteries

Second Life Storage Forum sur le recyclage de batteries (powerwalls)

A.2 Fournisseurs recommandés

Keenlab kWeld et accessoires (keenlab.de)

Malectrics Arduino Spot Welder (malectrics.eu)

Vruzend Systèmes sans soudure et accessoires

NKON Cellules et feuillards nickel (nkon.nl)

AliExpress Sunkko et pièces génériques (vérifier les avis)

Annexe B

Formulaires de Contrôle

B.1 Fiche de paramètres

FICHE DE PARAMÈTRES SOUDAGE	
Date	_____
Opérateur	_____
Matériau pièce 1	_____
Épaisseur pièce 1	_____
Matériau pièce 2	_____
Épaisseur pièce 2	_____
Énergie / Courant	_____
Temps	_____
Force	_____
Type électrodes	_____
Résultat test pelage	<input type="checkbox"/> OK <input type="checkbox"/> NOK
Force de rupture	_____ kg
Observations	_____

B.2 Checklist maintenance

CHECKLIST MAINTENANCE HEBDOMADAIRE		
Élément	OK / NOK	Remarques
État des électrodes	<input type="checkbox"/>	_____
Propreté des pointes	<input type="checkbox"/>	_____
Câbles et connexions	<input type="checkbox"/>	_____
Tension batterie (si applicable)	<input type="checkbox"/>	_____
Test de soudure échantillon	<input type="checkbox"/>	_____
Force de pelage OK	<input type="checkbox"/>	_____

Fin de la Formation Niveau 2

Prêt pour le niveau expert ?

Formation Niveau 3 : Expert

Métallurgie avancée · Automatisation
Normes et certifications · Études de cas industrielles

www.spotweldingpro.com
