

Sommaire

Introduction

Chapitre 1

1. Généralité	2
1.1. Les robots industriels	2
1.1.1. Domaines d'applications de la robotique industrielle à la robotique de service.....	3
1.1.2 Domaines d'expertises	3
1.2. Classification des robots	4
1.2.1. Liaisons entre deux solides.....	6
1.3. Les articulations des robots	8
1.3.1. Articulation de ddl ≥ 2	9

Chapitre 2

2.1. SOUDAGE	11
2.1.1. Introduction.....	11
2.1.2. Les avantages	11
2.1.3. Les inconvénients	11
2.1.4. Soudabilité.....	12
2.2. Mis en situation	12
2.2.1 : soudage par point.....	12
2.2.1.1. Généralité	12
2.2.2. Procédé de Soudage par résistance.....	12
2.2.2.1. Le soudage par bossage.....	13
2.2.2.2. Le soudage à la molette	14
2.3. Principe du Procédé (soudage par point)	15
2.3.1 Déroulement du cycle de soudage par point	15
2.3.2 Paramètres du Procédé	17
2.3.2.1. Le diamètre des électrodes	17

2.3.2.2. L'effort de serrage	17
2.3.2.3. Le courant de soudage.....	17
2.3.2.4. La durée de soudage	17
2.3.2.5. La durée de forgeage	17
2.3.3. Mécanisme de formation de la soudure	18
2.3.4. Microstructures d'un Point Soudé	20
2.3.5. Formation de la soudure par points	21
2.4. Phénomènes Électriques dans le Procédé de Soudage Par Points	23
2.4.1. Les électrodes	23
2.4.1.1. Mécanique.....	23
2.4.1.2.électrique	23
2.4.1.3. Thermique.....	23
2.4.2. Les différents effets électriques	24
2.4.2.1. Effet Seebeck	24
2.4.2.2. Effet Peltier	24
2.4.2.3. Effet Thomson.....	25
2.4.2.4. Effet de Peau	25
2.4.3. Types de Courant de Soudage.....	25
2.4.3.1. Signaux de Soudage.....	27
2.4.3.2. Rappel de base d'électricité.....	27
2.5. Assemblages soudés par points	28
2.5.1 Généralités	28
2.5.1.1 Les calculs	28
2.5.2. Les tôles qui peuvent souder	32
2.5.3. Règles de désignation des aciers.....	32

Chapitre 3

Parti I

3.1. Contrôle non destructifs	36
3.1.1. Historique de CND	36
3.2. Les techniques de contrôle CND	37
3.2.1. Le contrôle visuel	37
3.2.2. Le contrôle par ressuage	38
3.2.2.1. Domaine d'application du ressuage	40
3.2.2.1. Caractéristique et nature des défauts mis en évidence	40
3.2.2.2. Les limitations du procédé de ressuage	40
3.2.3. Le contrôle par magnétoscopie	41
3.2.3.1. Domaine d'application contrôle par magnétoscopie	42
3.2.3.2 Les avantages	42
3.2.3.3. Les inconvénients	43
3.2.4. Le contrôle par la radiographie	43
3.2.4.1. Radiographie par rayons X et γ	43
1- Paramètres de travail	47
2- Les avantages	47
3- Les inconvénients.....	48
3.2.5. Contrôle par ultrason	48
1- Comment sont produits les ultrasons	48
2- Principe de contrôle ultrasonique.....	49
3- La technique opératoire de contrôle par ultrasons.....	50
4- Champ d'application.....	53

Parti II :

3.5. Etude de la pince et le contrôle non destructif de points soudage	54
3.5.1. Généralité	54
a) Fonctionnement de la pince	54
b) Type de vérin	56
3.5.2. L'installation d'appareil de contrôle non destructif par ultrasons	58
3.5.3. L'installation d'appareil de contrôle non destructif par rayon X	61
3.5.4. La qualité d'une soudure est conditionnée par les critères suivants	66
3.5.5. Les classe de qualité.....	66
3.5.6. Défauts possibles.....	66
3.5.7. Sécurité.....	66
Chapitre 4	
4.1. Introduction	68
4.1.1. Description des matrices de transformation	68
4.1.2. Description d'un solide dans l'espace	71
4.1.3. Description d'une structure géométrique du robot	71
4.2. Modélisation géométrique	74
4.2.1. Détermination du nombre de degrés de liberté du robot	75
4.2.2. Modélisation géométrique directe (MGD)	76
4.2.2.1. Calcul du Modèle géométrique directe (MGD) du robot a 3 ddl	77
4.2.3. Modélisation géométrique inverse (MGI)	79
4.2.3.1. Calcul du Modèle géométrique inverse (MGI) du robot a 3 ddl	79
4.3. Modélisation Cinématique	83
4.3.1. Modélisation cinématique directe (MCD) du robot a 3ddl.....	83
4.3.2. Modélisation cinématique inverse (MCI)	85
Conclusion	86
Références Bibliographique	87

Introduction Générale :

Les robots industriels peuvent être définis comme l'ensemble des techniques et études tendant à concevoir des systèmes mécaniques, informatiques ou mixtes.

L'objectif de ce travail est l'étude générale d'un robot de soudage par point et en même temps la qualité du point de soudure.

La qualité du point de soudure dépend entre autres de la présence d'impuretés (soufre, phosphate, etc.) dans la zone même du point de soudure dans la tôle.

Le contrôle non destructif est une condition nécessaire pour la définition de la qualité de la soudure.

Les électrodes utilisées, s'usent après certain nombre de point de soudeur ; la dimension du diamètre des électrodes implique aussi la dimension du diamètre du point de soudure ; il en résulte une dimension de la résistance du soudeur.

1. Généralité :

1.1. Les robots industriels :

Nous présentons sans ce qui suit le schéma des robots actuel, dit de la « troisième génération ».

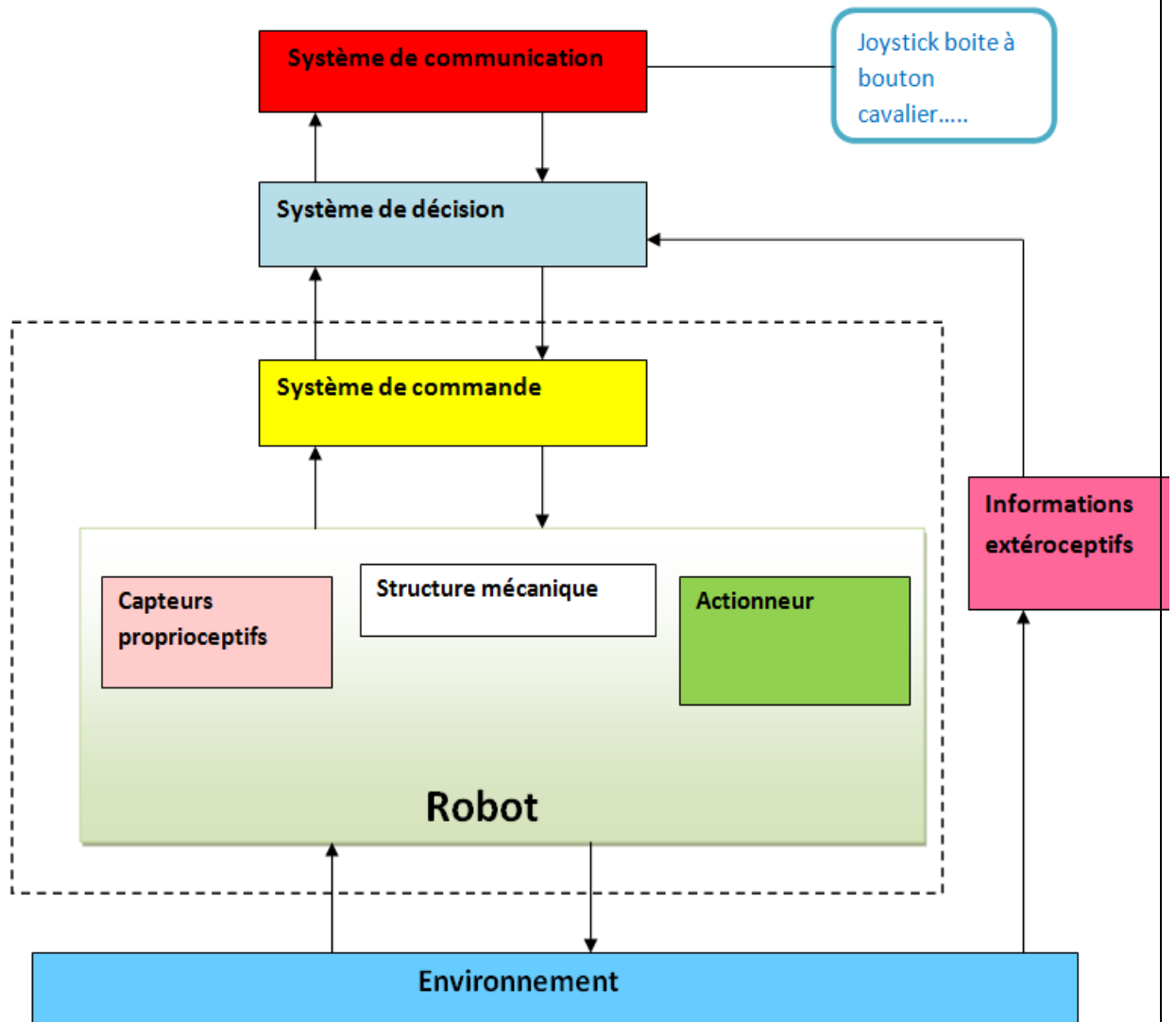


Figure.1.1 Les composants de l'automatisation (adaptée).

1.1.1. Domaine d'application de la robotique industrielle à la robotique de service :

Pour une grande majorité des robots ...

- tâche simple
- tâche répétitive (grande série)
- qualité sur la tâche (vitesse, précision)
- pénibilité de la tâche (peinture, charge lourde, environnement hostile,...).

L'avenir est à l'autonomie ...

- tâche complexe
- interaction avec l'environnement (+ utilisateur)
- module de décision (+ sécurité)

1.1.2 Domaine d'expertises :

- Mécanique
- Automatique
- Informatique
- Mathématique appliquée
- Analyse numérique, Optimisation,
- Géométrie algébrique, Algorithmique,
- Vision par ordinateur, Traitement d'images,
- Intelligence artificielle
- CAO
- Mécatronique

On distingue classiquement 4 parties principales dans un robot manipulateur :

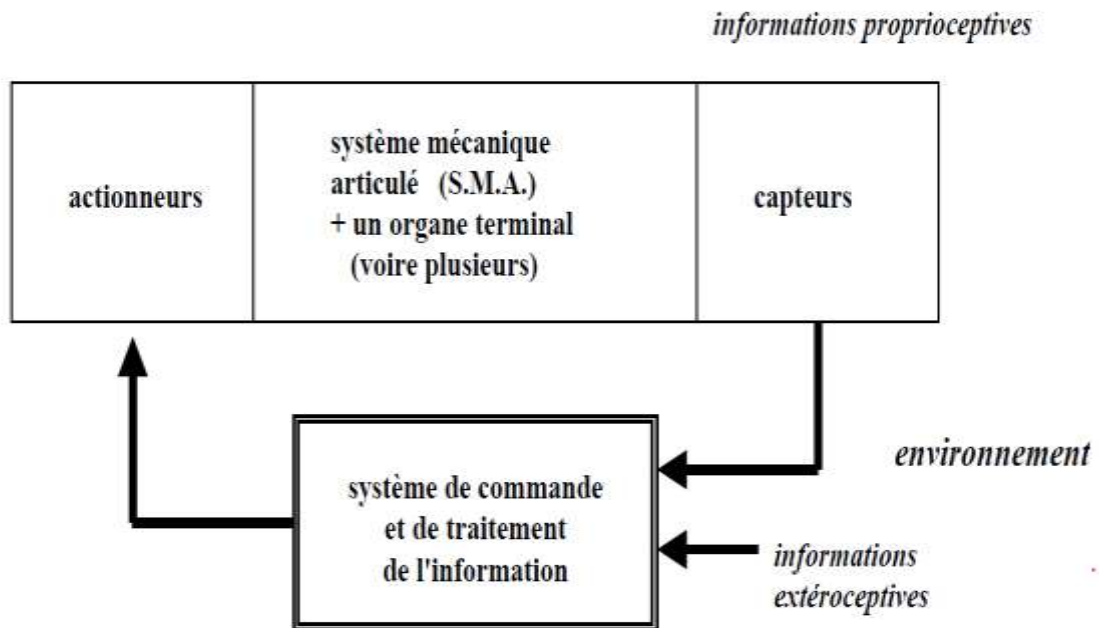


Figure 1.2. Structure d'un système de robot.

1.2. Classification des robots :

On retiendra pour notre part 3 types de robot :

- **Les manipulateurs :**
 - Les trajectoires sont non quelconques dans l'espace,
 - Les positions sont discrètes avec 2 ou 3 valeurs par axe,
 - La commande est séquentielle.

- **Les télémanipulateurs,** appareils de manipulation à distance (pelle mécanique, pont roulant), apparus vers 1945 aux USA :
 - Les trajectoires peuvent être quelconques dans l'espace,
 - Les trajectoires sont définies de manière instantanée par l'opérateur, généralement à partir d'un pupitre de commande (*joystick*).

- **Les robots :**
 - Les trajectoires peuvent être quelconques dans l'espace,
 - L'exécution est automatique,
 - Les informations extéroceptives peuvent modifier le comportement du robot.

➤ **Les robots manipulateurs industriels,**

Chargés de manipuler, soient :

Des pièces : Stockage – déstockage,
 Palettisation – dépalettisation,
 Chargement – déchargement de machine outil,
 Manipulation d'éprouvettes,
 Assemblage de pièces, ...

Des outils : Soudure en continu ou par points,
 Peinture,
 Collage,
 Ebavurage, ...

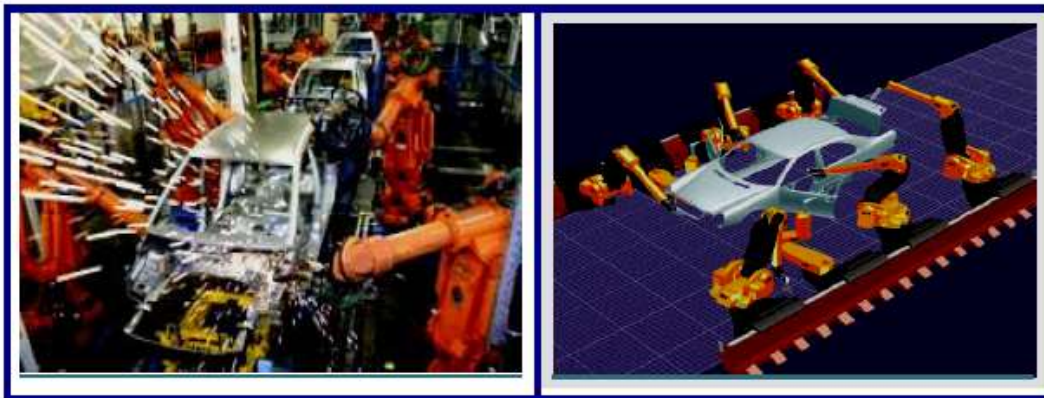


Figure 1.3. Robots industriels de soudage et de peinture

1.2.1. Liaisons entre deux solides :

Une liaison entre deux solides est une relation de **contact** entre deux solides.

- a) **Degrés de liberté d'une liaison** : C'est le nombre de déplacements élémentaires indépendants autorisés par cette liaison.
- b) **Classe d'une liaison** : C'est le nombre de déplacements élémentaires interdits. On notera que pour une liaison, la somme des degrés de liberté et de la classe de la liaison est égale à 6.

➤ Degrés de liberté (dans l'espace) : 6 ddl

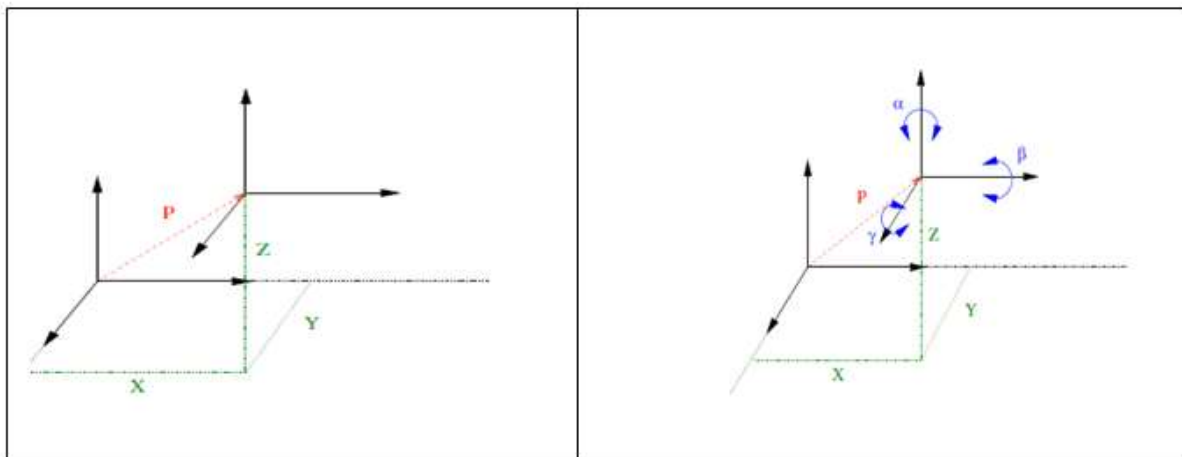


Figure 1.4. 3 en position, 3 en orientation

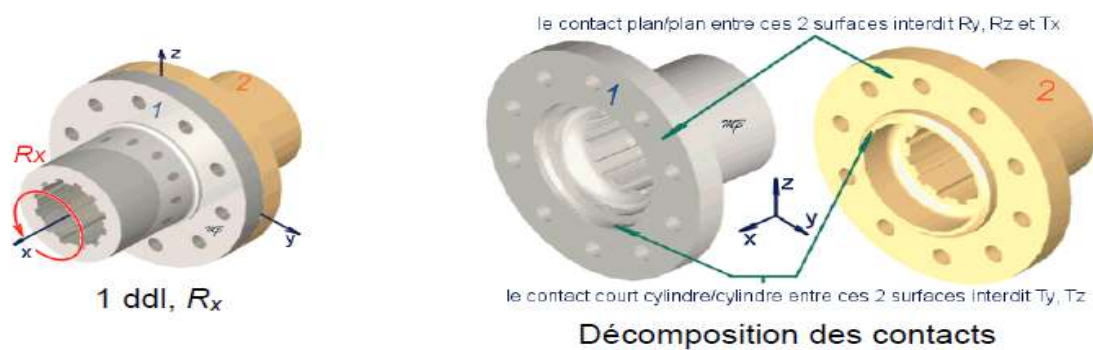


Figure 1.5. Liaisons entre deux solides : exemple Contact Plan/Plan [1].



Figure 1.6. Exemple Contact Plan/Plan

Le tableau suivant qui représente les liaisons usuelles :

Nom de la liaison	Représentation planes	Perspective	Degrés de liberté		Mobilités
			Trans	Ori	
Encastrement de centre B			$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	Anim
Glissière de centre A et d'axe X			$\begin{pmatrix} T_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	Anim
Pivot de centre A et d'axe X			$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} R_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	Anim
Pivot glissant de centre C et d'axe X			$\begin{pmatrix} T_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} R_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	Anim
Hélicoïdale de centre B et d'axe Y			$\begin{pmatrix} 0 \\ T_y \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ T_y * 2p/p \\ 0 \end{pmatrix}$	Anim
Appui plan de centre D et de normale Z			$\begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ R_z \end{pmatrix}$	Anim



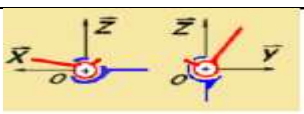
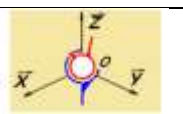
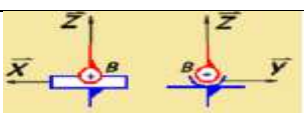
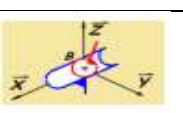
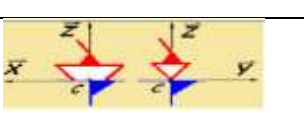
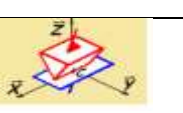
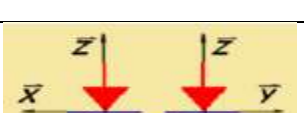
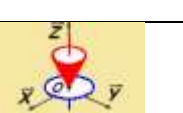
Rotule de centre O			$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{pmatrix}$	Anim
Roule à doigt de centre O d'axe X			$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ R_y \\ R_z \end{pmatrix}$	Anim
Linéaire annulaire de centre B et d'axe X			$\begin{pmatrix} T_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{pmatrix}$	Anim
Linéique rectiligne de centre C d'axe X et de normale Z			$\begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} R_x \\ 0 \\ R_z \end{pmatrix}$	Anim
Ponctuelle de centre O et de normale Z			$\begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{pmatrix}$	Anim

Tableau.1.1. Tableau des liaisons usuelles. [2]

1.3. Les articulations des robots :

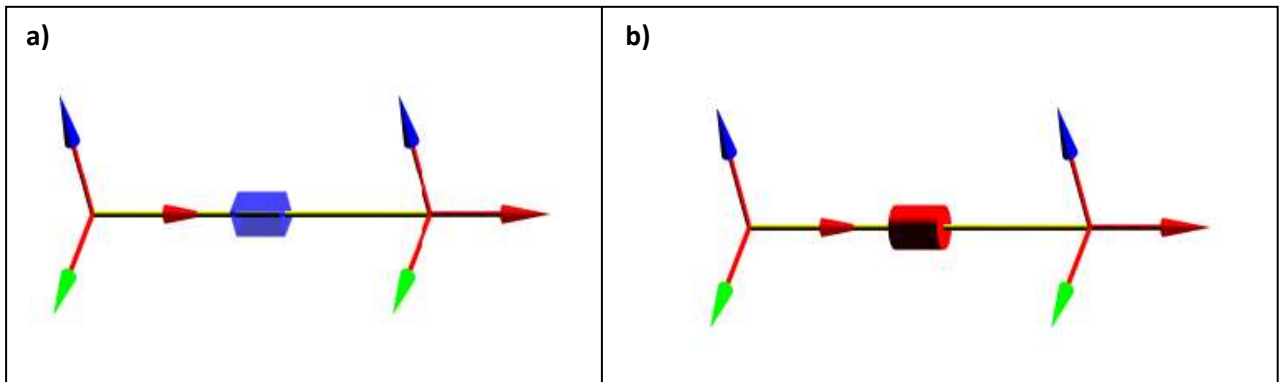


Figure 1.7. a) Articulation prismatique (noté P). b) Articulation rotoïde (noté R)

- 1 ddl en translation T_z , Valeur articulaire q = longueur [m].
- 1 ddl en rotation R_z , Valeur articulaire q = angle [rad]; [°].

1.3.1. Articulation de ddl ≥ 2 :

Dans la plupart des cas, pour modéliser une articulation de ddl ≥ 2 , nous nous ramènerons à une succession d'articulations P ou R.

Exemples :

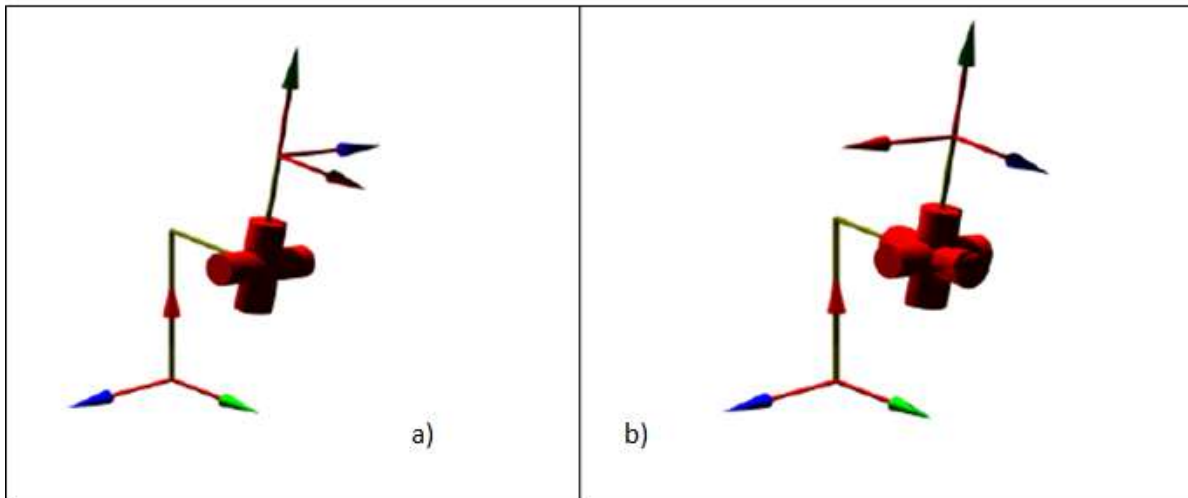


Figure 1.8. a) Articulation cardan RR (2ddl), b) Articulation rotule RRR = S (ddl).

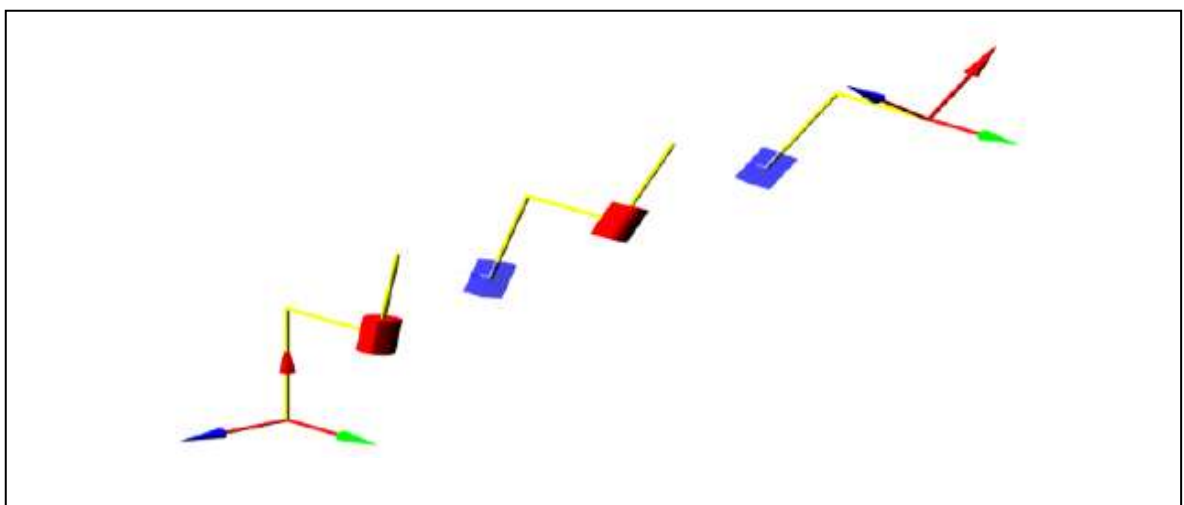


Figure 1.9. Chaîne cinématique RPRP.

Une chaîne cinématique sera définie par une succession d'articulations rotoïdes ou prismatiques.

2.1. SOUDAGE :

2.1.1. Introduction :

Le soudage est un assemblage de matériaux de base ou leur revêtement sous l'effet de la chaleur ou de la pression ou des deux avec ou sans matériau d'apport. L'assemblage est indémontable. Les matériaux de base sont assemblés de préférence dans un état plastique ou liquide dans la zone de soudage.

Le soudage a beaucoup remplacé le rivetage dans la construction de charpentes métalliques. Dans la construction de chaudières et de réservoirs, presque seul le soudage est utilisé. Dans la construction de machines, le soudage (assemblage, découpage) sert surtout pour l'usinage de pièces unitaires ou celui d'un nombre très réduit de pièces (leviers, corps de roues, cadres, carters, tambours d'enroulement, etc.....). Le soudage peut aussi être utilisé dans la réparation de fissures ou de cassures ou encore dans le revêtement pour le renforcement des pièces ou pour le remplissage des zones usées.

2.1.2. Les avantages :

Les avantages des assemblages soudés, par rapport ceux qui boulonnés ou rivetés, sont :

- ✓ Les constructions soudées en atelier reviennent moins chères.
- ✓ Dans les constructions métalliques, de chaudières et de réservoirs, il n'y a pas diminution de la résistance comme celle causée par les têtes de rivets et de boulons.
- ✓ Les recouvrements et les couvre-joints sont inutiles, d'où un nettoyage facile et une meilleure esthétique et les constructions sont plus légères.
- ✓ Les risques de corrosion sont minimaux.

2.1.3. Les inconvénients :

- ✓ L'assemblage n'est possible que pour les mêmes types de matériaux.
- ✓ Les risques de déformation (retrait) existent.
- ✓ La transformation de structure des matériaux causée par les hautes températures peuvent provoquer une fragilisation de la zone de soudage.
- ✓ Souder sur chantier est plus difficile et plus cher, le positionnement des poutres des charpentes métalliques est difficile et le contrôle des cordons est souvent impossible.

2.1.4. Soudabilité :

La soudabilité englobe l'aptitude au soudage, conditionnée par les types des métaux de base et d'apport, et la sûreté de soudage, influencée par le type de construction, par le procédé de soudage, par la préparation du cordon, par la sollicitation, par la suite de soudage, ainsi que par la déformation à chaud ou à froid.

2.2. Mis en situation :

2.2.1 : soudage par point :

2.2.1.1. Généralité :

Ce procédé permet le soudage des pièces à assembler par recouvrement, sans métal d'apport. Les pièces sont maintenues en contact sous un effort d'accostage exercé par les deux électrodes.

Un courant de basse tension et de forte intensité passe alors dans une zone très localisée.

Ce courant induit un chauffage par effet joule provoquant la fusion des pièces dans la zone de leur (noyau). Après coupure du courant, l'effort, toujours appliqué, forge la soudure.

Ce procédé est plus particulièrement utilisé dans la réalisation des liaisons des châssis et carrosseries des voitures.

Une succession de point de soudage permet de réaliser des liaisons complètes indémontables entre deux tôles.

2.2.2. Procédé de Soudage par résistance :

Le soudage par résistance est un procédé simple et rapide, qui produit la chaleur grâce à la résistance.

Électrique à l'interface en appliquant un effort de serrage, et une forte intensité électrique. C'est un procédé de soudage sans atmosphère protectrice.

La première technique du soudage par résistance électrique était le soudage par points inventée par Pr. Elihu Thomson en 1877. Puis, la première machine de soudage a été construite et brevetée en 1885-[MES99]. Les raisons pour lesquelles le soudage par point est largement répandu dans l'industriel automobile sont le faible coût de fabrication par rapport à la qualité de l'assemblage obtenu, et l'automatisation de procédé. Environ 3000- 4000 points soudés par ce procédé se trouvent dans une structure caisse.

1. Le soudage **par points** donnant lieu à une soudure par recouvrement discontinu.
2. Le soudage **à la molette** est une soudure par recouvrement continue et étanche.
3. Le soudage **par bossages** ou protubérances. Le soudage de composants annulaires entre dans ce type de procédé, dans ce cas il étanche.

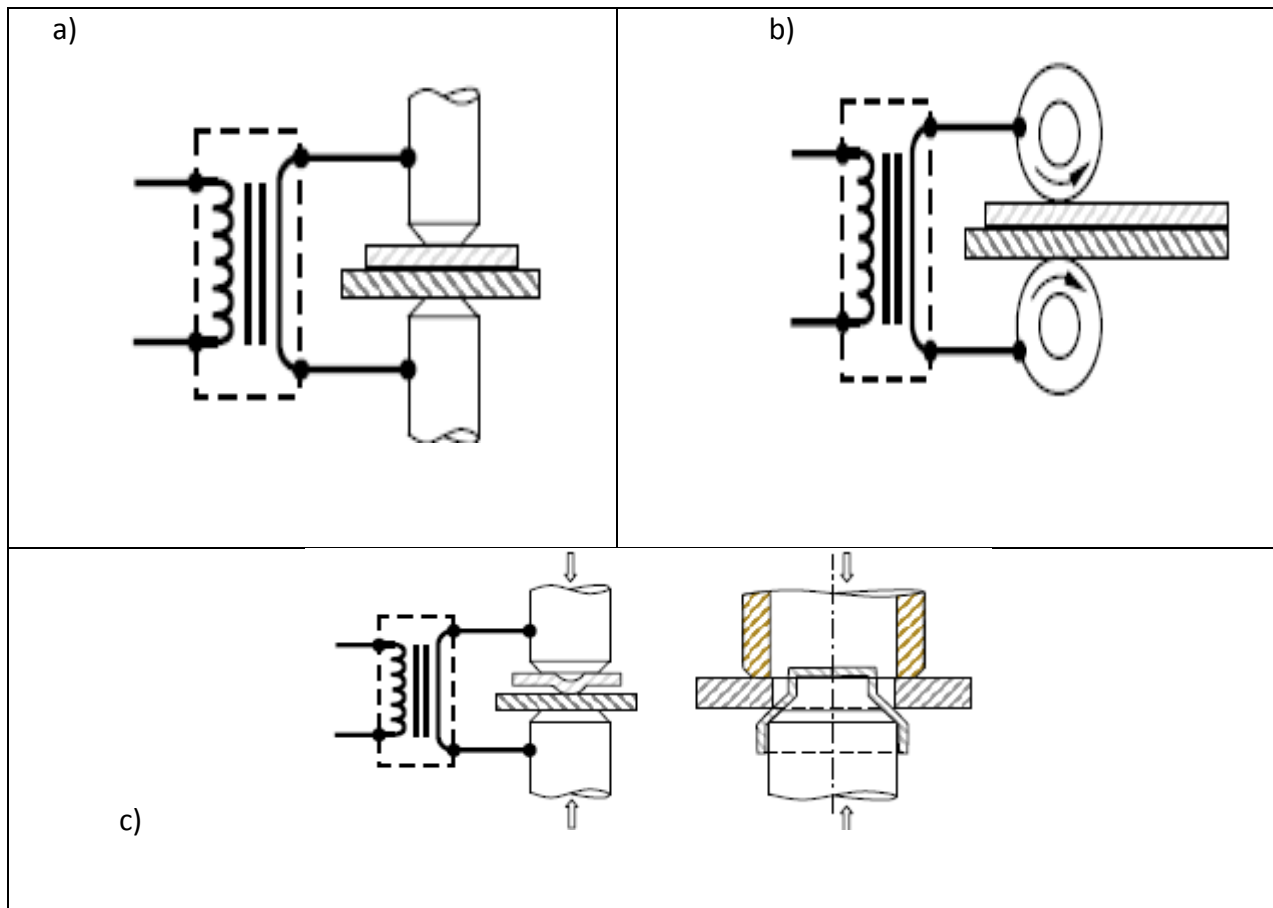


Figure 2.1. Procédés de soudage par résistance électrique, a) soudage par points, b) soudage à la molette, c) Le soudage par bossages [3].

2.2.2.1. Le soudage par bossage :

a) le principe :

Ce procédé est également appelé soudage par protubérances ou soudage par Projections.

Il permet de réaliser des assemblages continus ou discontinus par superposition ; mais il se distingue du soudage par points ou à la molette en ce que la localisation du courant et de

l'effort sur la zone de soudage n'est pas obtenue par les électrodes, mais par la géométrie des pièces à souder elles-mêmes. Il est, de plus, un procédé de soudage global

La figure 2.2 donne trois exemples typiques d'assemblage par bossages ou s'y ramenant :

- 1- Soudage de deux tôles à plat. L'une des tôles a reçu préalablement par emboutissage un certain nombre de bossages qui vont servir à localiser courant et effort.
- 2- Soudage d'une bride sur une plaque, sur toute la périphérie ; la soudure est continue et étanche et s'effectue par la fusion du chanfrein prévu dans ce but.
- 3- Soudage de deux fils en croix. C'est le cas intéressant où la localisation est naturelle et où les pièces ne doivent subir aucune préparation.

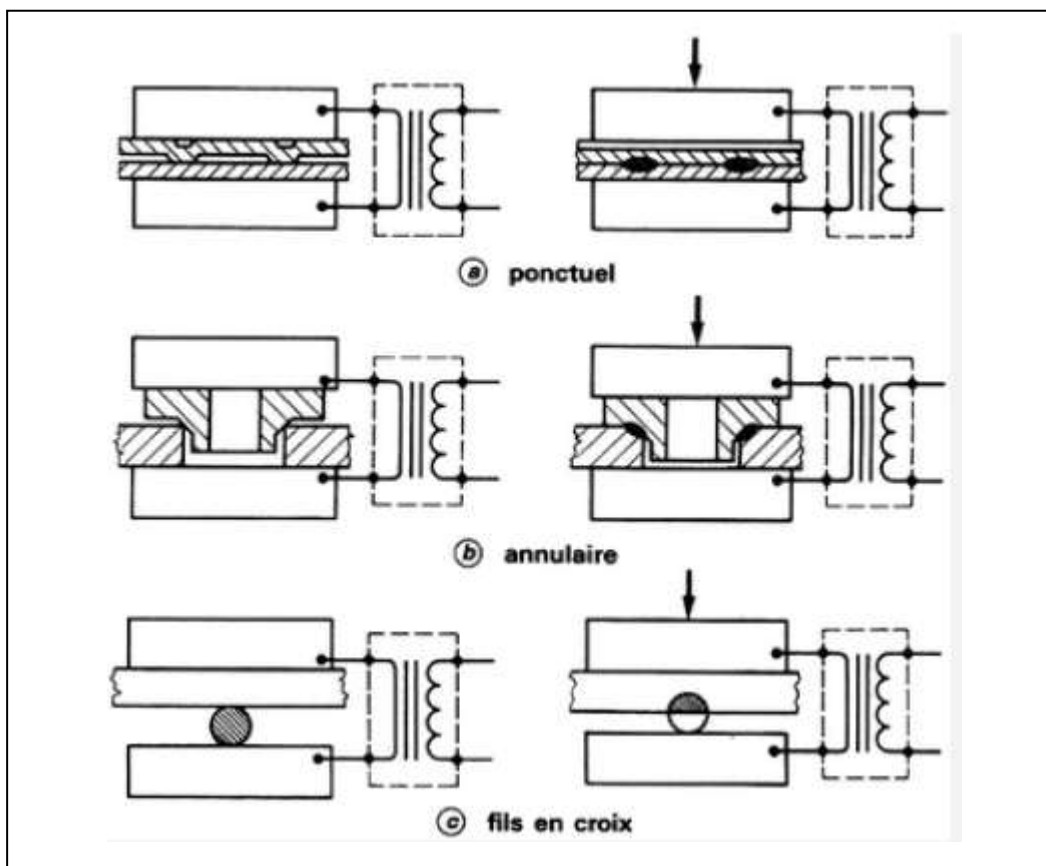


Figure 2.2. Soudage par bossages : exemples typiques [4]

2.2.2. 2. Le soudage à la molette :

a) le principe :

Le soudage à la molette diffère du soudage par points en ce que les électrodes classiques sont ici remplacées par des disques en cuivre, ou *molettes*, qui par rotation permettent de faire des soudures par recouvrement, continues et étanches.

La soudure se réalise de façon progressive et continue, associant serrage des tôles et passage du courant, sur toute la longueur du cordon à réaliser.

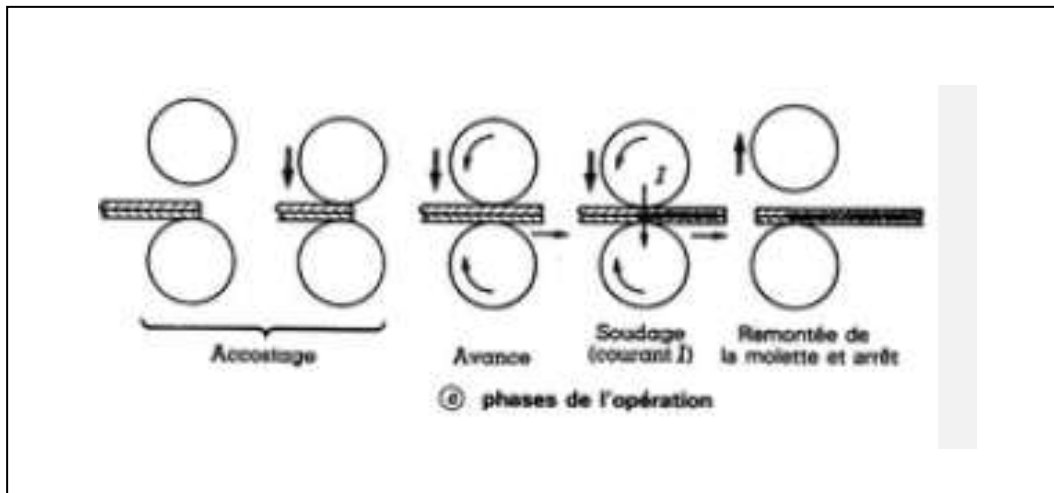


Figure 2.3. Soudage à la molette [5]

Dans notre travail, on va faire une étude générale sur le soudage par point.

2.3. Principe du Procédé (soudage par point) :

Le soudage par points est un procédé d'assemblage discontinu, il est possible de réaliser des recouvrements de points. C'est un procédé utilisé pour des assemblages de tôles en acier doux, alliés, non alliés inoxydable, aluminium, etc.... les épaisseurs sont généralement comprises entre 0,5 et 10 mm

2. 3.1 Déroulement du cycle de soudage par point :

Un cycle de soudage se décompose en quatre phases :

- **l'accostage** : les électrodes se rapprochent et viennent se serrer sur les pièces à souder à l'endroit prévu et sous un effort donné.
- **le soudage** : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur du circuit de puissance, et doit, par effet Joule, produire assez de chaleur à l'interface tôle-tôle pour qu'une zone fondue apparaisse.
- **le forgeage** : effectué avec maintien de l'effort mais sans passage de courant, il permet au noyau fondu de se refroidir et de se solidifier en restant confiné.
- **la remontée de l'électrode** : l'ensemble des deux tôles peut alors être translaté afin de procéder à la soudure d'un nouveau point.

Le principe du soudage par points schématisé sur la **Figure 2.4** illustre les deux tôles d'acier d'usage général.

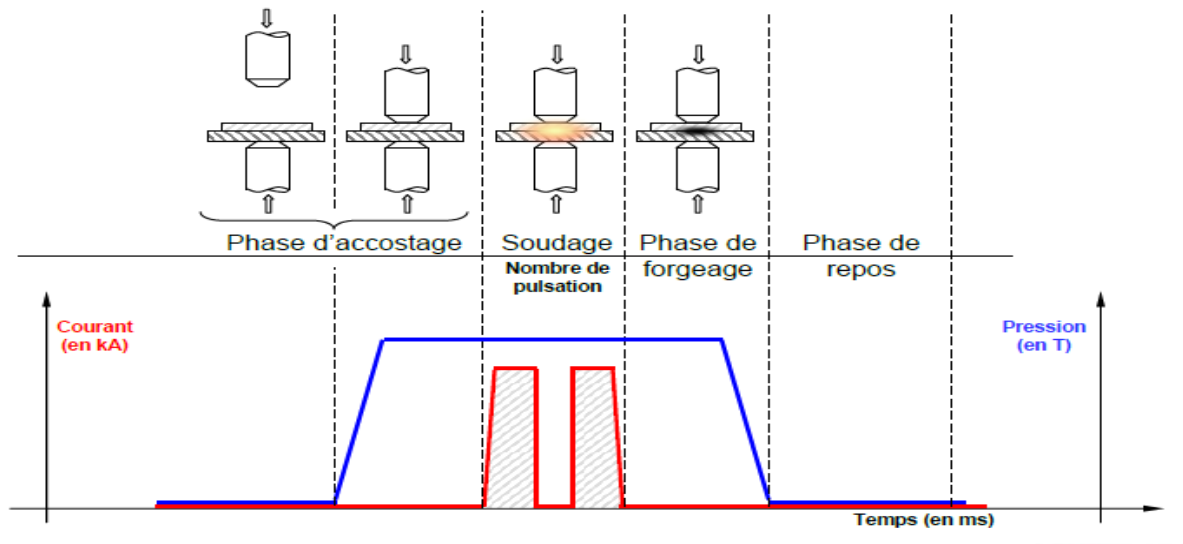


Figure 2.4 : Représentation schématisée des phases du procédé de soudage par point. [6]

Pour éviter leur surchauffe, les électrodes sont refroidies par une circulation d'eau interne (**Figure 2.5**).

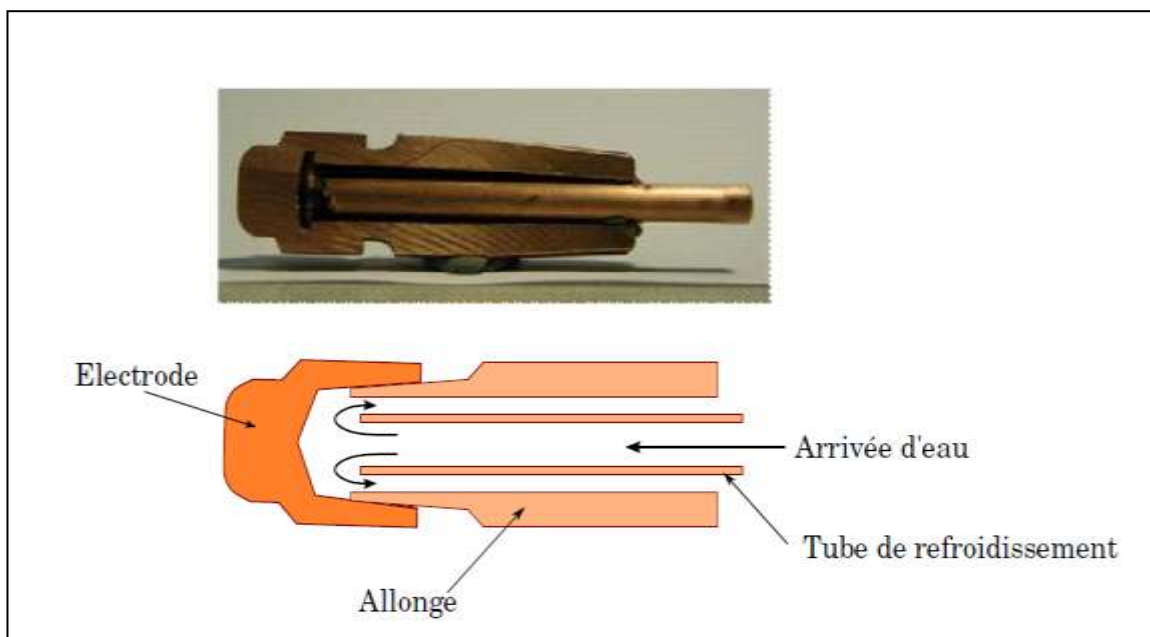


Figure 2.5 : Photo et schéma du circuit de refroidissement d'une électrode [7].

2.3.2 Paramètres du Procédé :

Les paramètres de soudage par point son essentiellement :

2.3.2.1. Le diamètre des électrodes :

On admet que la zone fondue a un diamètre transversal $\langle d \rangle$ compris entre D et $1,2 * D$, étant le diamètre des électrodes.

De plus Une règle tirée d'expérience établit la relation entre le diamètre d'électrode D et les épaisseurs à souder e (mm) : $D = 5 * \sqrt{e}$

2.3.2.2. L'effort de serrage F :

Il est appliqué avant, pendant et après le passage du courant. La valeur de l'effort, généralement comprise entre **2** et **3kN**, dépend essentiellement des Caractéristiques mécaniques et de l'épaisseur des tôles.

2.3.2.3. Le courant de soudage:

Il dépend de la nature et de l'épaisseur des tôles. Typiquement, le courant est alternatif (ou bien continu) monophasé de fréquence **50Hz** et l'intensité efficace varie de **8** à **15kA**.

2.3.2.4. La durée de soudage Δt_s :

Ce paramètre est aussi lié aux propriétés des tôles, il est Habituellement compris entre **140** et **300ms**.

2.3.2.5. La durée de forgeage Δt_f :

Elle est du même ordre de grandeur que la durée de soudage.

2.4.6. La cadence :

Ce paramètre correspond au nombre de points réalisés en une minute. Cette valeur peut aller d'une dizaine de points par minute jusqu'à une cinquantaine.

2.3.3. Mécanisme de formation de la soudure :

La chaleur servant à faire fondre l'acier au niveau du contact tôle-tôle est créée par effet Joule durant le passage du courant dans les conducteurs. La quantité de chaleur dégagée pendant la durée t en fonction de l'intensité du courant et de la résistance électrique traversée est donnée par la relation suivante :

$$Q = \int_{\tau_0}^{\tau_0+t} Ri^2 d\tau \quad (2.1)$$

Où

Q : est la quantité de chaleur générée

R : est la résistance électrique dynamique globale des pièces

i : est l'intensité de courant de soudage

t : est le temps de passage du courant

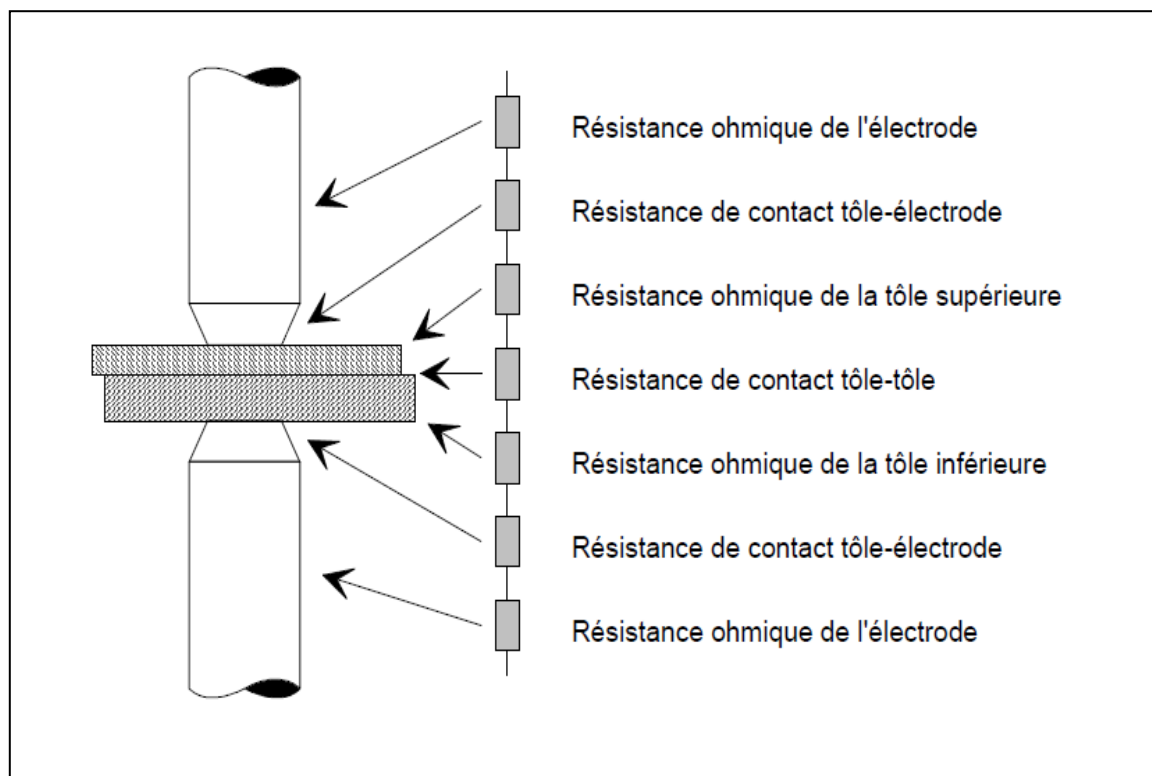


Figure 2.6 : Circuit électrique équivalent d'un assemblage de deux tôles nues [8]

Si l'on néglige les phénomènes capacitifs, l'équivalent électrique de l'assemblage de soudage par points est constitué de résistances en série (**Figure 2.6**) Le dégagement de chaleur est donc maximal à l'endroit où la résistance est la plus élevée.

Dans la pratique, les résistances de contact sont, au début d'un cycle de soudage, plus grandes que les résistances ohmiques des tôles et des électrodes. Dans le cas de produits revêtus, il est possible d'utiliser le même modèle que celui de la (**Figure 2.6**) (les résistances des revêtements étant alors incluses dans les résistances de contact), ou de compléter le modèle en ajoutant quatre résistances ohmiques du revêtement.

Ces diverses résistances, qui ont une influence directe sur les dégagements de chaleur, donc sur la constitution du noyau fondu, ne sont pas constantes au cours d'un cycle de soudage.

Elles dépendent en effet fortement de la température :

- ✓ les résistances ohmiques augmentent en fonction de la température.
- ✓ les résistances de contact diminuent lorsque la température augmente. En effet, les contacts étant initialement "ponctuels" plutôt que surfaciques, ces résistances dépendent directement, à pression donnée, des caractéristiques mécaniques des matériaux en contact et de leur état de surface : la dureté des matériaux diminuant avec l'échauffement, les surfaces de contact augmentent. Il y a donc une diminution des résistances de contact avec la température.

En début de soudage, les dégagements de chaleur les plus importants sont situés au niveau des différentes discontinuités de l'assemblage :

- ✓ à l'interface tôle-tôle, cette chaleur sert à faire fondre le revêtement et l'acier afin de former le noyau fondu.
- ✓ aux interfaces électrode - tôle, cette chaleur - qui ne contribue pas à la formation de la soudure - est en partie évacuée par les électrodes, qui, outre une bonne conductivité électrique, doivent par conséquent avoir une conductivité thermique élevée.

La **figure2.7** représente les évolutions des différentes résistances au cours d'un cycle de Soudage dans le cas de tôles non revêtues.

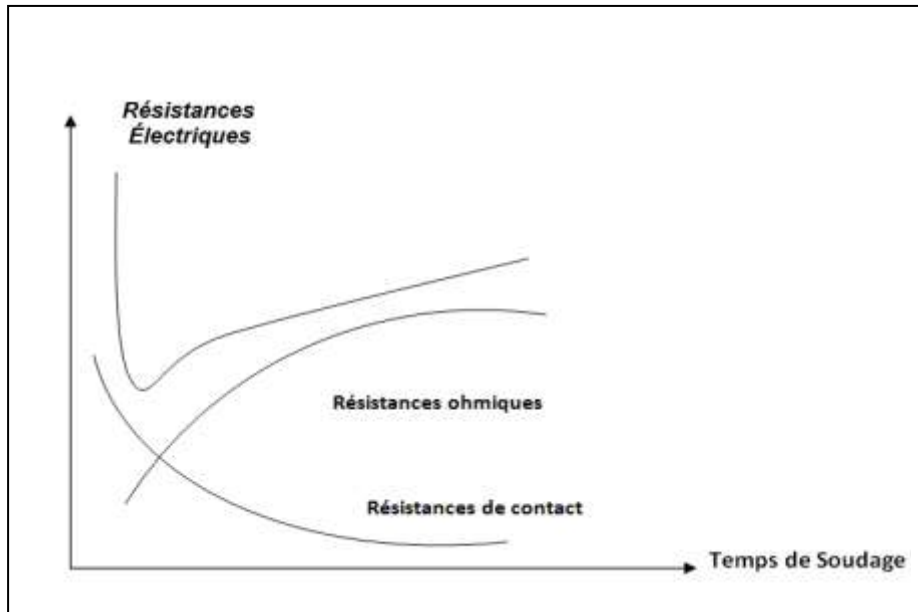


Figure 2.7 : Évolution des résistances en cours de soudage sur tôles [9]

L'analyse des évolutions de ces résistances permet de mieux comprendre la cinétique de déformation du point : l'échauffement est réalisé en premier lieu au niveau des interfaces, et l'électrode évacue les calories créées à l'interface tôle-électrode. Le noyau fondu s'initie à l'interface tôle-tôle et ne progresse que grâce aux résistances ohmiques des tôles. Dans le cas de tôles revêtues, le graphe de la **Figure 2.7** se complique sensiblement, car il faut tenir compte de la résistance ohmique du revêtement ainsi que de sa température de fusion. Il est difficile de définir une tendance générale car certains revêtements ont une résistivité plus faible que celle de l'acier, tandis que d'autres ont une résistivité plus élevée (cas des revêtements organiques).

2.3.4. Microstructures d'un Point Soudé :

La géométrie d'un point est définie en trois zones métallurgiquement distinctes :

- La zone fondue,
- la zone affectée thermiquement (ZAT), (ou la zone affectée par la chaleur)
- le métal de base.

La géométrie d'un point soudé sur la **Figure 2.8**. Présente trois particularités quel que soit le type d'assemblage. Il s'agit de la discontinuité de l'assemblage, une entaille concentrant les contraintes en cas de sollicitation mécanique, et l'indentation d'électrode des surfaces externes de l'assemblage.

Généralement, la taille du noyau est symétrique par rapport à son plan de section s'il s'agit d'un celui d'un assemblage homogène. Le noyau dissymétrique est également envisagé dans le cas de l'assemblage hétérogène ou d'un mauvais alignement entre l'axe vertical d'électrodes. Qualitativement, la tenue mécanique d'un point dépend du diamètre du noyau. Plus la taille est importante, plus la tenue en mécanique est élevée. Le critère de soudabilité est donc défini en basant sur la recherche de l'intensité de soudage nécessaire afin d'engendrer le diamètre du noyau minimal et maximal.

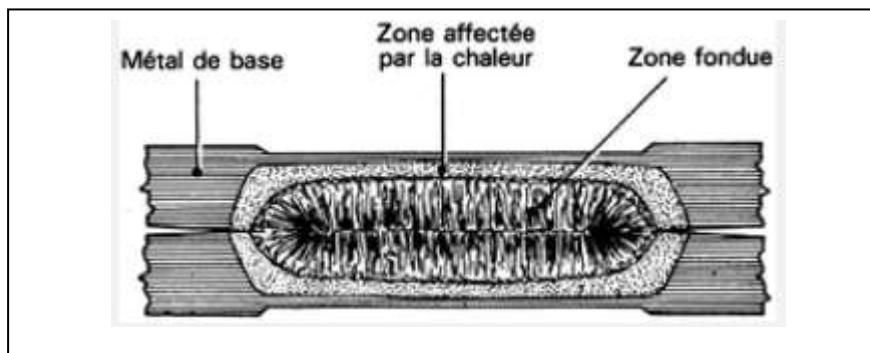


Figure.2.8. coupe d'un point de soudure [10]

Si l'on effectue une coupe transversale d'un point assurant la soudure entre deux tôles, par des moyens métallographiques (sciage, polissage et attaque chimique) il devient possible d'observer la section du point et de son environnement

2.3.5. Formation de la soudure par points :

Dès le serrage des électrodes, nécessaire à l'accostage des tôles, le contacteur primaire se ferme et le courant s'établit dans le circuit secondaire. Il traverse les pièces à souder et rencontre, entre les électrodes, un certain nombre de résistances électriques (Figure.2.9) les une localisées aux interfaces (R_1 , R_2 , R_3) et les autres réparties dans la matière (R_4 , R_5)

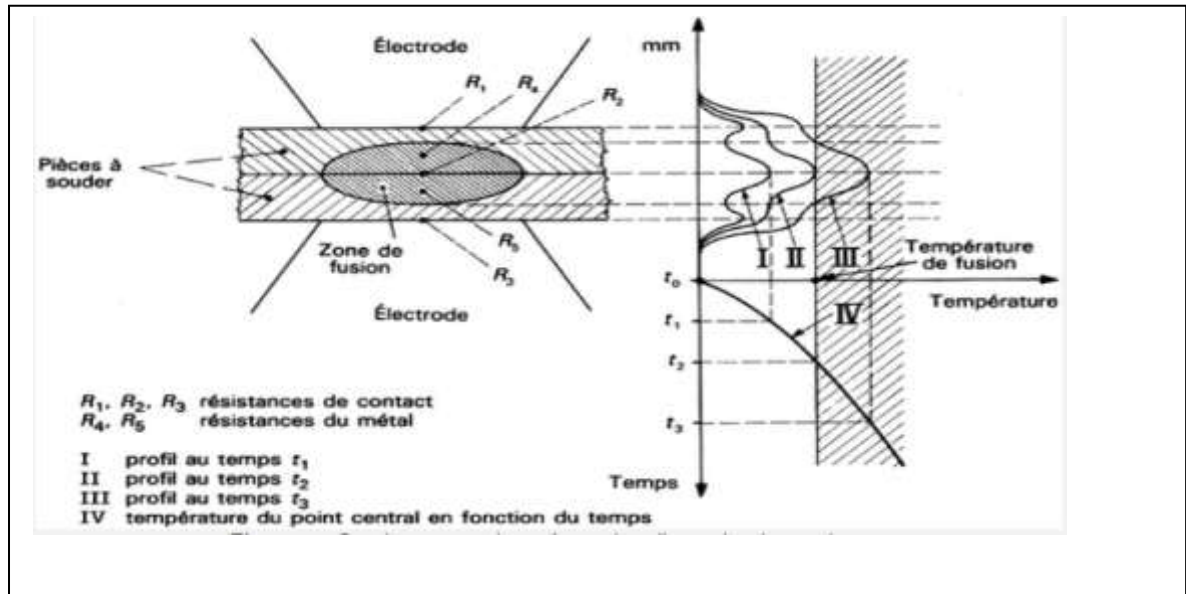


Figure.2.9.température du point central en fonction du temps [10]

Les premières résultent des phénomènes de contact. Ceux-ci, limités au début aux aspérités, se multiplient sous l'effort de serrage E et les résistances évoluent selon une loi $R = f(1/E)$. Les secondes sont dues à la résistivité des matériaux.

Par effet Joule, la température s'élève dans la zone de soudage, en premier lieu aux interfaces, où la résistance d'abord prépondérante diminue, puis dans la matière elle-même où la résistivité augmente avec la température. Au bout d'un certain temps, la fusion est atteinte au point central et progresse dans le plan de joint sous la forme d'un lingot formé en vase clos, qui atteint un diamètre comparable à celui des électrodes : le point de soudeur.

Le courant est alors interrompu. Le métal en fusion se refroidit, formant la liaison des deux tôles, les électrodes restant serrées avec effet de forgeage jusqu'au refroidissement quasi complet.

2.4. Phénomènes Électriques dans le Procédé de Soudage Par Points :

2.4.1. Les électrodes :

Les électrodes sont des éléments essentiels pour ce procédé. Un type d'électrode en profil tronconique à face active hémisphérique est présenté sur la **Figure2.8** C'est un paramètre externe, qui influe directement sur le domaine de soudabilité car il gouverne la taille du contact aux interfaces par son profil de face active. L'électrode joue trois rôles principaux :

2.4.1.1. Mécanique :

C'est d'abord pendant la phase de serrage pour assurer le contact électrique entre les tôles avec la mise en charge jusqu'à sa valeur définie pour le soudage. Pendant le soudage et le maintien, l'électrode sert comme une stabilisatrice pour maintenir la zone fondue pendant le chauffage et le refroidissement. Par conséquent, le matériau de l'électrode doit avoir une bonne tenue mécanique à chaud.

2.4.1.2.électrique :

La forte intensité de soudage s'applique via les deux électrodes sans chauffer intérieurement. L'électrode donc doit avoir une bonne conductivité électrique.

2.4.1.3. Thermique :

L'électrode est un passage pour la chaleur évacuée de la zone chaude dans l'assemblage à l'eau de refroidissement. Pendant le soudage, la chaleur générée à l'interface électrode/tôle doit être évacuée rapidement afin d'éviter que la zone fondue n'atteigne cette interface. Le matériau de l'électrode donc avoir une bonne capacité calorifique ainsi qu'une bonne conductivité thermique.

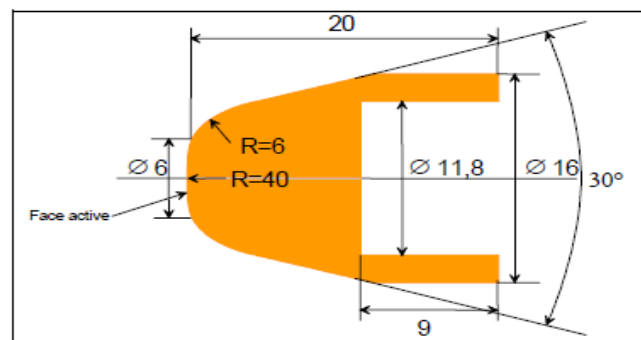


Figure2.10. Section d'une électrode tronconique à face active hémisphérique de diamètre de 6-mm [11.]

2.4.2. Les différents effets électriques :

Il s'agit de différents effets électriques, qu'on peut envisager dans une opération de soudage par point comme :

- Effet Seebeck
- Effet Peltier
- Effet Thomson
- Effet de peau

2.4.2.1. Effet Seebeck : [12]

En 1823 (T. J) Seebeck découvrit qu'une tension se développe par le gradient de température entre deux connexions de deux métaux homogène ou dissimilaire. La tension engendrée par le gradient thermique s'écrit :

$$\Delta V_{AB} = S_{AB} (T_1 - T_2)$$

$$S_{AB} = S_A - S_B$$

Où

S_A et S_B : sont respectivement la puissance thermoélectrique absolue des métaux 'A' et 'B'.

2.4.2.2. Effet Peltier : [13]

Ce phénomène thermoélectrique se produit lorsque le courant passe une interface de deux différents métaux. La puissance thermoélectrique produite à cette interface est :

$$Q_B = \pi_{AB} i$$

Où

Le coefficient de Peltier π_{AB} est : $\pi_{AB} = T (S_A - S_B)$

Ce coefficient dépend fortement des caractéristiques physiques de métaux en contact A et B.

Pour le soudage par point, l'effet Peltier n'apparaît qu'à l'interface électrode/tôle en cas d'un assemblage homogène, et la puissance thermique se produit à une interface et s'absorbe à une autre. Le coefficient de Peltier à l'interface électrode/tôle peut être exprimé en fonction de la température

$$\pi_{Fe/Cu} \text{ (mV)} = -1,41 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 1,45 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 1,67 \cdot 10^{-2} \cdot T - 3,08$$

Où

T : est la température absolue.

2.4.2.3. Effet Thomson : [14]

W. Thomson (ou Lord Kelvin) a établi l'effet Thomson après une étude sur les effets Seebeck et Peltier. Ce phénomène thermoélectrique est engendré par le gradient thermique dans le métal. L'absorption réversible et l'évolution de chaleur sont

$$Q_A = \mu_A i \frac{dT}{dx}$$

$$S_A = \int_0^T \frac{\mu_A}{T} dT \quad \text{ou} \quad \mu_A = T \frac{dS_A}{dT}$$

Si le courant passe du côté basse température au côté haute température, le coefficient de Thomson : ' μ_A ' est donc positif et l'absorption de chaleur se produit dans cette zone.

2.4.2.4. Effet de Peau : [15]

L'effet de peau est lié à la distribution non uniforme des lignes de courant sur un conducteur cylindrique produite par la pulsation (' ω ' en ' s^{-1} ') du *courant alternatif*. Les lignes de courant sont concentrées vers la périphérie de conducteur, donc un échauffement local dans cette zone. La profondeur de peau (' δ ') peut être exprimée en termes de deux caractéristiques électromagnétiques du conducteur, qui sont la conductivité électrique (σ en $1/\text{Ohm.m}$) et la perméabilité magnétique (' μ ' [terme ($\mu_r \cdot \mu_0$)] en H/m). Pour un conducteur cylindrique uniforme, la profondeur de peau est calculée par :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \sigma(T)}}$$

Où

La perméabilité magnétique à vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$

2.4.3. Types de Courant de Soudage :

Pour le soudage par points, les deux modes de courant utilisés sont:

- un courant alternatif de 50Hz.
- un courant continu obtenu en redressant un courant alternatif de 1000Hz.

Il s'agit de paramètre décisif de ce procédé car il intervient au carré dans l'énergie dissipée par effet Joule. Modifier la quantité d'énergie reçue par le système revient à jouer sur l'intensité efficace et sur le temps de passage de courant. Ce dernier est souvent exprimé en périodes. Le courant utilisé étant à la fréquence de 50Hz, le temps de soudage d'une période est égale à 0,02 secondes. Précisons qu'aux Etats-Unis, la fréquence étant de 60Hz, le temps de soudage est à modifier par conséquence.

a) Courant Alternatif de 50Hz :

Le type de courant le plus utilisé est un courant monophasé à basse fréquence de 50 Hz. Les générateurs fonctionnent en générateurs de courant, c'est-à-dire, ils peuvent réguler l'intensité efficace sur une consigne, mais de faire en sorte que la moyenne de toutes ces valeurs efficaces soit égale à l'intensité nominale.

Pour le robot soudage par point, le réglage de l'énergie électrique fournie peut être modifié de trois manières

- la modification de la tension au primaire,
- le changement du rapport de bobinage primaire/secondaire au niveau du transformateur, ce qui revient à modifier la tension au secondaire.
- et la suppression d'une partie du courant à l'aide d'un gradateur de courant. En jouant sur le rapport entre durée de fermeture des thyristors et demi-période de soudage, on fait varier l'intensité efficace du circuit primaire et donc du circuit secondaire.

b) Courant Continu de 1000Hz :

Un autre type de courant est, le courante continue moyenne fréquence redressée (MFDC-1000Hz). A cette fréquence, le courant alternatif redressé peut être assimilé à un courant continu. Cette solution a été initialement développée pour le soudage des alliages d'aluminium. En cas d'acier, on attend souvent des bons résultats, tant au niveau de la consommation d'énergie électrique qu'au niveau de la durée de vie des électrodes. Le soudage avec le courant continu permet d'éliminer l'oscillation de l'effort pendant la phase de soudage.

Selon la norme, la durée de passage du courant est recommandée de façon précise. Celle-ci dépend des caractéristiques mécaniques des tôles, de leur épaisseur ainsi que de la présence de l'épaisseur du revêtement. Elle se situe entre 5 périodes pour des tôles nues de 0,5 mm d'épaisseur et 18 périodes pour des tôles revêtues de 1,2-mm d'épaisseur. En cas de tôles plus épaisses, le courant est appliqué en plusieurs pulsations séparées par des « temps froids » de 2 ou 3 périodes. Malgré la durée du procédé plus longue.

2.4.3.1. Signaux de Soudage :

- signal d'effort.
- signal d'intensité.
- signal de déplacement relatif entre deux électrodes.
- signal de tension.

2.4.3.2. Rappel de base d'électricité :

Loi de Joule : Lorsqu'un courant électrique parcourt un conducteur, la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle à la carré de l'intensité du courant et au temps.

$$W \text{ (en joules)} = R \text{ (Ohm)} \times I^2 \text{ (Ampères)} \times t \text{ (secondes)}$$

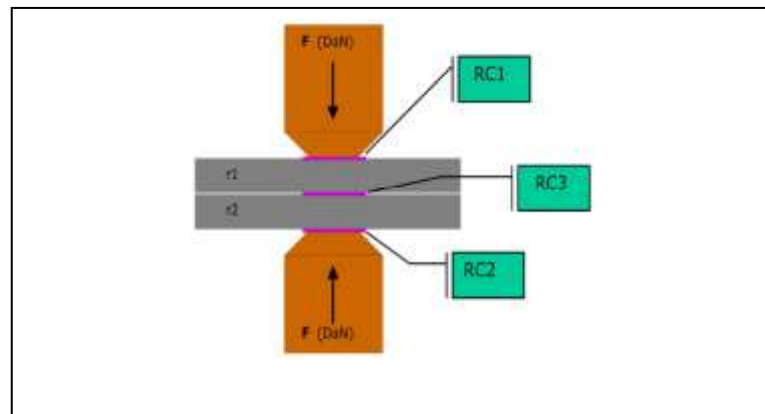


Figure2.11. Les Resistance de contact

Définition de R dans $W = R I^2 t$

RC = Resistance de contact

r = Resistance interne

$$R = RC_1 + RC_2 + RC_3 + r_1 + r_2$$

$$RC_1 + RC_2 + RC_3 > r_1 + r_2$$

- ✓ Un transformateur de courant de soudage (il abaisse la tension, il augmente le courant).
- ✓ Un dispositif de mise en pression des électrodes (pneumatique ou électrique).
- ✓ Un dispositif de commande du cycle de soudage (séquenceurs).
- ✓ Un circuit de refroidissement.

2.5. Assemblages soudés par points :

2.5.1 Généralités :

Le soudage par points est économique pour l'assemblage de tôles fines et de pièces de fines épaisseurs, et surtout quand il s'agit de production en grandes séries ou en masse.

Il est, pratiquement, permis de procéder à un soudage de pièces superposées jusqu'à une épaisseur totale égale à 60 mm et pour des pièces n'excédant pas 20 mm chacune. Le nombre de points de soudure est limité au minimum à 2 et au maximum à 5 dans la direction de la force.

2.5.1.1 Les calculs :

L'assemblage peut être à simple ou à double recouvrement (**figure 2.1**) le diamètre **d** du point de soudure est déterminé en fonction de la plus petite épaisseur de tôle et est choisi à partir du **tableau 2.2**. Pour le calcul on suppose que le point de soudure est une tige de diamètre d_1 soumise au cisaillement. La contrainte de cisaillement est :

$$\tau_s = F / A_1 . n . m \leq [\tau_s] \dots\dots\dots (N/mm^2) \quad (3.1)$$

Où

F : Force de cisaillement en N supportée par le point de soudure.

A_1 : Section calculée du point de soudure en mm^2 : $A_1 = \pi . d_1^2 / 4$, le diamètre $d_1 \cong d$ (**tableau 2.3**) pour des tôles de même épaisseur. Lorsqu'il s'agit de différentes épaisseurs on prend $d_1 \leq 5\sqrt{S_{min}}$ en mm, ou S_{min} est l'épaisseur de l'élément le plus fin en mm, ainsi $d_1 \leq d$

n : Nombre de point de soudure.

m : Nombre de recouvrement de l'assemblage.

$[\tau_s]$: Contrainte admissible du point de soudure en N/mm^2 (**tableau 2.1** Contrainte admissible).

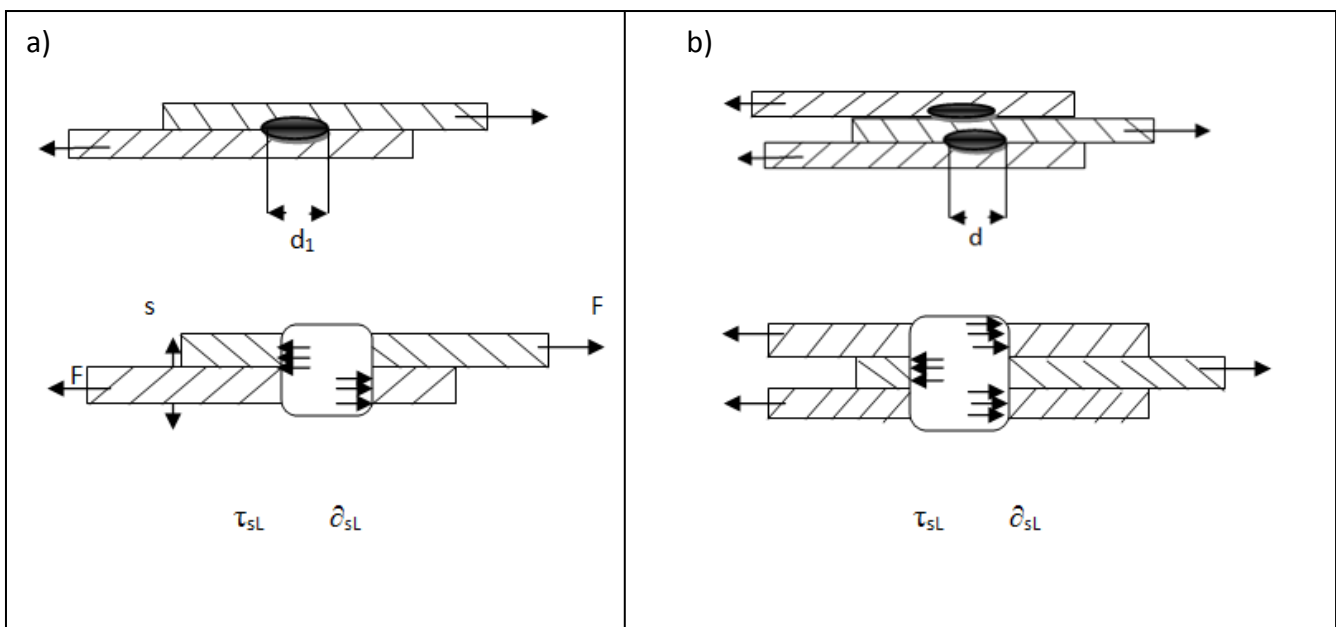


Figure 2.11 Calcul de l'assemblage soudé par point a) simple recouvrement b) double recouvrement [16].

Sur la base de la supposition que le point de soudure peut être remplacé par une tige, on détermine aussi la pression dans la paroi du trou qui est donnée par.

$$\sigma_{sL} = F / d_1 \cdot s \cdot n \leq [\sigma_s] \dots\dots\dots (N / \text{mm}^2) \quad (2.3)$$

Où

F : Force de cisaillement en N supportée par le point de soudure.

n : Nombre de point de soudure.

d₁ : diamètre du point.

s : La plus petite épaisseur de la pièce en mm (pour un recouvrement, il faut additionner les épaisseurs des deux pièces extérieures).

[σ_s] : Pression admissible sur la paroi du trou en (N / mm²) (**tableau 2.1** Contrainte admissible).

Si le point de soudure est soumis à une sollicitation de traction ou de compression on peut poser pour la contrainte admissible [σ_s] = [τ_s]. (**Figure 2.11**) présente des dispositions de soudure par points.

Type de sollicitations	Matériaux					
	A 33		A 37		A52	
Cas de charge	P	PS	P	PS	P	PS
Si la preuve pour le renversement et le						
Simple renversement $[\tau_{sl}]$	79	90	90	104	135	155
Double renversement $[\sigma_{sl}]$	215	250	250	285	375	430
Double renversement $[\sigma_{sl}]$	300	350	350	400	525	600
Si l'évitement de la ceinture pressée n'est pas possible						
Simple renversement $[\tau_{sl}]$	90	104	104	115	155	175
Double renversement $[\sigma_{sl}]$	250	288	288	324	430	485
Double renversement $[\sigma_{sl}]$	350	400	400	450	600	675

Tableau 2.1: contraintes admissibles en N/mm² pour les assemblages soudés par points en construction métallique légère [17]

Si les épaisseurs des tôles sont S_{min} et S_{max} , on détermine le diamètre du point de soudure par rapport à une épaisseur de référence s' **tableau 2.2** qui est donnée par

$$S' = \varphi \cdot S_{min} \dots\dots\dots (mm) \tag{2.4}$$

φ : Facteur correcteur ; on choisit :

S_{max} / S_{min}	2	5	10	>10
φ	1,2	1,5	1,8	2

Tableau 2.2 définir l'épaisseur de tôle

Epaisseur de tôle s_1 s'	Entraxe des points a_1		Distances des rangées		Recouvrement minimal l	Diamètre du point d
	minimale	normale	joints en chaines a_2	joints en quinconces a_3		
0.5	10	20	8	12	12	3
1.0	12	25	10	15	14	4
1.5	15	30	12	20	16	5
2.0	18	36	15	24	18	6
3.0	24	45	20	32	22	8
4.0	30	55	25	38	26	10
5.0	36	65	30	45	30	12
6.0	42	75	35	52	35	14

Tableau 2.3: valeurs de référence pour les joints de soudure par points (les dimensions sont en mm). [18]

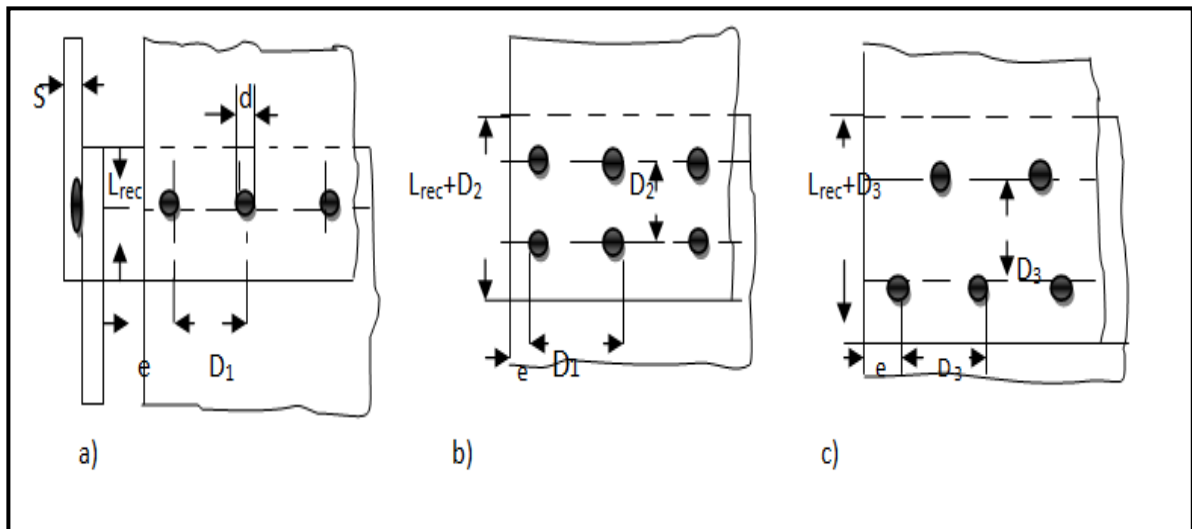


Figure 2.12. Dispositions des soudures par points : a) joint en rangée, b) joint en chaines, c) joint en quinconces [19].

2.5.2. Les tôles qui peuvent souder :

On peut souder des tôles dépourvues de rouille et de peinture de même nature ou de métaux différents à condition qu'ils soient alliés et que leur point de fusion soit très proche

Les métaux tels que les aciers, les aciers alliés, les aciers galvanisés sont soudables par points sous réserve de jouer sur les réglages (intensité, temps de soudage et pression sur les tôles

Pour l'étude de soudage par point, nous utilisons l'acier de construction a usage générale, par se que (e24 / A37)

Une a choisi l'acier de construction a usage générale parce que

- Le plus largement utilisé dans l'industrie
- Bas de fer et de carbone
- Moins cher

2.5.3. Règles de désignation des aciers :

Catégorie	Classés	Réglages de désignation		
Acier de construction d'usage général	Construction mécanique Ex : A 55-2	1	La lettre A (Acier)	
		2	La valeur de la résistance minimale à la rupture par traction (Rr) en daN / mm ²	
		3	Eventuellement l'indice de qualité	
	Construction métallique Ex : E30-3 Ou E355FP	1	Eventuellement le procédé d'élaboration lorsque la norme de référence prévoit pour l'utilisateur la possibilité de fixer le procédé désiré	
		2	La lettre e (limite d'élasticité)	
		3	La valeur de la limite d'élasticité minimale granite (Re) exprimée en daN / mm ² ou N/ mm ²	
		4	L'indice de qualité : 1-2-2Ne-3-4Rc-FP ou D NFA35501 ou NFA36201	
	Acier non alliés Tôles pour chaudières et appareils de pression	Construction métallique Exemple : A48 P 1	1	Eventuellement le procédé d'élaboration lorsque la norme de référence prévoit pour l'utilisateur la possibilité de fixer le procédé désiré
2			La lettre A (Acier)	
3			La valeur de la résistance minimale à la rupture par traction (Rr) en daN / mm ² ou en N / mm ² Selon NF A 56201 (aout 1975)	
4			Les lettres C : chaudière-P appareil à pression CR ou PR	

			<p>Les aciers C ont des garanties de limite d'élasticité à chaud de Re 0.002</p> <p>Les aciers P ont des garanties de niveaux de résilience KCV mesurée à - 20°C sur éprouvettes prélevées dans le sens long</p> <p>La lettre R suivant les lettres C ou P indique que les caractéristiques mécaniques sont garanties sur éprouvettes ayant subit un traitement de relaxation des contraintes à 600°C</p>	
		5	L'indice de qualité 1 ou 2 NF A 56205 (aout 1976)	
Aciers non alliés ou faiblement alliés pour traitement thermique	Aciers non alliés	Aciers de qualités courantes pour traitement thermiques Ex : XC35	1 Les lettres CC (carbone) classe C	
			2 Un nombre entier égal à 100 fois la teneur moyenne en carbone (%)	
			3 Eventuellement la lettre S impliquant une garantie de soudabilité (pour les aciers à faible teneur en carbone) NF A 3551 (mars 1972)	
		Aciers Fins à caractéristiques serrés pour traitement thermiques Ex : XC80		Classe XC : la désignation est exactement la même que ci-dessus, mais la première lettre C est remplacée par la lettre X NF A 3551
	Aciers alliés	Aciers faiblement alliés additions < 5% Ex : 30NC11		1 Un nombre entier égal à 100 fois la teneur moyenne en carbone (%)
				2 Une lettre ou une série de lettres symbolisant les principaux éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes
				3 Un nombre indiquant la teneur de l'élément d'addition contenu dans la plus grande proportion. - Cette teneur est multipliée par 4 pour les éléments C.K.M.N.S - Multipliée par 10 pour D.W.V.A.U.Pb.F.T...ce nombre est arrondi à l'entier le plus proche
				4 Eventuellement Un nombre indiquant la teneur d'un autre élément d'addition, afin de permettre de distinguer deux nuances voisines NF A 35551
	Aciers fortement alliés	Aciers fortement alliés Ex Z30C13		1 La lettre initiale Z
				2 La teneur en carbone, exprimée en centièmes pour cent et multipliée par 100
			3 Le ou les symboles des éléments d'alliage présents, classés dans l'ordre décroissant des teneurs.	

		4	Un ou des groupes de nombre de deux chiffres qui sont égaux en teneurs moyennes (%) en cas éléments, teneurs classées dans l'ordre de symboles précédents (en général un ou deux groupes, exceptionnellement trois) Nf A 02005
--	--	---	--

Tableau 2.4. Les différents aciers qui on peut souder [20].

Le tableau ci-dessous qui représente le procédé de soudure par point se caractérise par ses dimensions qui sont l'épaisseur des tôles à souder.

Aciers doux et mi-durs								Aciers inoxydables 18 / 8						
e	Ø de l'électrode	Soudage lent			Soudage rapide			Ø du point soudé	e	Ø de l'électrode	Effort de pression	Intensité du courant	Temps de soudage	Ø du point soudé
		Effort de pression	Intensité du courant	Temps de soudage	Effort de pression	Intensité du courant	Temps de soudage							
(mm)	(mm)	(N)	(A)	(s)	(N)	(A)	(s)	(mm)	(mm)	(mm)	(N)	(A)	(s)	(mm)
0,5	4	600	2 000	0,2	1 500	4 000	0,04	4	0,5	4	1 750	3 750	0,04	3,5
1	5	1 000	3 000	0,4	2 500	8 000	0,1	5	0,8	4,5	3 000	6 000	0,10	4
2	7	2 000	5 000	1	5 000	14 000	0,3	6,5	1	5	4 000	7 600	0,14	4,5
3	9	3 000	8 000	2	8 000	19 000	0,6	8,5	1,5	6	6 500	11 000	0,20	5,5
4	11	3 800	10 000	3,2	12 500	24 000	0,9	10,5	2	7	9 000	14 000	0,24	6,5
5	13	4 500	12 000	4,5	17 000	28 000	1,4	12,5	2,5	7,5	12 000	16 000	0,28	7
8	19				37 000	40 000	3	18	3	8,5	15 000	18 000	0,32	8
Alliages légers (suivant normes industrielles)						Alliages légers (suivant normes aéronautiques)								
e	r du dôme	Effort de pression	Intensité du courant	Temps de soudage	Ø du point soudé	e	r du dôme	Effort de serrage	Effort de pression de forgeage	Intensité du courant	Temps de soudage	Temps de refroidissement contrôlé	Temps de forgeage	Ø du point soudé
(mm)	(mm)	(N)	(A)	(s)	(mm)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(A)	(s)	(s)	(s)	(mm)
0,5	75	1 800	15 000	0,04	2,8	0,5	75	2 000	6 000	25 000	0,02	0,04	0,02	3
0,8	100	2 300	25 000	0,04	4	0,8	100	3 000	7 000	31 000	0,04	0,08	0,06	4
1	110	2 500	30 000	0,08	4,5	1	110	4 000	8 000	35 000	0,04	0,08	0,08	5
1,5	150	3 200	40 000	0,06	6,2	1,5	150	6 000	13 000	50 000	0,06	0,12	0,12	7
2	180	4 000	50 000	0,08	8	2	180	8 000	18 000	64 000	0,08	0,16	0,14	8,5
2,5	210	5 200	55 000	0,1	9	2,5	210	12 000	26 000	80 000	0,10	0,20	0,18	10
3	240	6 000	60 000	0,12	10	3	240	15 000	36 000	98 000	0,12	0,24	0,20	12

Tableau 2.5. Conditions de réglage [21].

La relation entre le courant de passage et l'épaisseur de tôle représente par la courbe suivante.

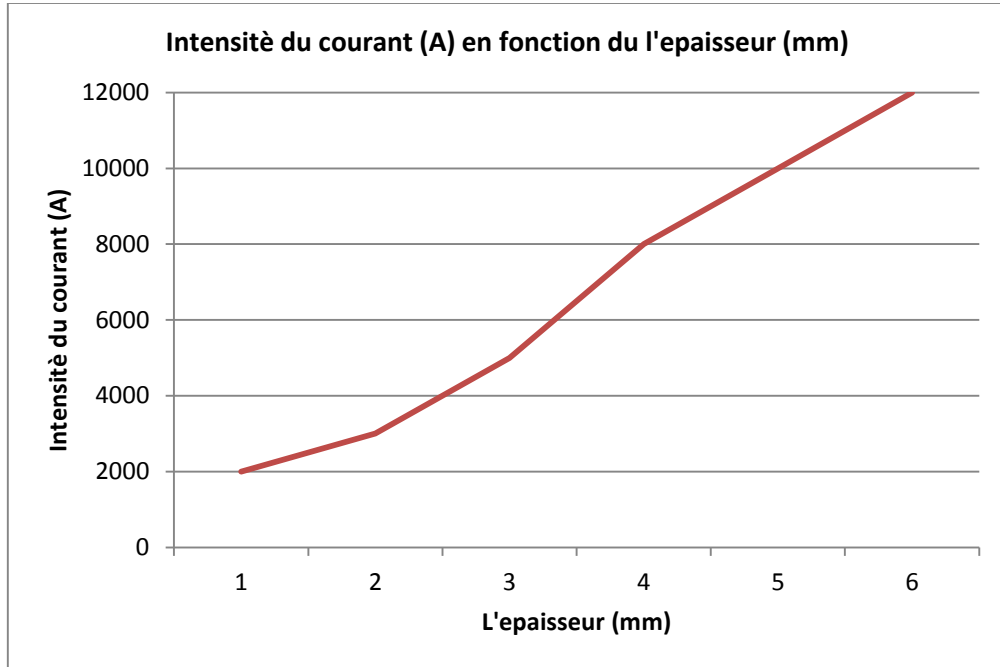


Figure 2.13. Courbe de courant en fonction de l'épaisseur pour l'acier de construction à usage général.

Parti I :

3.1. Contrôle non destructifs :

3.1.1. Historique de CND :

Comme l'instrumentation scientifique, le contrôle non destructif (CND) constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la physique. Aussi l'histoire des essais non destructifs (END) commence-t-elle avec celle de la physique moderne à la fin du XIX^e siècle : découverte des rayons X, des courants de Foucault, de la piézoélectricité, etc. Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie : contrôle des aciers, radiographie des soudures. Une vigoureuse accélération du progrès et du développement des END s'est manifestée ensuite vers les années 60 / 70 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que le génie des centrales électrique nucléaires, l'aéronautique civile, les gazoducs, oléoducs, et les plates-formes offshore. La dernière décennie enfin voit l'émergence des techniques de CND qui ne pouvaient pas être mises en œuvre sans l'apport d'une électronique intégrée et d'une informatique puissante. On assiste ainsi au développement rapide des contrôles entièrement automatiques et à l'essor des techniques gourmandes en traitement informatique, comme les contrôles optiques.

- **Le contrôle en recette** d'un lot de pièces, d'une installation, d'un ouvrage au moment de la livraison procède d'une philosophie de respect de conformité à des spécifications de qualité définies auparavant. Si l'aspect cout et productivité peut avoir encore une certaine importance à ce stade contrôle, c'est surtout l'aspect procédure de la démarche qui devient primordial, qu'il s'agisse du choix du procédé, du choix du paramètre de réglage, de l'étalonnage, de la présentation et de l'archivage des résultats obtenus. À ce stade, il s'agit de **détecter des défauts** mais aussi bien souvent **d'en définir la nature et les dimensions**.
- **Le contrôle en service** s'effectue sur pièces ou structures lors d'opérations de maintenance ou à la suite détection d'anomalies de comportement du matériel. On en attende une très grande fiabilité, en égard à l'importance des risques encourus par la non-détection d'un défaut grave. Pour ce type de contrôle, il convient de pouvoir estimer le mieux possible la **nature et les dimensions des défauts** pouvoir en apprécier la nocivité. Il faut disposer aussi d'une grande reproductibilité de l'examen non destructif, de façon à pouvoir **suivre l'évolution du dommage au cours du temps**.

3.2. Les techniques de contrôle CND :

Les techniques de contrôle CND les plus utilisées généralement dans la détection des différents défauts dans le soudage sont :

- ✓ Le contrôle visuel.
- ✓ Le contrôle par ressuage.
- ✓ Le contrôle par rayons X.
- ✓ Le contrôle par magnétoscopie.
- ✓ Le contrôle par ultrasons.

Ces différents types de contrôle ci-dessus font l'objet de notre chapitre et ils sont définis afin de comprendre leur principe physique de fonctionnement, l'installation et le mode d'utilisation, et leur application dans la détection des défauts dans les cordons de soudure.

3.2.1 Le contrôle visuel :

L'examen visuel est le plus simple et le premier des procédés de contrôle de soudure devant être mis en œuvre.

Il permet d'une part de déceler les défauts de forme et autres défauts débouchant en surface du joint soudé. D'autre part, de fournir les indications (aspect du métal, largeur des cordons, inclinaisons des stries) qui renseignent l'observateur sur les conditions dans lesquelles la soudure a été exécutée, et par la suite, sur la probabilité de l'existence de défauts internes.

Il est le préliminaire indispensable à tous les examens de surface et de compacité.

Les difficultés d'interprétation rencontrées lors de ces investigations sont souvent dues à des défauts d'aspects.

Dans le cas où ceux-ci ne sont pas imposés, c'est souvent le contrôle visuel qui permet de décider d'un examen plus complet.

Il est noté que la détection visuelle des défauts de soudure nécessite une certaine pratique.

Ainsi le personnel chargé de son exécution est choisi parmi les opérateurs en CND ou par le personnel averti des méthodes d'élaboration, de fabrication des assemblages soudés.

On procède l'examen suivant :

a) Examen visuel direct :

Il est effectué à l'œil nu s'aidant éventuellement d'une loupe, d'un microscope binoculaire ou d'un petit projecteur permettant d'éclairer les zones à examiner.

b) Examen visuel indirect :

Les zones ne pouvant être observées directement sont examinées en utilisant des moyens indirects tel que miroirs, endoscopes

Ces instruments doivent avoir un pouvoir de résolution suffisante.

c) Le contrôle dimensionnel :

Le contrôle devra déposer des instruments appropriés tels que des jauges, des calibres... pur évaluer la surépaisseur, déformations.

3.2.2 Le contrôle par ressuage :

Autrefois la vérification des soudures se limitait à un contrôle visuel ou une destruction de l'assemblage.

Le développement du contrôle est lié étroitement au développement des techniques de soudage. 1949 : publication d'un communiqué décrivant les modes opératoire et possibilité des du Le contrôle par ressuage

Cet essai permet de déceler les défauts qui apparaissent à la surface. Il est appliqué dans le cas des matériaux non magnétiques (alliages à base d'Al, de Cu, de Ti, aciers inoxydables, etc.). Son mode d'emploi est très simple. La pièce à examiner est badigeonnée de pétrole léger, coloré ou contenant une poudre fluorescente. Au lieu du pétrole léger tout autre liquide pénétrant, c.-à-d. de faible tension superficielle, peut aussi rendre le même service. Après pénétration capillaire, la surface est essuyée. Pour le cas d'un liquide fluorescent la résurgence du liquide à partir des fissures et des porosités est rendu visible par un éclairage aux rayons ultraviolets. Les fissures contenant du liquide coloré sont rendues visibles par une couche de talc, qu'on applique sur la pièce à l'aide d'un spray, qui ensuite absorbe le liquide coloré en se teignant. L'observation, dans ce cas, se fait à l'œil nue. Les traces colorées indiquent les endroits où il y a des fissures.

Le contrôle par ressuage se compose de six phases essentielles dans la majorité des méthodes utilisées.

- 1- Nettoyage préliminaire de la surface à examiner
- 2- Application du liquide d'imprégnation ou pénétrant sur la surface à examiner et maintien de ce liquide pendant un temps suffisamment long lui permettre de pénétrer dans les moindres discontinuités débouchantes en surface
- 3- Elimination de l'excès de pénétrant
- 4- Application d'un révélateur permettant la remontée par capillarité du pénétrant contenu dans les défauts, provoquant ainsi l'apparition d'indication colorée ou fluorescente sur le fond blanc constitué par le révélateur.
- 5- Interprétation des indications sous un éclairage correspondant au type de pénétrant utilisé.
- 6- Nettoyage de la pièce : élimination de toute trace de produit.

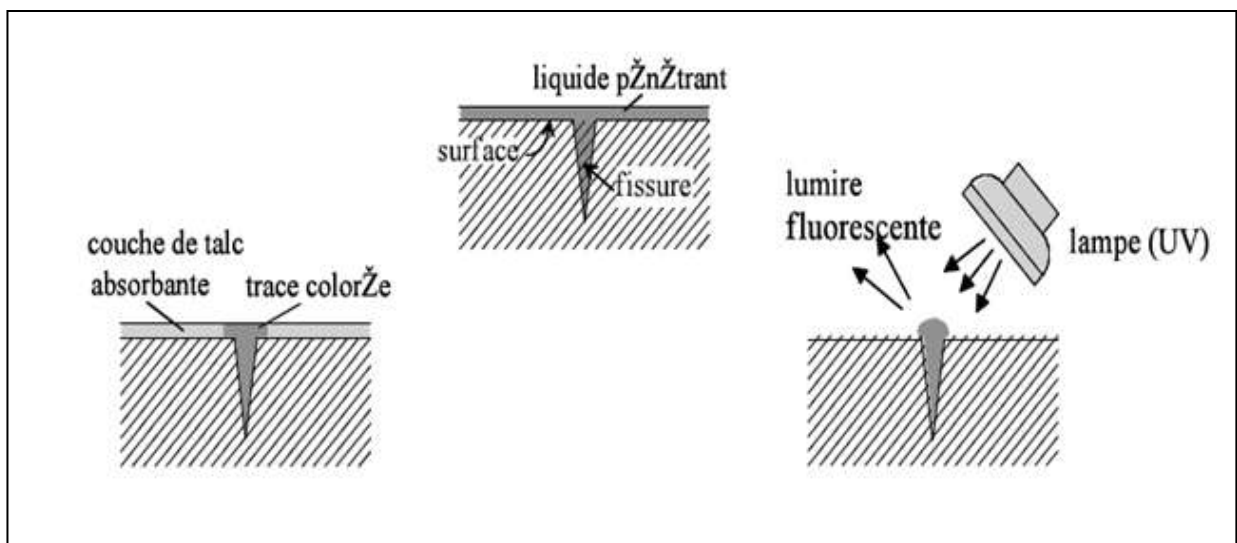


Figure 3.1. Principe de contrôles par ressuage [22].

3.2.2.1. Domaine d'application du ressuage:

En raison de son principe, le contrôle par ressuage ne permet que :

- ✓ La détection, de moindre mesure
- ✓ L'estimation de l'importance des défauts débouchant à la surface d'une soudure.

Le ressuage permet d'autre part de contrôler la plupart des matériaux métallique ou non métallique à condition toutefois que ceux-ci ne présentent pas une structure naturelle poreuse.

3.2.2.1. Caractéristique et nature des défauts mis en évidence

Il est prudent, avant soudage d'effectuer un contrôle par ressuage (ou par magnétoscopie) sur les surface devant recevoir des soudures, revêtement ou chargement.

Ce contrôle à effectuer après achèvement de la préparation de la surface.

En fonction du mode d'élaboration du matériau, ces défauts peuvent être les suivants :

Les défauts dans les pièces :

- Moulée.
- Forcée.
- Usinée.
- Laminé.

Défauts affectant les soudures :

- Fissures.
- Piqures.
- Les retassures.
- Certain manque de fusion.
- Les débordements.

3.2.2.3. Les limitations du procédé de ressuage :

- Trop fort rugosité.
- Impossibilité d'employer les produits classique.
- Les défauts non débouchant.
- Les fissures renfermant des corps susceptible d'interdire l'entrée du pénétrant.
- Durée de contrôle lente (10 à 45 min).
- Matériel couteux en temps et en personnel.

3.2.3. Le contrôle par magnétoscopie :

La magnétoscopie est une des plus anciennes méthodes de contrôle non destructif cette technique largement éprouvée est couramment utilisée dans les industries pour contrôler des pièces en fer, en fonte, les pièces métalliques ferromagnétiques. Par rapport aux autres techniques de contrôle non destructif tel que les ultrasons ou les courants de Foucault, la magnétoscopie présente l'avantage de faire partie des techniques dites « globales », permettant d'inspecter de façon fiable, rapide et pour un cout raisonnable l'ensemble d'une pièce en une seule opération.

Pourtant, la magnétoscopie mérite que l'on parle d'elle. Basée sur un principe physique bien. Connue et simple qui repose sur le comportement des matériaux ferromagnétiques lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique, elle a su innover et s'adapter à l'évolution des différents marchés.

Un Banc de magnétoscopie se compose généralement d'un générateur de champ longitudinal par tête magnétique ou solénoïde, d'un générateur de champ transversal par passage le courant dans la pièce, d'un dispositif d'éclairage et d'un système d'arrosage.

Le Contrôle magnétique Cette méthode se base sur les forces magnétiques et ne permet de mettre en évidence que des défauts situés à la surface des matériaux magnétiques. En magnétisant la pièce à contrôler, les lignes de forces sont perturbées à l'endroit de chaque discontinuité dans les propriétés magnétiques (fissure ou inclusion non-magnétique). Les petites particules de fer d'une suspension de limaille de fer (révélateur), répandue sur la surface, se concentrent là où les lignes de forces émergent.

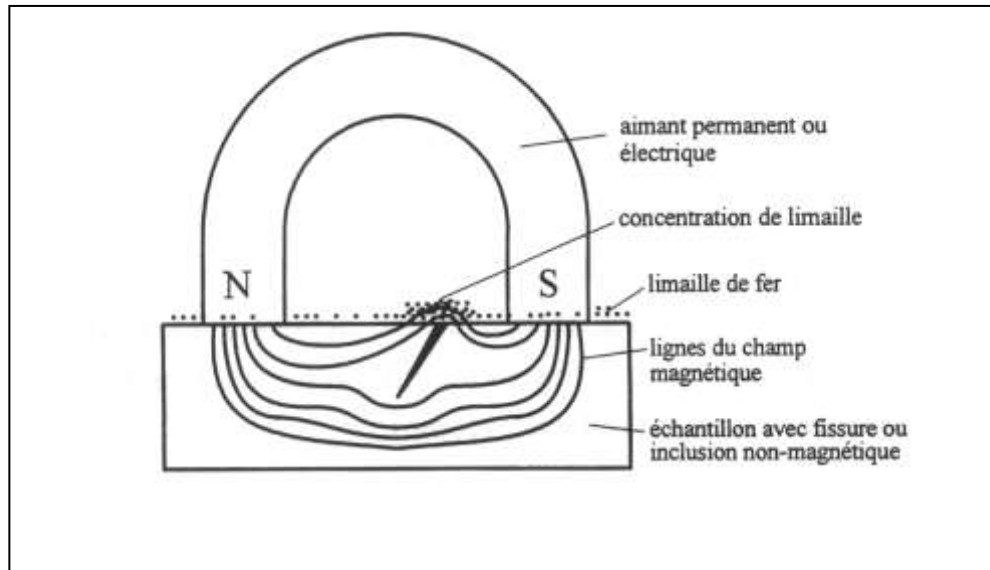


Figure.3.2. Le contrôle magnétique [23].

3.2.3.1. Domaine d'application contrôle par magnétoscopie

L'examen de par magnétoscopie est applicable aux matériaux ferromagnétiques.

On peut considérer comme étant ferromagnétique :

- La fonte
- Le nickel
- Le cobalt
- Les aciers ordinaire au carbone et faiblement alliés
- Les aciers à 3, 5, 6, 9 % de nickel
- Les aciers ferritiques au chrome (13% de chrome)
- Les aciers austénitiques, L'acier à 12% de manganèse, Les aciers à 17% de chrome, 4% de nickel, 1 % de molybdène ne sont pas considérés comme étant ferromagnétique. (perméabilité magnétique trop faible)

3.2.3.2 Les avantages :

- L'hétérogénéité non visible (défauts adjacents – sous cutanés) quelque mm de la surface extérieure
- La profondeur de détection dépend de nombreux paramètres. Elle atteint quelques millimètres.
- L'examen magnétoscopique permet de mettre en évidence des défauts débouchant ou sous- cutanés
- Cet examen est applicable à tous types d'assemblage

3.2.3.3. Les inconvénients :

- Permet la détections des que sur les faibles épaisseurs.
- Faibles productivité liée à manutentions de longueur durée de l'examen visuelle.
- La forme, la dimension des pièces, leur état de surface, les accès possible etc., limiteront le choix de la méthode de contrôle.

3.2.4. Le contrôle par la radiographie :

En examinant à l'œil nu un objet transparent aux rayons lumineux, il est parfois possible de distinguer certaines anomalies, par exemple des bulles d'air

Cette observation est possible, la lumière visible est suffisamment énergétique pour traverser la masse de verre et nous transmettre certain information quant à la compacité des matériaux.

Si le milieu à examiner revêt une forme structurale différente, les défauts internes ne pourront pas être révélés qu'à l'aide de rayonnement plus énergétique que nous appellerons rayon X ou rayon γ (gamma) pouvant traverser la matière dense et fixer des informations sur un film sensible à ces niveaux d'énergie.

La radiographie n'est autre qu'une variante très sophistiquée du jeu des « ombre chinoises », faisant appelle tous deux à une source de rayonnement et un objet venant se projeter en deux dimension sur un récepteur.

3.2.4.1. Radiographie par rayons X et gamma γ :

Les rayons X et γ sont des ondes électromagnétiques comme les faisceaux lumineux ordinaires, mais ils ont une longueur d'onde (λ) sensiblement inférieure et une énergie de rayonnement supérieure aux rayons lumineux.

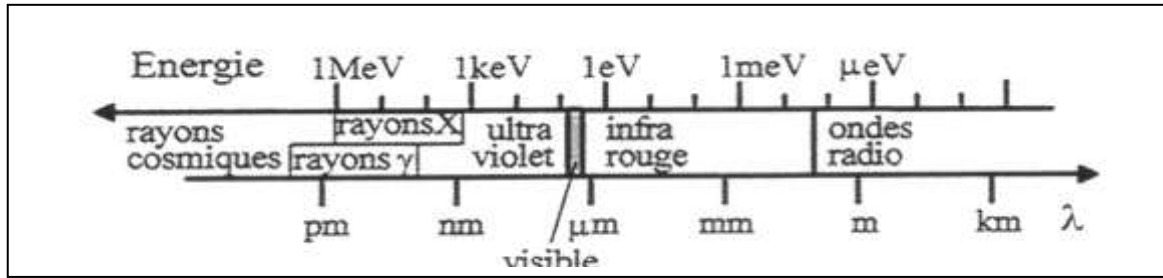


Figure 3.3. Echelle des ondes électromagnétiques [24].

L'énergie de rayonnement élevée confère aux rayons X et γ la propriété de pouvoir pénétrer et de traverser des corps opaques à la lumière ordinaire. La transparence n'est cependant pas parfaite. A l'intérieur de la matière, l'intensité diminue selon la loi d'absorption.

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

Avec :

I_0 et I sont respectivement l'intensité incidente et l'intensité émergente.

d est le chemin effectivement parcouru dans la matière, sans tenir compte de l'épaisseur des cavités présentes.

μ est le coefficient d'absorption. Le coefficient d'absorption dépend du matériau et de la longueur d'onde du rayonnement utilisé.

Il augmente très fortement avec le numéro atomique des éléments chimiques constituant le matériau absorbant et diminue avec l'énergie du rayonnement. L'uranium (92) et le plomb (82) absorbent donc plus fortement que le fer (26) ou l'aluminium (13), d'autre part les rayons γ pénètrent plus profondément que les rayons X.

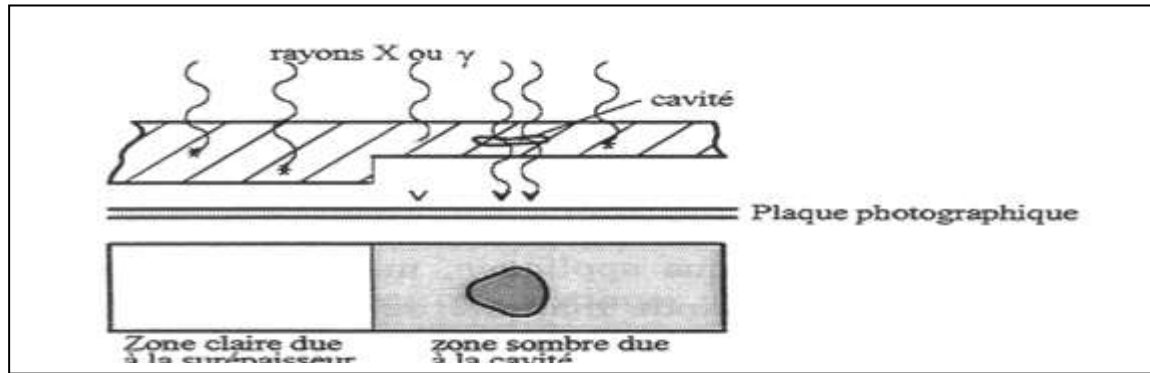


Figure 3.4. Absorption des rayons X et noircissement de la plaque photographique [25].

a) Méthode des rayons X :

La figure suivante montre le principe de construction du tube à rayons X. Une tension de quelques dizaines voire centaines de **kV** accélère les électrons sortant de la cathode et les dirige vers l'anode. Les électrons freinés dans l'anode transforment leur énergie cinétique en énergie de rayonnement. Ils émettent une radiation continue, à laquelle se superposent les raies caractéristiques émises par le métal formant l'anode.

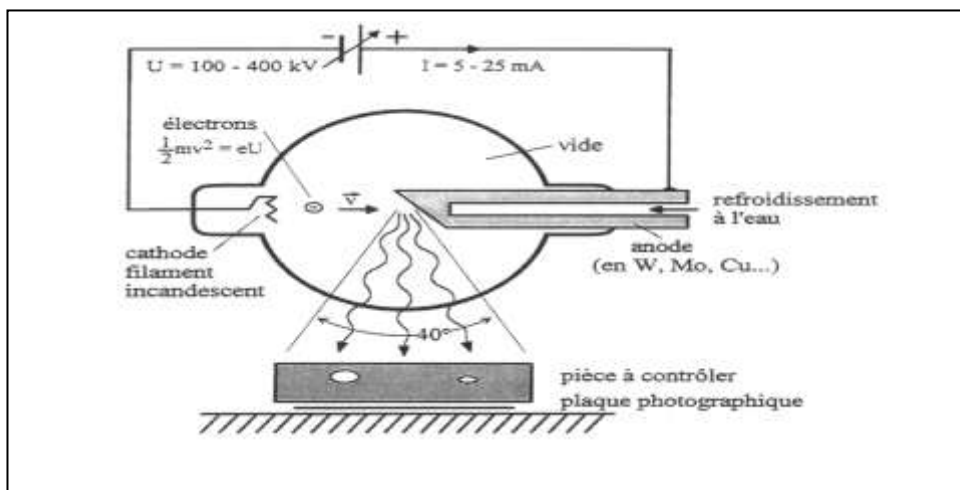


Figure 3.5. Schéma de l'installation: tube à rayons X, alimentation et pièce à examiner [26].

1) Caractéristiques du spectre :

- ✓ Limite nette pour une valeur maximale de l'énergie de rayonnement qui, exprimée en V (Volts électroniques), correspond exactement à la tension U appliquée en volts. La longueur d'onde correspondante à cette énergie vaut.

$$\lambda_0 = \frac{1.24}{U(\text{kV})}$$

- ✓ Cette limite se déplace vers des longueurs d'ondes plus courtes ou des rayons X plus "durs" voire plus élevés en énergie lorsqu'on augmente la tension U .
- ✓ L'intensité du spectre continu est maximale pour

$$\lambda_m = 2 \lambda_0$$

L'intensité totale de la radiation émise (intégrale du spectre $\int I(\lambda) d\lambda$) dépend du matériau de l'anode et de la tension électrique appliquée, mais elle ne dépasse pas 1 à 5 % de la puissance fournie ($N = UI$). La grande majorité de l'énergie électrique est transformée en chaleur et il est donc nécessaire de refroidir l'anode à l'eau

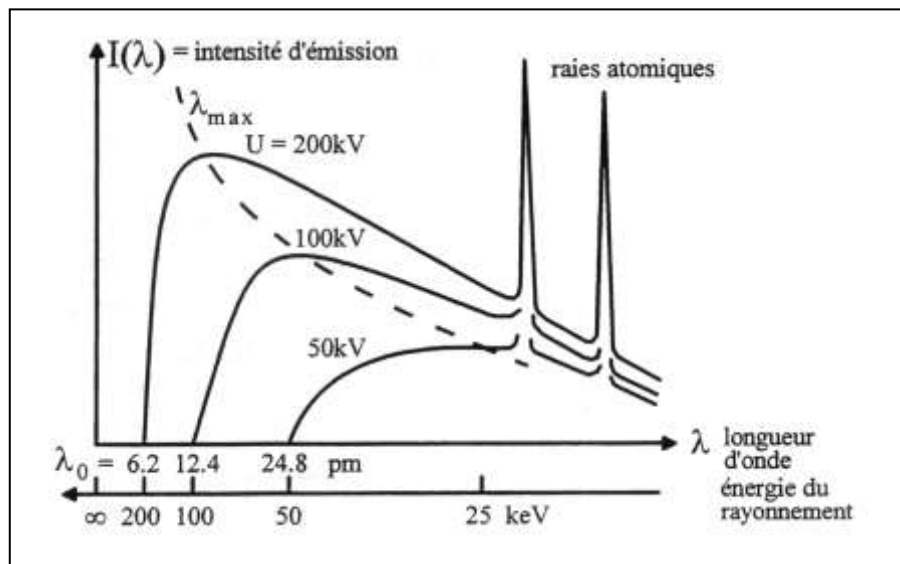


Figure .3.6. Spectre des rayons X [27].

b) Méthode des rayons gamma (γ) :

On emploie aussi en radiographie des sources d'émission radioactives à base d'isotopes Co60, Ir192 et Cs137. Les transformations nucléaires dans ces isotopes sont accompagnées d'une émission de rayons γ . Ces derniers ne sont rien d'autre que des rayons X d'origine nucléaire. Leur spectre d'émission est strictement monochromatique (une seule énergie de rayonnement). En raison du danger que présentent les substances radioactives les intensités des sources γ sont maintenues faibles par rapport à celles des rayons X. Cela implique souvent des temps de pose très longs, notamment pour le contrôle d'épaisseurs importantes. Cette méthode a l'avantage de ne pas employer d'alimentation électrique et en raison de la petite taille de la source radioactive (\sim mm³), on peut facilement contrôler des pièces de forme complexe, auxquelles il ne serait pas possible d'accéder avec un tube à rayons X.

1- Paramètres de travail

Le choix optimal des paramètres de travail tels que la distance entre le foyer et le film, la tension et le courant anodiques ainsi que le temps de pose pour une éprouvette donnée (forme, épaisseur, alliage), nécessite une bonne expérience et quelque fois des essais préliminaires. Les doses de rayonnement X ou γ mises en jeu pour le contrôle non destructif des matériaux sont en général plus élevées que celles couramment appliquées pour les diagnostics en médecine. Des précautions de sécurité contre ces radiations sont donc impératives.

2- Les avantages :

Les avantages majeurs des techniques radiographiques X et γ sont :

- De fournir une image constituant directement un document archivable du contrôle montrant l'absence présumée ou la présence d'un défaut dont on peut éventuellement apprécier la nature et la taille
- De garantir, dans une certaine mesure, la fiabilité de l'examen et le respect des procédures grâce à l'utilisation des témoins.

3- Les inconvénients :

Les inconvénients principaux de ces techniques sont :

- La nécessité de mettre en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel. Le risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau.
- La fiable productivité alliée à un cout élevé lorsqu'il s'agit de faire de multiples examens systématiques avec fi.

3.2.5. Contrôle par ultrason

Les ultrasons sont des ondes mécaniques de la matière qui se propagent dans les milieux élastiques. De cette façon les matériaux peuvent être analysés par les perturbations qu'ils apportent à la propagation de l'onde sonore.

Cette analyse sert à contrôler l'état de la compacité du matériau, ainsi que seront interprétées par des signaux visualisés sur l'écran de l'appareil, les perturbations des défauts enregistrés. Il est utile de rappeler la nature de ces ondes et leurs productions par l'important effet piézo-électrique de certains cristaux naturels ou artificielles.

1- Comment sont produits les ultrasons

Découpons dans un cristal de quartz un petit disque (convenablement orienté par rapport aux axes cristallographiques) et serrons- en les faces entre deux surfaces métalliques de manière à former un condensateur ou le petit disque jouera le rôle du diélectrique (voir **Figure 3.7**).

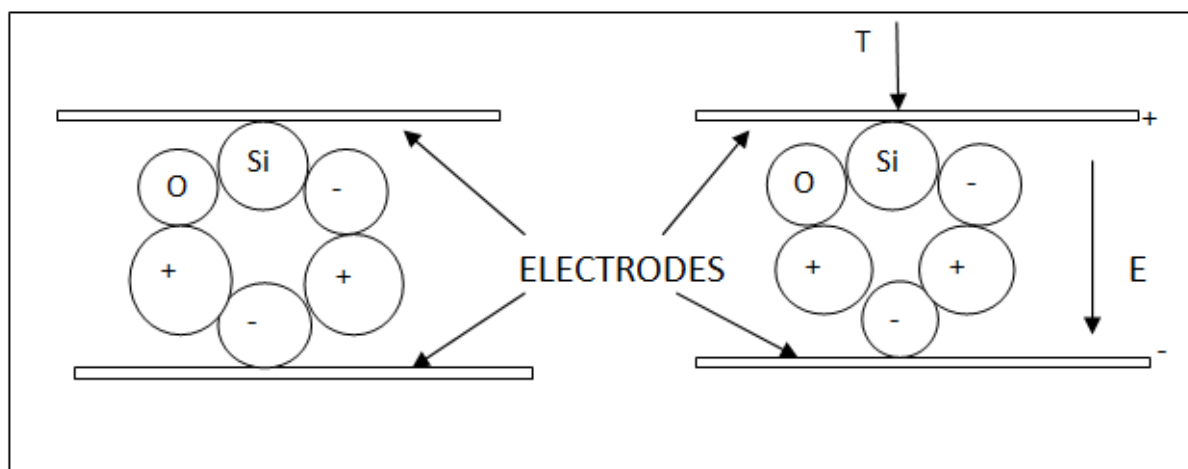


Figure 3.7. Condensateur diélectrique de quarte

Si l'on appuie sur le condensateur, on observe l'apparition entre les surfaces métalliques d'une d.p. égale à 5V environ pour une pression de 10 bars.

Si inversement, on applique une d.p. continue entre les armatures, le quartz subit une contraction.

Ce phénomène a reçu le nom « **piézo-électrique** » est commun à tous les cristaux dépourvus d'axe de symétrie.

Si, l'on alimente le condensateur en courant alternatif, le cristal se mettra à vibrer mécaniquement à la fréquence d'excitation électrique.

L'amplitude des oscillations atteint son maximum, par effet de résonance lorsque l'excitation.

Se fait à une fréquence voisine de la fréquence propre du cristal, laquelle dépend des dimensions du petit disque.

Quand il vibre à une fréquence élevée, le dispositif que nous avons appelé « condensateur » mais quand on désigne plus justement sous le nom de « sonde » ou de « transducteur » devient un émetteur d'ultrasons.

La fréquence de vibration qui compose chaque impulsion ultrasonique est normalement comprise entre 0.25 et 10 Hz (fréquence naturelle de la sonde).

2- Principe de contrôle ultrasonique :

Par l'intermédiaire d'une décharge électrique l'émetteur produit une impulsion d'une durée de quelques nanosecondes et d'une tension de pointe d'environ 1000 volts. Le transducteur Piézo-électrique la transforme en une impulsion élastique qui se propage sous forme d'un train d'ondes ultrasonores dans l'éprouvette. On entend par train d'ondes, un ensemble d'ondes de différentes fréquences qui toutes superposées donne la forme de l'impulsion. Après réflexion, le transducteur retransforme l'impulsion ultrasonore en un signal électrique. En raison des pertes d'énergie subies lors des transformations, des passages d'interfaces, de la réflexion et de l'absorption dans la pièce à contrôler, ce signal ressort beaucoup plus faible que l'impulsion d'émission. Il nécessite donc une amplification pour pouvoir être observé. Le comportement du faisceau ultrasonore est analysé à l'aide d'un tube cathodique qui enregistre verticalement l'amplitude de l'onde ultrasonore et horizontalement le temps (**figure.3.7**) C'est l'impulsion d'émission qui déclenche la tension de déflexion horizontale du tube cathodique.

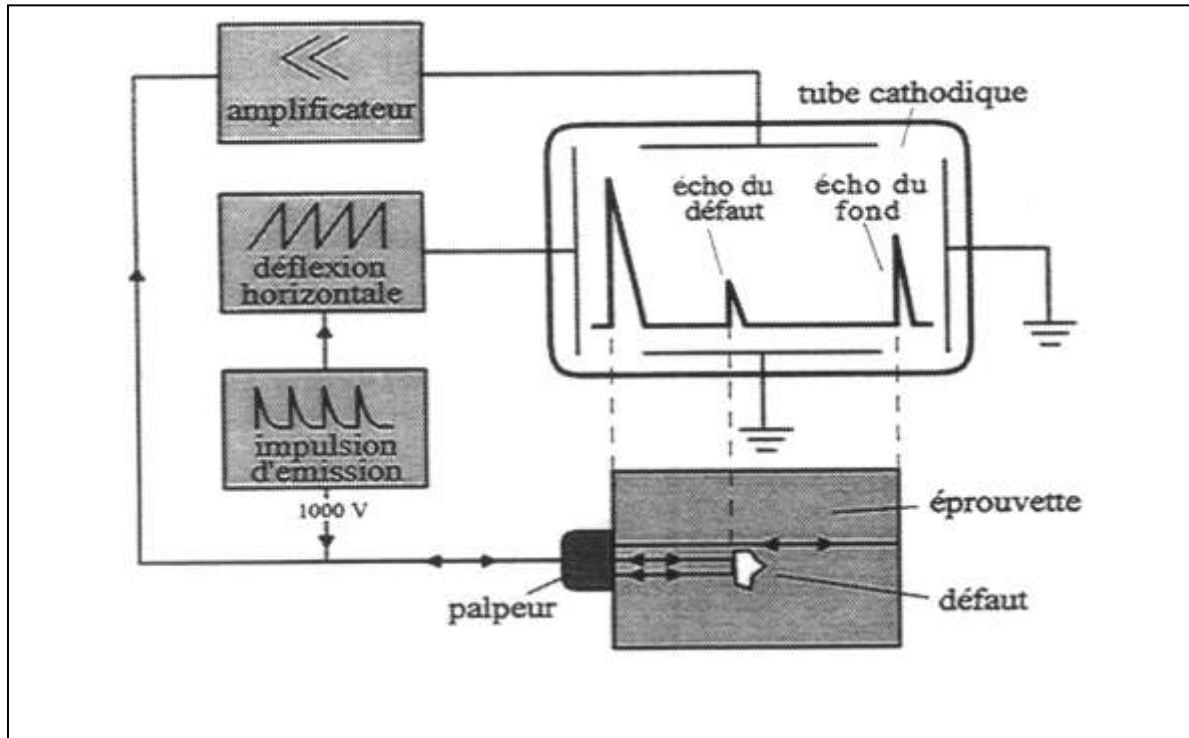


Figure.3.7. Principe du sondage par ultrasons [28].

3- La technique opératoire de contrôle par ultrasons :

Puisque toute pellicule d'air réfléchit l'énergie ultrasonique, il importe d'utiliser un fluide de liaison entre la sonde et la surface de la pièce examinée.

Le fluide est communément employé est la graisse industrielle.

On peut aussi utiliser l'eau, l'huile la paraffine, la glycérine, la stéarine, le stuc.

Outre la nécessité d'utiliser un fluide de liaison il est encore indispensable que la surface de la pièce soit suffisamment lisse,

Le faisceau ultrasonique émis par la sonde pénètre dans les matériaux avec une divergence d'autant plus grande que la fréquence est plus basse et que la sonde est plus petite.

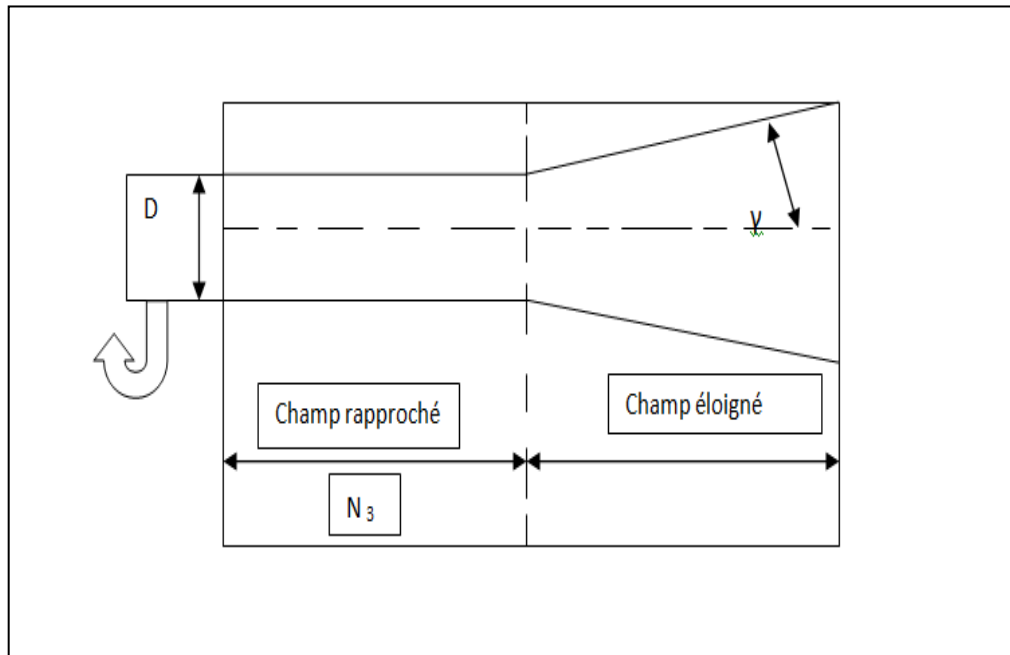


Figure.3.8 : Champ rapproché et champ de l'onde ultrasonique [29].

Pour que l'angle de divergence soit minimum il faut que la sonde soit d'autant plus grande que la fréquence est plus faible.

Utilise en pratique des sondes de diamètre compris entre 2 et 40 mm, il va de soi que plus la sonde est petite plus la puissance est faible et par suite l'épaisseur est susceptible de donner un écho de fonds encore décelable et réduite. Les petites sondes d'un diamètre de 2 à 5 mm conviennent particulièrement bien de contrôle des points de soudure.

Avec les sondes les plus grandes on peut encore obtenir des échos en retour pour des épaisseurs est plusieurs mètres.

En ce qui concerne la fréquence, signalons que le défaut apparait plus nettement que la fréquence est plus élevée.

Il semblerait à la première vue avantageux d'utiliser des fréquences plus élevées. Cependant augmentation successive de la fréquence conduira à obtenir également des échos par réflexion sur des ségrégations ou sur les surfaces de séparation des grains et ceux-ci masqueraient l'écho du aux défauts véritables.

4- Le contrôle de soudure par ultrasons :

La surépaisseur des soudures constitue une irrégularité en ce sens qu'il n'est pas possible d'effectuer de contrôle au moyen de sonde normale à moins d'éliminer l'excès de métal. On a résolu le problème en employant des sondes angulées c'est-à-dire construites de telle manière qu'elle permet d'orienter dans les matériaux les faisceaux ultrasoniques suivant une certaine inclinaison par rapport à la surface de contact.

Si l'on pose une sonde angulée sur une tôle, les ultrasons qui pénètrent dans le matériau sont inclinés et leur réflexion sur le fond se fait vers l'avant sans retour en arrière, c'est-à-dire sans donner un écho de fond.

Si l'on pose la sonde angulée tout près du cordon de soudure, le faisceau ultrasonique explore la portion inférieure du joint et comme le cordon de pénétration n'est plus parfaitement lisse il donne lieu à une réflexion en retour qui joue ici le rôle de l'écho de fond.

Tout défaut éventuel se trouvant sur le trajet de faisceau ultrasonique donnera donc un écho de qui situera entre ce de départ et de fond.

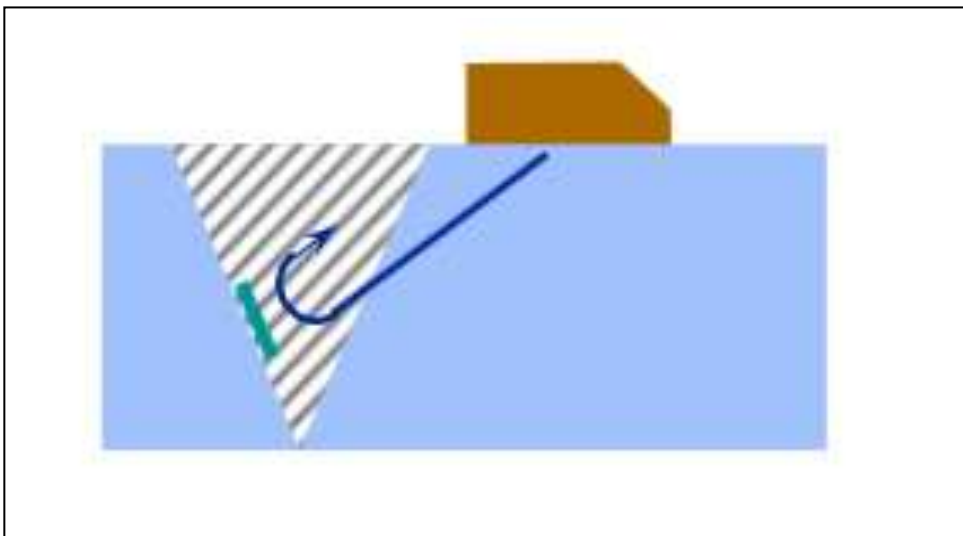


Figure.3.9 Position de la sonde par rapport au joint de soudure [30].

Dans ce cas la surépaisseur avec ses irrégularités va nous donner un écho de fond. À la cour de l'exploration du joint, l'opérateur déplace la sonde parallèlement à l'axe de soudure, avec une avance transversale.

Il n'est pas du tout facile de vérifier une soudure à l'aide des ultrasons. Les difficultés augmentent lorsque l'épaisseur diminue.

5- Champ d'application :

Le CND par ultrason utilisé dans le domaine médical, l'examen des **pièces métalliques** et de leurs assemblages en fabrication et en service, Ce champ s'élargit de plus en plus au contrôle des matériaux et assemblages non métalliques, céramiques, polymères, matériaux composites, béton.

L'évolution du contrôle ultrasonore va vers un plus grand recours à l'automatisation des opérations, avec l'objectif de simplifier, de fiabiliser les procédures, d'accroître la reproductibilité et la productivité des essais.

Parti II :

3.5. Etude de la pince et le contrôle non destructif de points soudage :

3.5.1. Généralité :

Depuis le début la pince à souder à été considérée comme le 4^{ème} axe (pour notre étude) des robots, c'est le principe de commande des 3 axe principaux qui à été retenu.

Asservissement de position avec les 2 boucles internes de vitesse et de courant, puis au contact supposé des tôles on commute sur la boucle interne de courant en appliquant la consigne correspondant à l'effort de serrage souhaite.

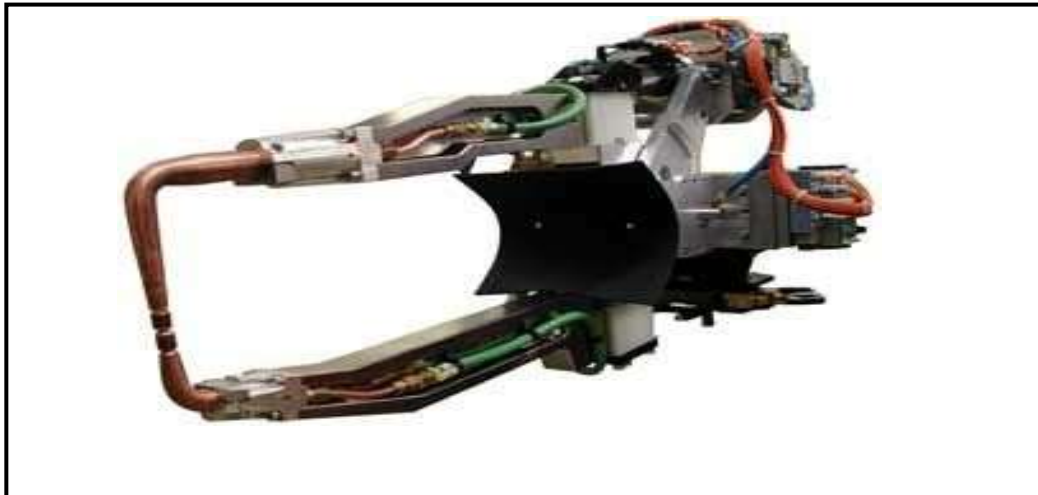


Figure.3.10 : pince universelle de robot soudage par point.

a) Fonctionnement de la pince :

Fermeture de la pince :

- Serrage de tôle par les bras de la pince de robot.
- Passage du courant jusqu'à la fusion locale à l'interface de deux tôles.
- Augment l'effort de serrage pendant la solidification du point de soudeur.

Ouverture de la pince

- Pendant toute cette séquence, les bras de la pince ainsi que électrodes sont refroidis par une circulation d'eau.

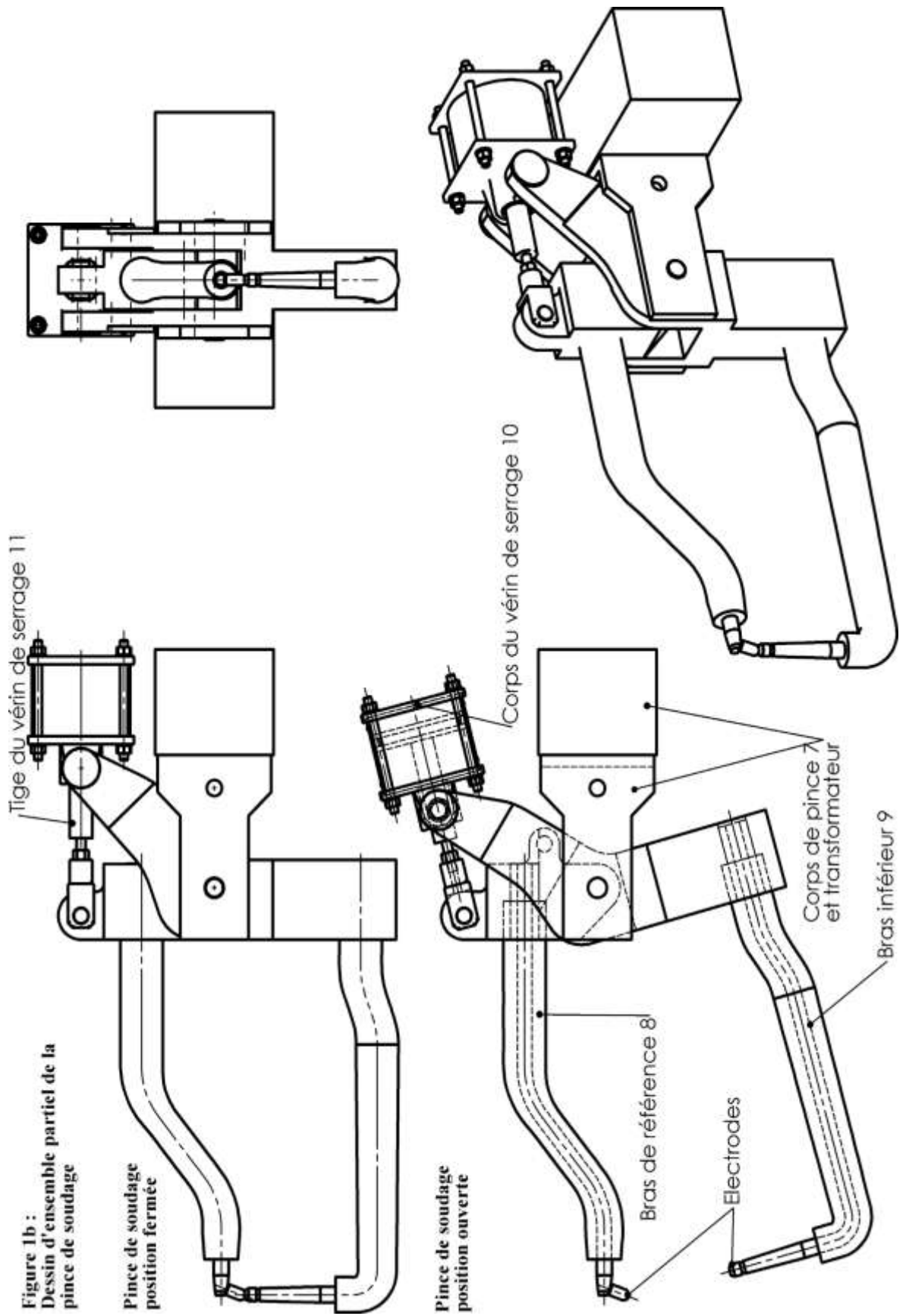


Figure.3.11. dessin d'ensemble partiel de la pince de soudage [31].

b) Type de vérin :

La tige du vérin de serrage de la pince peut être actionné par

- Le vérin hydraulique.
- Vérins pneumatiques
- Vérins électriques

En milieu industriel les énergies les plus souvent utilisées sont l'énergie pneumatique et l'énergie hydraulique

1. Vérins hydrauliques :

Ils utilisent l'huile sous pression jusqu'à 350 bars Par rapport aux vérins pneumatiques ils sont plus couteux et développent des efforts beaucoup plus important. Les vitesses de tige sont plus précises.

2. Vérins électriques :

Ils utilisent l'énergie électrique (12V à 230V). Ils sont surtout utilisés dans les applications domestiques (portail,...).

3. Vérins pneumatiques :

Ils utilisent de l'air comprimé, 2 à 10 bars. Très simple à mettre en œuvre, ils sont très nombreux dans les systèmes automatisés.

Le type de vérins nous utilise le **Vérins pneumatiques** puisque elle est le plus utilisées dans le milieu industriel exactement dans la conception de la pince de robot soudage par point.

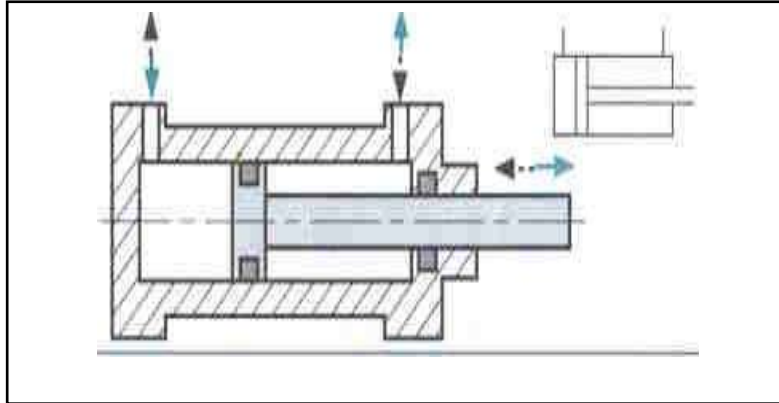


Figure.3.12. Le Vérin Double Effet (VDE) :

Principe :

L'ensemble tige + piston peut se déplacer dans les deux sens sous l'action du fluide sous pression. L'effort en POUSSANT (tige sortante) est légèrement plus grand que l'effort en tirant (entrée de tige) car la pression n'agit pas sur la partie de surface du piston occupée par la tige.

- ✓ Ils permettent un réglage plus aisé de la vitesse de la tige par contrôle du débit à l'échappement.
- ✓ Amortissement possible dans les deux sens

Ce sont les vérins les plus utilisés industriellement.

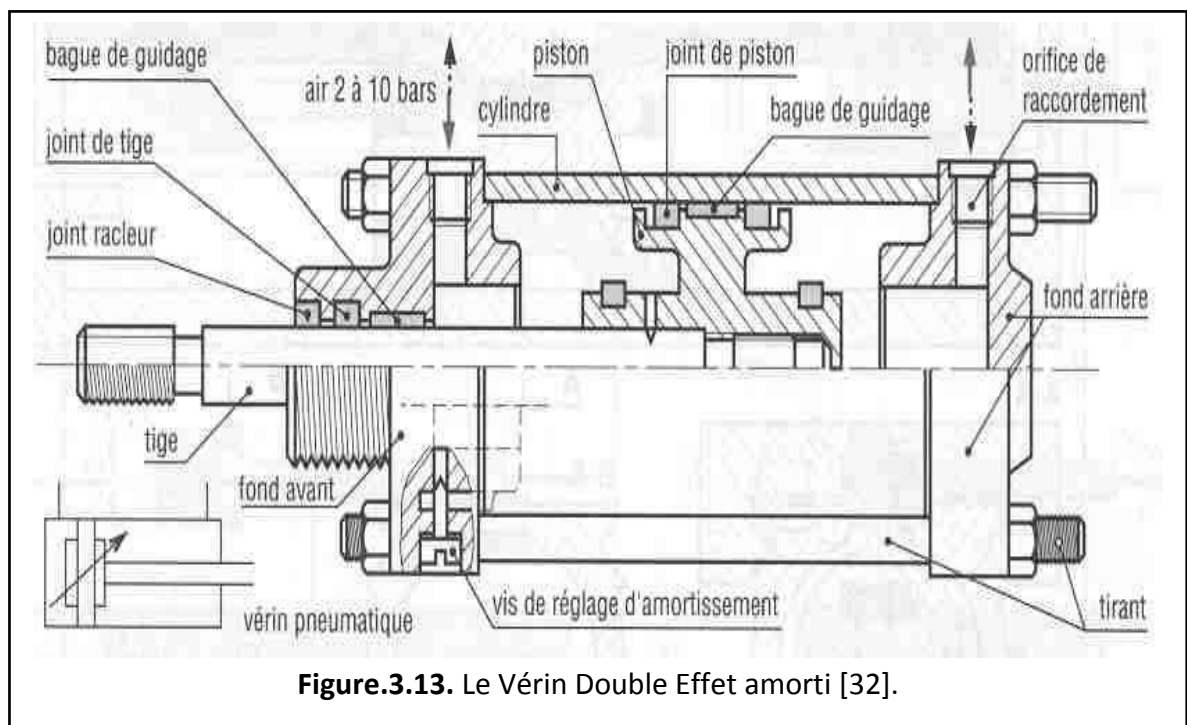


Figure.3.13. Le Vérin Double Effet amorti [32].

3.5.2. L'installation d'appareil de contrôle non destructif par ultrasons :

Le but de notre travaille j'ajout un appareil ultrasons (contrôle non destructif) au milieu de chap. Pour :

- ✓ Détection des défauts internes dans la tôle (des fissures cachées).
- ✓ Contrôlée le point de soudeur avant et après le soudage

Nous avons déjà vue les techniques de contrôle non destructif par ultrasons.

Principe :

L'examen par ultrasons consiste à étudier la propagation d'ondes ultrasonores au travers du Matériau acier (en particulier au travers des soudures). En cas de présence de défauts, une partie de l'énergie ultrasonore est renvoyée vers le récepteur (traducteur), ce qui permet de détecter et localiser les défauts présents dans les soudures ainsi que les défauts de compacité de tôles.

Avant l'installation l'appareil de contrôle par ultrasons pour contrôlée les points de soudeur on va faire des calcules pour la propagation de la chaleur.

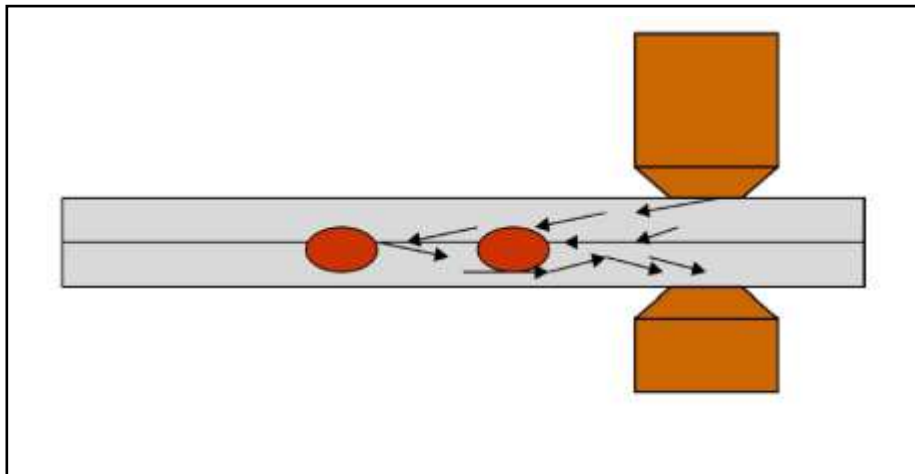


Figure.3.14. la propagation de la chaleur

J'ai choisi une tôle de **1m** pour réaliser l'assemblage de deux tôles par une série de points effectués successivement, on va calculer la température de deuxième point, avec une distance entre les points égale à **20 cm (0.2m)**.

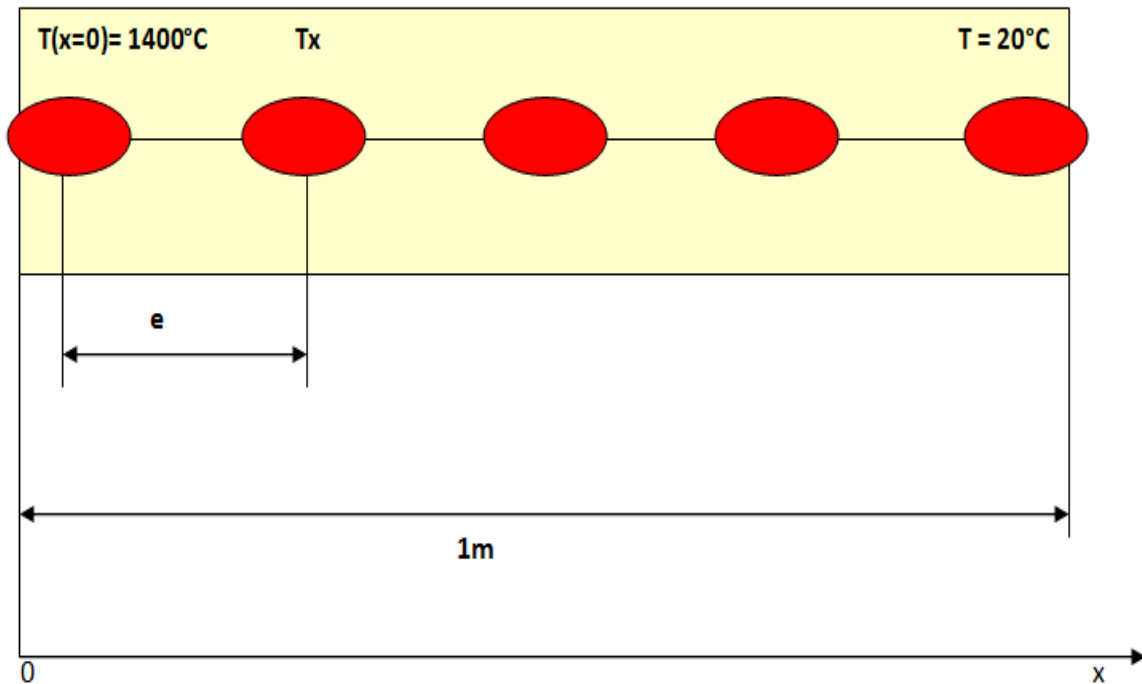


Figure.3.15. La distance entre les points de soudeur.

Si on considère que le transfert est monodirectionnel suivant x stationnaire

On donne :

L'équation de la densité de flux $\Rightarrow \dot{q} = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$ (3.1)

On a :

$\lambda = 45 \text{ (W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}\text{)}$ La conductivité de la chaleur pour l'acier doux.

$T = 20^\circ\text{C}$ (Températures ambiantes).

$T(x=0) = 1400^\circ\text{C}$ (Températures de fusion).

Longueur de tôle = 1m.

e = la distance entre les points

On calcule \dot{q} :

$$= 45 * \frac{(1400-20)}{1} = 45 * 1380 = 62100 \text{ W}$$

$$\dot{q} = 62100 \text{ W} \quad (3.2)$$

Si la distance entre les point e= 20 cm (0.2 m)

On calcule la température en x = 0.2 m

A partir de l'équation (3.1) on trouve :

$$\dot{q} = - \lambda \frac{\Delta T_i}{\Delta x_i} \quad (3.3)$$

$$= \lambda \frac{(T_0 - T_x)}{e - 0} \implies T_x = - \frac{\dot{q} * e}{\lambda} + T_0$$

D'après le résultat de (3.2) on trouve :

$$T_x = - \frac{62100 * 0.2}{45} + 1400 = 1124 \text{ °C}$$

La température dans le point $T_x = 1124\text{°C}$.

On remarque que la température dans le deuxième point très élevée donc ne peut pas installée un appareil de ultrasons pour contrôlée les point soudures.

Dans ce cas on utilise la 2^{ème} chois le contrôle de radiographie par rayon X

3.5.3. L'installation d'appareil de contrôle non destructif par ultrasons :

Nous avons déjà vu les principes de contrôle non destructif par rayon X

Avantage :

Les rayons X sont bien adaptés pour voir les points de soudure

- ✓ Contraste et résolution
- ✓ Accessibilité
- ✓ Taux de couverture
- ✓ Précision du diagnostic
- ✓ Temps d'inspection
- ✓ Facilité de programmation et temps de développement
- ✓ Coût
- ✓ Mesure du process
- ✓ Intégration à une stratégie de test distribuée

Principe de la pince de soudeur :

On ajoute un Générateur de rayons X et le Détecteur au milieu de corps de la pince de soudage.

La figure ci- dessous qui représente le schéma cinématique de la pince de soudage par point.

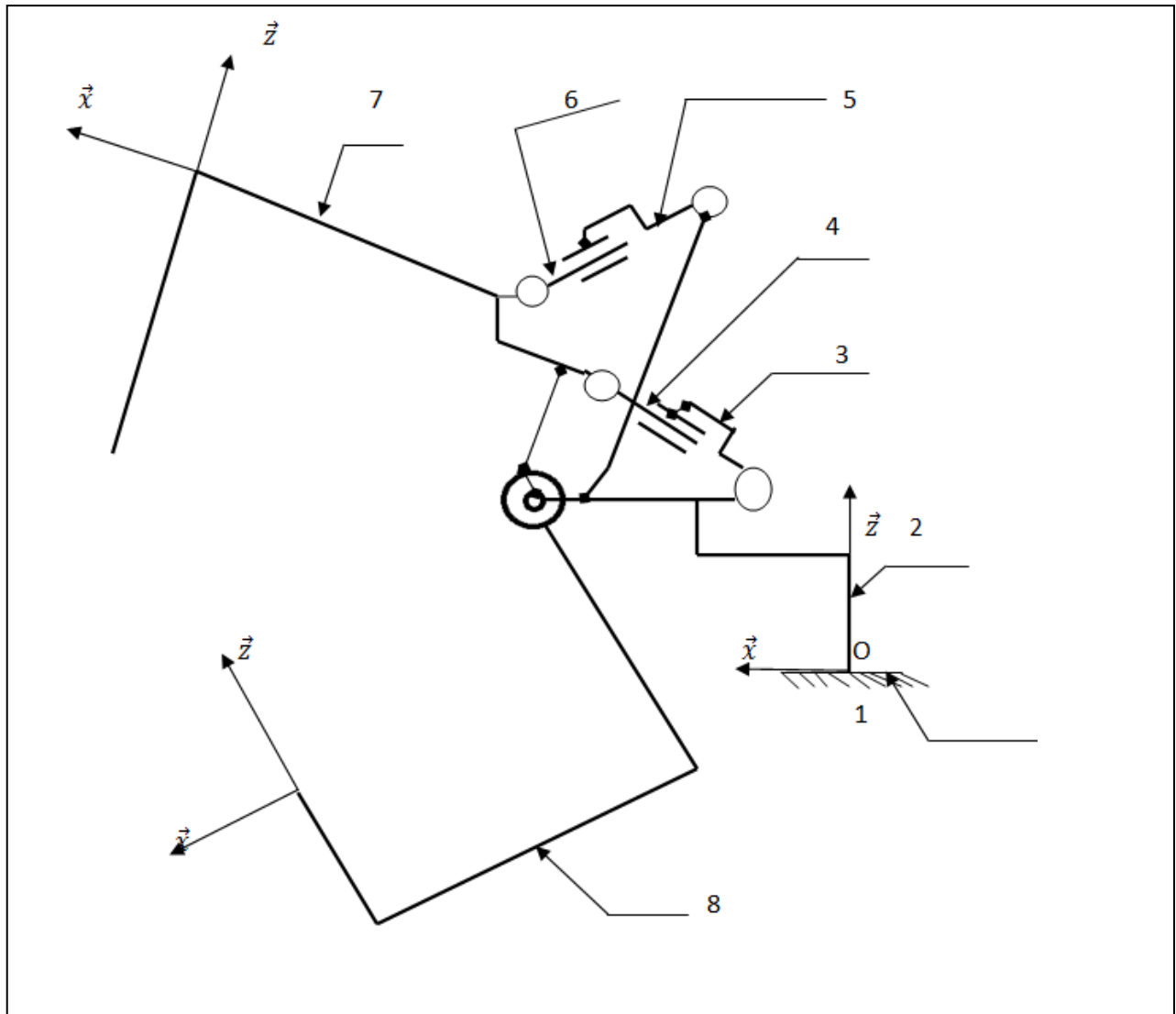


Figure 3.16. Schéma cinématique de la pince [34].

Ou :

- 1- Bride du robot.
- 2- Corps de pince.
- 3- Corps du vérin de compensation.
- 4- Tige du vérin de compensation.
- 5- Corps de vérin de serrage.
- 6- Tige du vérin de serrage.

- 7- Bras de référence.
- 8- Bras inférieur.

Dans la figure suivants qui représente le principe de contrôle par le rayons X et les éléments qui ajoute pour installée le générateur et le détecteur (récepteur) de rayon X dans le corps de la pince.

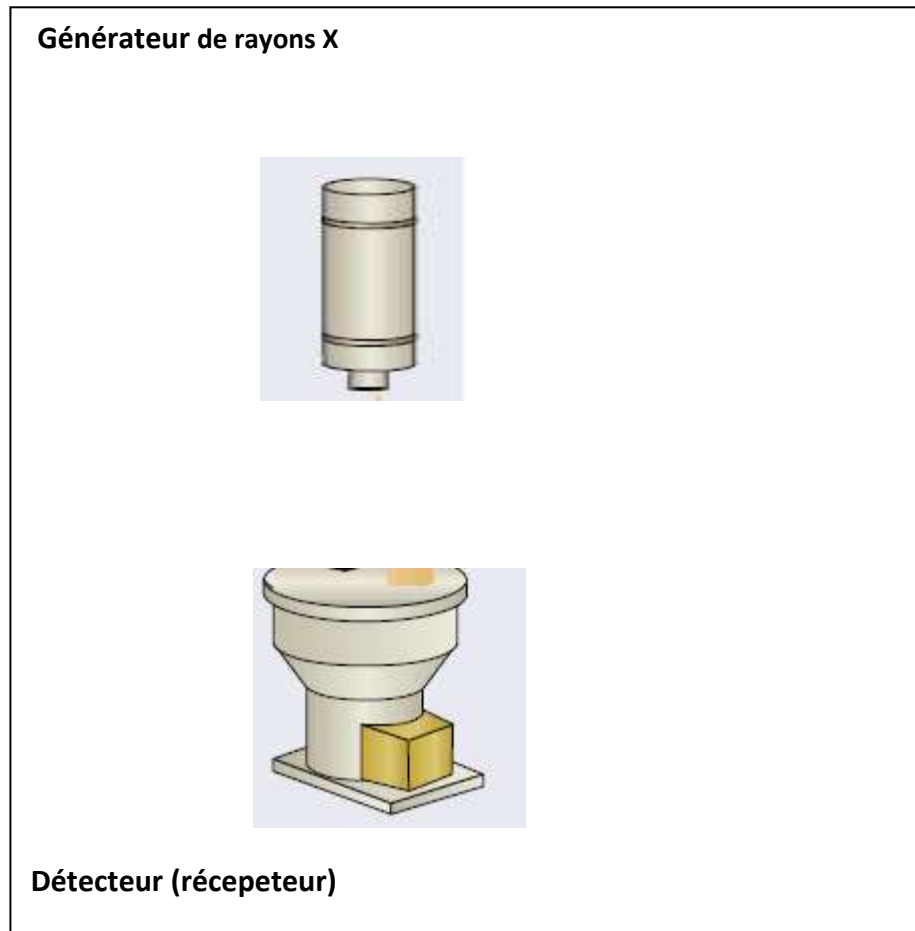


Figure 3.17. Les éléments de contrôle par radiographie [35].

On peut fixer le générateur de rayons X et le récepteur par un collier qui de son tour Fixer par une bague en acier. Cette dernière est fixée an corps de la pince.

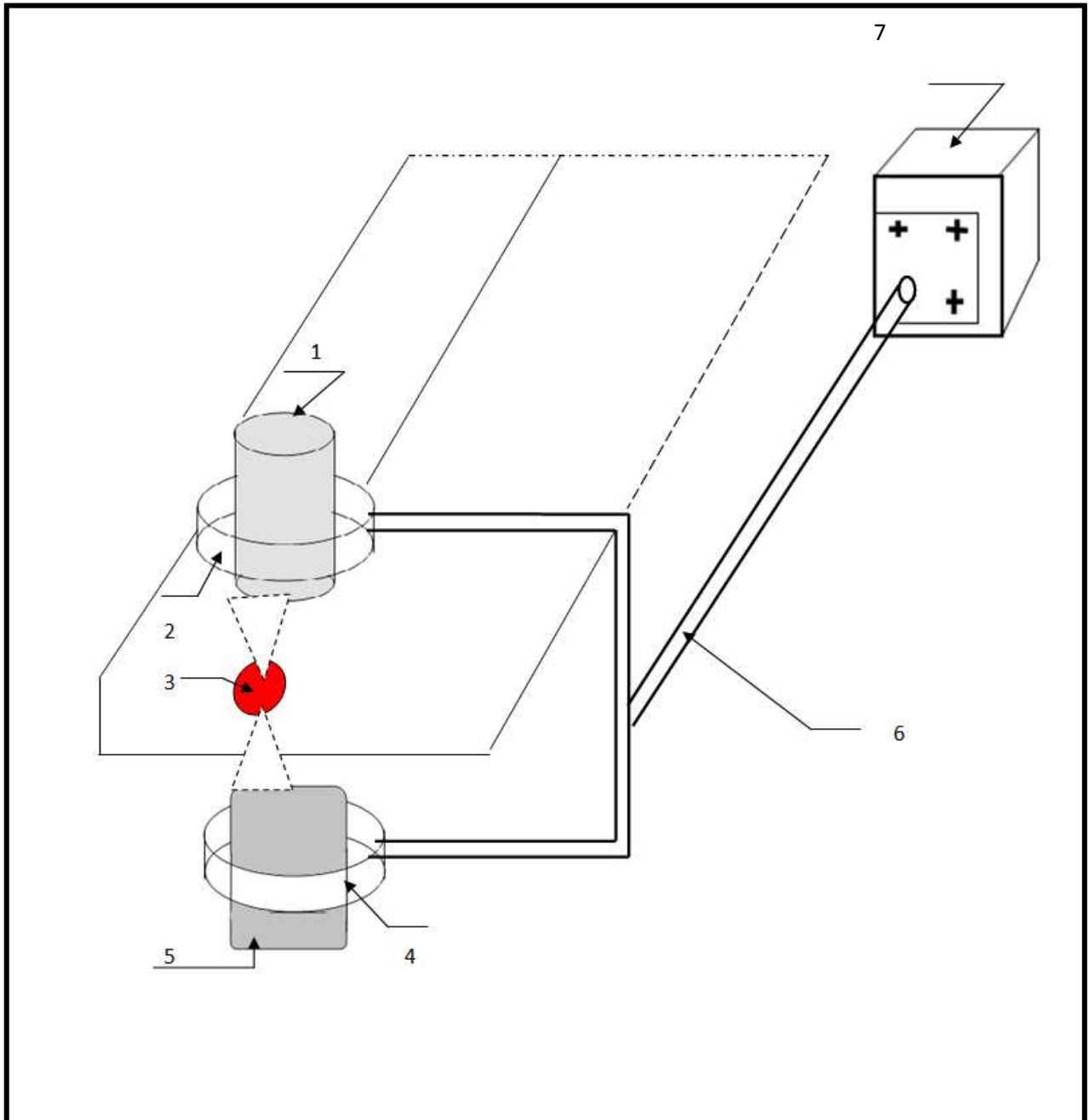


Figure 3.18. L'installation des éléments de rayon X sur le corps de la pince.

Avec :

- 1- Générateur de rayon X.
- 2- Collier 1.
- 3- Point de soudeur.
- 4- Collier 2.
- 5- Détecteur (Récepteur).
- 6- Bague en acier.
- 7- Corps de la pince.

Le générateur de rayon X elle est transmis et orienté successivement en différentes positions par ce que elle est liée par le corps de la pince, A chaque position que se déplace la pince automatiquement les éléments de contrôle par le rayon X se déplacent aussi grâce à sa large zone d'analyse pour contrôler les points de soudeur.

Et le détecteur (récepteur) accepte les rayons X et affiche les défauts de soudeur.

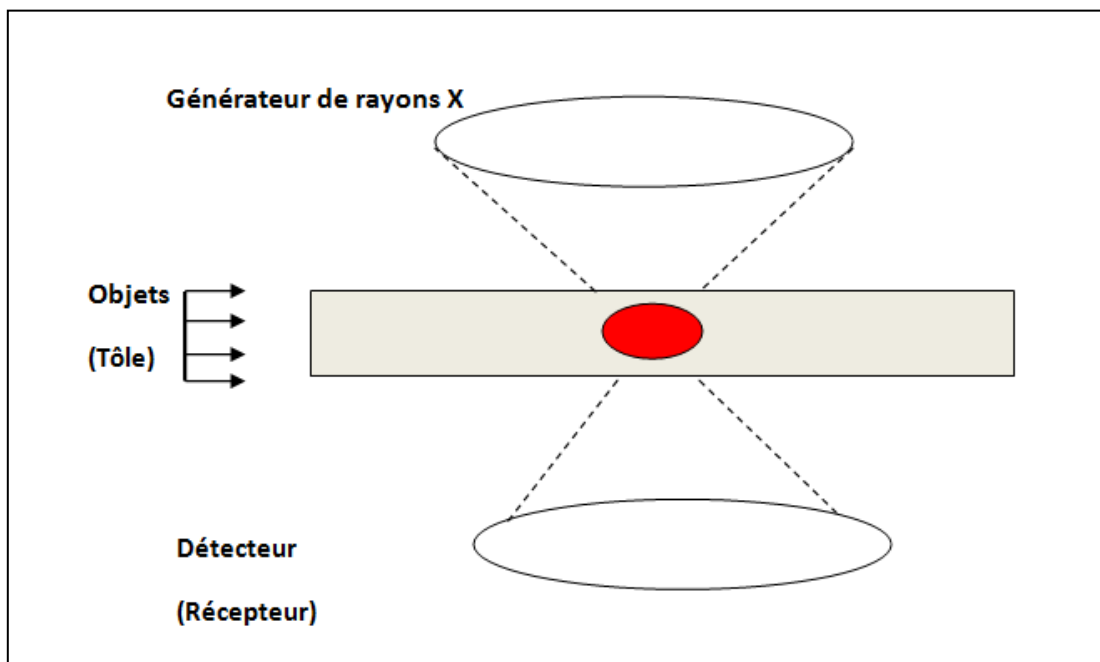


Figure 3.19. fonctionnement de contrôle par le rayon X.



3.5.3. La qualité d'une soudure est conditionnée par les critères suivants : [36]

- 1- L'aptitude du matériau au soudage est assurée.
- 2- La préparation est qualifiée et contrôlée
- 3- Le choix du procédé de soudage est fait suivant les caractéristiques des matériaux, des épaisseurs des éléments et de la sollicitation
- 4- Les matériaux de base et d'apport concordent
- 5- Le soudeur est qualifié
- 6- Le contrôle de qualité du soudeur est assuré

3.5.4. On distingue les classes de qualité suivantes : [37]

- Qualité I : les exigences 1 à 6 doivent être satisfaites. C'est un soudage spécial pour des hautes exigences en résistance et en qualité de matériaux.
- Qualité II : les exigences 1 à 5 doivent être satisfaites. C'est un soudage de résistance normale pour des sollicitations statique ou dynamiques.
- Qualité III : les exigences 5 et 6 ne sont pas satisfaites. Il s'agit d'une construction soudée soumise à des faibles sollicitations.

3.5.5. Défauts possibles :

Aspect du point	Causes possibles
<p>Point percé</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • effort trop faible. • intensité trop forte. • électrode mal ajustée.
<p>Point cuivré</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • effort trop faible. • intensité trop forte. • usure des électrodes. • électrodes mal affûtées.




<p>Point avec éclat</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • effort trop faible. • intensité trop forte. • mauvaise position de la pince.
<p>Point enfoncé</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • paramètres de soudage mal adaptés. • pression excessive.
<p>Point correct</p> 	<p>Les trois paramètres ont été respectés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • effort. • temps. • puissance.

Tableau 3.1. Défauts possibles du point de soudeur [38].

3.5.6. Sécurité :

La soudure par procédé soudage par point produit :

- Des projections de métal en fusion
- Un champ électromagnétique dû à la forte intensité du courant utilisé lors du soudage
- Le champ de contrôle par rayon X

4.1. Introduction :

La conception et la commande des robots nécessitent le calcul de certains modèles Mathématiques, tels que [01] :

Les modèles de transformation entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'organe terminal) et l'espace articulaire (dans lequel est définie la configuration du robot). Parmi ces modèles, on distingue :

- Les modèles géométriques direct et inverse qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration du mécanisme et inversement,
- Les modèles cinématiques direct et inverse qui expriment la vitesse de l'organe terminal en fonction de la vitesse articulaire et inversement,
- Les modèles dynamiques définissant les équations du mouvement du robot, qui permettent d'établir les relations entre les couples ou forces exercés par les actionneurs et les positions, vitesses et accélérations des articulations.

Avant de commencer la modélisation dans ce chapitre nous présenterons les divers outils mathématiques utiles pour modéliser les mouvements des corps solides dans l'espace.

4.1.1. Description des matrices de transformation :

La représentation d'une matrice de dimension 4x4, noté iT_j appelée matrice de transformation homogène est basée sur les coordonnées homogènes soit :

- Représentation d'un point : une transformation homogène, la représentation d'un point se fait par une matrice colonne :

$$P = (X_x \ Y_y \ Z_z \ 1)^T$$

- Représentation d'une direction : Cette représentation se fait par quatre composantes, quoique la quatrième soit nulle.

$$u = (u_x \ u_y \ u_z \ 0)^T$$

Pour une matrice de transformation complète d'un repère R_j ayant subi des rotations et des translations par rapport un repère R_i , il est possible d'utiliser une écriture générale. Cette écriture prend en compte les différents vecteurs (s, n, a) de la matrice de passage.

$${}^i T_j = [{}^i S_j, {}^i n_j, {}^i a_j, {}^i P_j] = \begin{pmatrix} S_x & n_x & a_x & P_x \\ S_y & n_y & a_y & P_y \\ S_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.01)$$

La matrice de transformation complète ${}^i T_j$ résulte par un vecteur (3x1) de translation ${}^i P_j$ et une matrice (3x3) de rotation soit :

$${}^i T_j = [{}^i S_j, {}^i n_j, {}^i a_j, {}^i P_j] = \begin{pmatrix} {}^i A_j & {}^i P_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.02)$$

Où

${}^i s_j$, ${}^i n_j$ et ${}^i a_j$ de la matrice ${}^i A_j$ désignent respectivement les vecteurs unitaires suivant les axes x_j , y_j et z_j du repère R_j exprimés dans le repère R_i et ${}^i P_j$ est l'origine de repère R_j exprimés dans le repère R_i . Les éléments de la matrice ${}^i A_j$ sont appelés **cosinus directeurs**, car ils représentent les coordonnées des trois vecteurs de la base R_j exprimés dans R_i . Par définition, les colonnes de R sont orthogonales entre elles et par conséquent la connaissance de deux colonnes suffit.

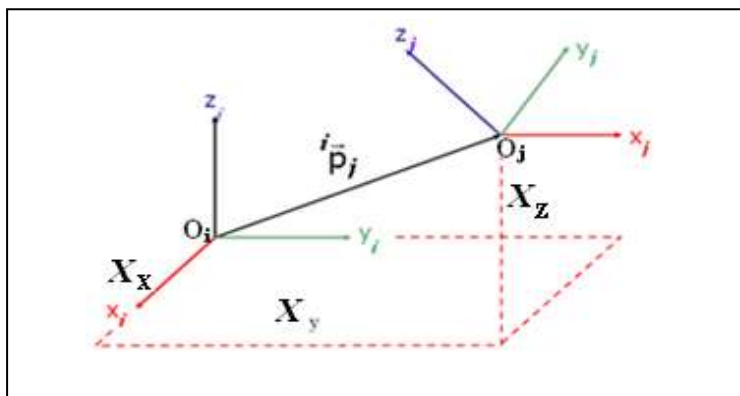


Figure 4.1 : transformation d'un repère.

- *Matrice de transformation à rotation pure autour des axes principaux :*

Soient $\text{Rot}(x, \theta)$, $\text{Rot}(y, \theta)$ et $\text{Rot}(z, \theta)$ qui sont des rotations (les figures ci-dessous), les composantes des vecteurs unitaires ${}^i s_j$, ${}^i n_j$ et ${}^i a_j$ portés respectivement par les axes x_j , y_j et z_j du repère R_j exprimés dans le repère R_i .

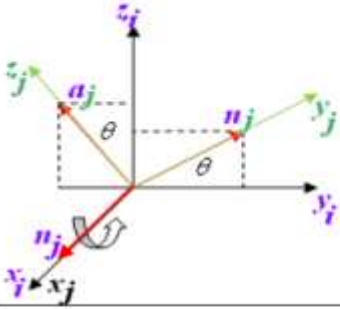
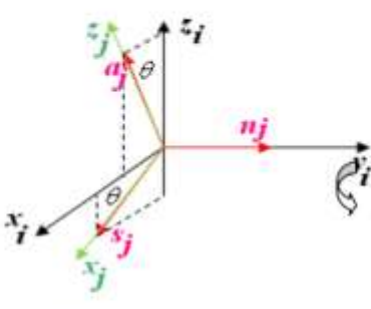
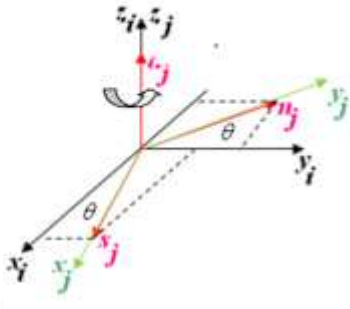
Rotation autour axe x	Rotation autour axe y	Rotation autour axe z
		
${}^i T_j = \text{Rot}(x, \theta)$, est égale : $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	${}^i T_j = \text{Rot}(y, \theta)$ est égale : $\begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	${}^i T_j = \text{Rot}(z, \theta)$ est égale : $\begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Tableau 4.1 : Les matrices de transformation à rotation pure.

➤ Matrice de transformation à translation pure :

Soit Translation (a, b, c) une transformation a, b, et c qui désigne respectivement une translation le long des axes x, y, et z.

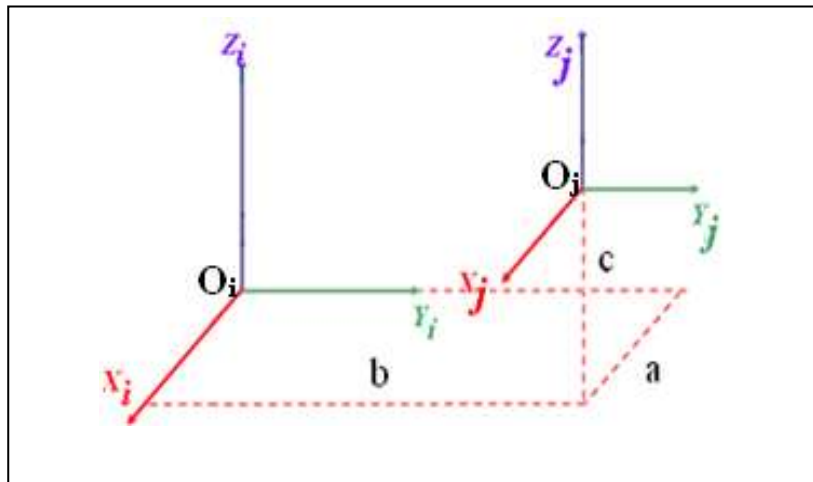


Figure 4.2 : transformation d'un repère à translation pure.

Soit :

$${}^i T_j = \text{Trans}(a, b, c) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.03)$$

4.1.2. Description d'un solide dans l'espace :

Un solide S est dit *indéformable* si pour toute paire de points de ce solide de coordonnées m et n , $||m(t) - n(t)|| = ||m(0) - n(0)||$ est constante au cours du temps. La situation d'un solide S est donnée par trois coordonnées de position plus trois de l'orientation d'un repère R lié à ce solide par rapport à autre repère référence.

a- Les coordonnées de rotation :

Il existe plusieurs représentations soit, les angles d'Euler, les angles de Roulis-Tangage-Lacet, soit les paramètres d'Euler ou soit les cosinus directeurs «angle autour d'un axe unitaire». Quelle que soit la représentation utilisée, ces quatre paramètres permettent de définir une matrice de rotation unique.

b- Les coordonnées de Position

Ces coordonnées peuvent être définies par les coordonnées cartésiennes, sphériques ou cylindriques. Le choix des coordonnées est fonction des caractéristiques du manipulateur et de celles de la tâche réalisée.

4.1.3. Description d'une structure géométrique du robot :

On suppose que le robot est constitué d'une chaîne de $n+1$ corps solide ($Cr_0, Cr_1... Cr_n$). Le corps Cr_0 désigne la base du robot et Cr_n désigne le corps qui porte l'organe terminal. Ces corps sont liés entre eux par des articulations rotoïdes ou prismatiques. A chaque corps j , on associe un repère orthonormé R_j . Les repères sont numérotés de 0 à n . La $j^{\text{ème}}$ articulation, dont la position est notée q_j , au point qui relie les corps (Cr_{j-1}) avec le corps Cr_j . Les angles de rotation ou les longueurs de translation des différentes articulations sont appelés coordonnées articulaires de dimension n , leurs paramètres constituent le vecteur de configuration articulaires :

$$q = (q_1 \dots q_n)^T$$

La situation P de l'OT (l'Organe Terminal) du bras manipulateur est alors définie par m coordonnées indépendantes dites coordonnées opérationnelles de dimension $m \leq 6$, appelées espace opérationnel. On note :

$$P = (X_1 X_2 \dots X_m)^T$$

La méthode la plus répandue pour la description des paramètres géométriques d'un robot à chaîne ouverte est celle de la formalisation de Denavit-Hartenberg (DH) modifié par Khalil Kleinfinger cette formalisation basée sur les paramètres suivants [10] :

- ✓ La variable d'articulation j est noté q_j
- ✓ Le corps j est noté Cr_j .
- ✓ Les paramètres qui permettent de définir R_j par rapport au repère antécédent soient indices(j).
- ✓ Le repère R_j est lié au corps Cr_j , est défini de telle sorte que :
- ✓ L'axe Z_j du repère R_j est porté par l'axe de l'articulation j .
- ✓ L'axe X_j du repère R_j est porté par la perpendiculaire commune aux axes R_j et R_{j+1}
- ✓ Le passage R_{j-1} à R_j est exprimé en fonction des quatre paramètres suivants :

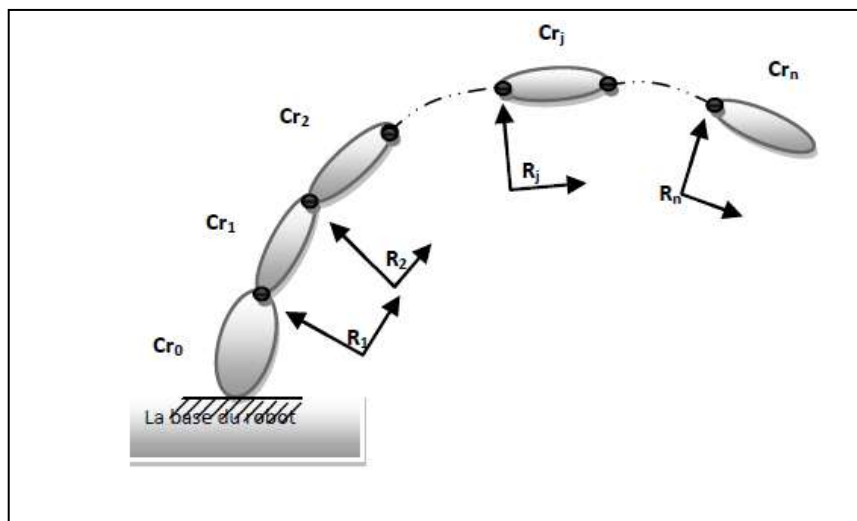


Figure 4.3: robot a structure ouvert et simple [39].

- α_j : angle entre les axes Z_{j-1} et Z_j correspondant à une rotation autour X_{j-1} .
- d_j : distance entre Z_{j-1} et Z_j le long de X_{j-1} .
- θ_j : angle entre les axes X_{j-1} et X_j correspondant à une rotation autour Z_{j-1} .
- r_j : Distance entre X_{j-1} et X_j le long de Z_{j-1} .

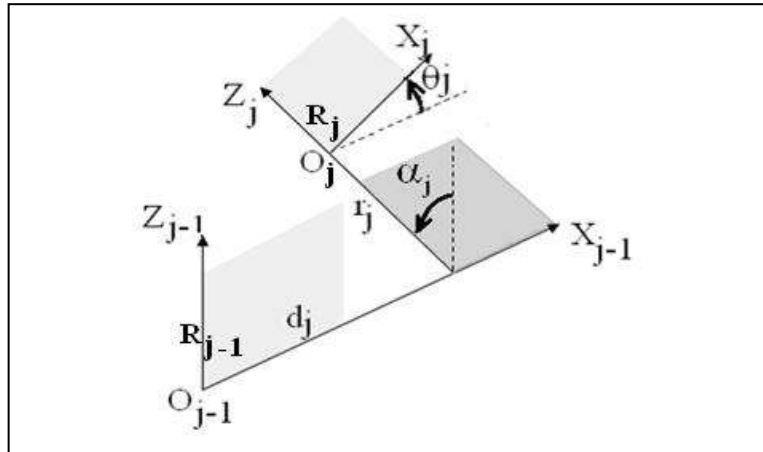


Figure 4.4 : Paramètre géométrique dans le cas d'une structure ouverte simple, [40].

Le variable d'articulation q_j associée à la $j^{\text{ème}}$ articulation est soit θ_j ou r_j respectivement articulation de type rotoïde ou prismatique, qui se traduit par la relation :

$$\overline{\sigma}_j = 1, \quad \sigma_j = 0 \quad (4.04)$$

Le coefficient binaire σ_j et son conjugué $\overline{\sigma}_j = 1 - \sigma_j$ définissent le type de la $j^{\text{ème}}$ liaison :

$\sigma_j = 0 \Rightarrow \overline{\sigma}_j = 1$, Si articulation rotoïde.
 $\sigma_j = 1$ Si articulation prismatique.

Nous avons montré les différentes transformations homogènes dans une structure mécanique ouverte, qu'il s'agisse d'une notation pratique pour exprimer les transformations de repères usuelle. Cela est à la base de toute modélisation des éléments géométriques constituant le robot de soudage et son entérinement.

4.2. Modélisation géométrique :

Le modèle géométrique donne la relation entre les variables opérationnelles, \mathbf{X} , représentant la position/orientation de l'organe terminal et les variables articulaires \mathbf{q} qui représentent les translations et les rotations des liaisons articulaires du robot
Le vecteur des variables opérationnelles défini par la matrice :

$$\mathbf{X} = [P_x, P_y, P_z, s_x, s_y, s_z, n_x, n_y, n_z, a_x, a_y, a_z]$$

$$P = \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} \quad (4.05)$$

Est

Le vecteur position de l'origine du repère lié à l'organe terminal par rapport au repère fixe :

$$R(\mathbf{O}_0; \mathbf{X}_0, \mathbf{Y}_0, \mathbf{Z}_0)$$

ET

$$A = [s \ n \ a] = \begin{bmatrix} S_x & n_x & a_x \\ S_y & n_y & a_y \\ S_z & n_z & a_z \end{bmatrix} \quad (4.06)$$

$A = [s \ n \ a]$ est la matrice d'orientation de l'organe terminal exprimée par les cosinus directeurs voir paragraphe **4.1.1**.

Le modèle géométrique direct donne les variables opérationnelles \mathbf{X} en fonction des variables articulaires \mathbf{q} :

$$\mathbf{X} = f(\mathbf{q}).$$

Le modèle géométrique inverse donne les variables articulaires \mathbf{q} en fonction des variables opérationnelles \mathbf{X} :

$$\mathbf{q} = f^{-1}(\mathbf{X}).$$

4.2.1. Détermination du nombre de degrés de liberté du robot :

Pour notre étude on a choisi un robot de 3 axes de rotation, donc Le nombre de degrés de liberté du robot de soudage par points à été 3ddl (**Figure 4.5**).



Figure 4.5. Robot universel pour le soudage par point.

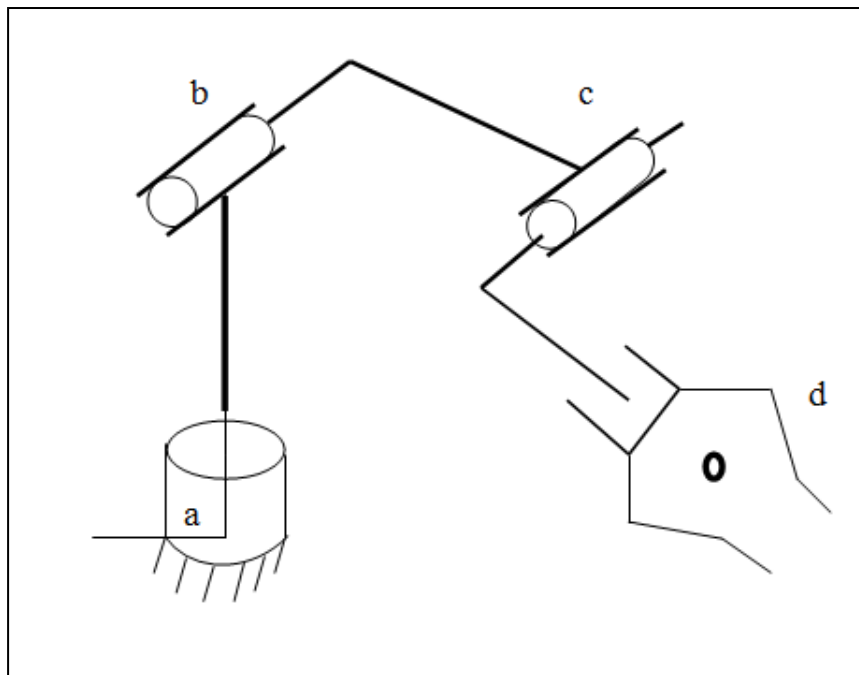


Figure 4.6. Schéma cinématique du robot de soudage par point à 3 ddl

La figure ci- dessous représente : Associer à chacune des articulations un repère

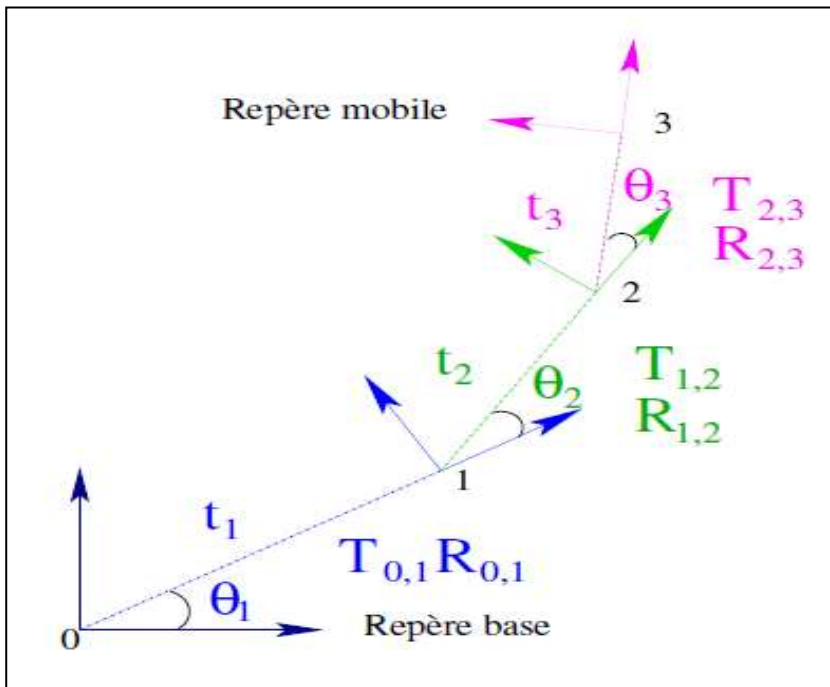


Figure 4.7. Mécanisme de 3 rotations (plan).

4.2.2. Modélisation géométrique directe (MGD) :

Définition :

Le modèle géométrique direct (MGD) d'un bras manipulateur exprime la situation de son OT (organe terminale) en fonction de sa configuration [10] :

$$\begin{cases} f: N \longrightarrow M \\ : q \longrightarrow X = f(a) \end{cases} \quad (4.07)$$

Le calcul du MGD consiste donc à exprimer la position du point **n+1** et l'orientation du repère **Rn** lié à l'OT, en fonction de sa configuration. Il faut pour cela multiplier entre elles les matrices de transformation homogènes successives reliant le repère **RO** lié au bâti au repère **Rn** lié à l'OT :

$$T_0 = {}^0T_1 * {}^1T_2 * {}^2T_3 * \dots * {}^{n-1}T_n \quad (4.08)$$

La matrice (4.02) s'exprime alors comme suit :

$${}^0T_n = \begin{bmatrix} {}^0A_n & {}^0P_1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (4.09)$$

Les variables articulaires d'une structure mécanique sont des angles de rotation et des distances de translations des liaisons rotoïdes et prismatiques.

4.2.2.1. Calcul du Modèle géométrique direct (MGD) du robot a 3 ddl :

La relation géométrique entre la base et l'effecteur notée par **OT6** est déterminée par les produits des matrices élémentaires de transformation entre les corps **C_{rj-1}** et **C_{rj}** avec : $j = 1; \dots; 3$.

Le robot présente trois transformations principales **R₀→R₁→R₂→R₃**.

➤ La matrice de transformation **{}^0T₁**

$$T(0,1) = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -\sin(q_1) & -\cos(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T(1,0) = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & 0 & -\sin(q_1) & 0 \\ -\sin(q_1) & 0 & -\cos(q_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

➤ La matrice de transformation 1T_2

$$T(1,2) = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & -\sin(q_2) & 0 & D_2 \\ \sin(q_2) & \cos(q_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T(2,1) = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & \sin(q_2) & 0 & -\cos(q_2) D_2 \\ -\sin(q_2) & \cos(q_2) & 0 & \sin(q_2) D_2 \\ 0 & 0 & 1 & -r_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

➤ La matrice de transformation 2T_3

$$T(2,3) = \begin{bmatrix} \cos(q_3) & -\sin(q_3) & 0 & D_3 \\ 0 & 0 & -1 & -r_3 \\ \sin(q_3) & \cos(q_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4.2.3. Modélisation géométrique inverse (MGI) :

Définition :

Le modèle géométrique inverse (MGI) d'un robot permet d'obtenir la ou les configurations correspondant à une situation de l'OT donnée. Un MGI est donc tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} f : N \longrightarrow M \\ : q \longrightarrow X = f(a) \end{array} \right. \quad (4.0)$$

La résolution du MGI, c'est-à-dire l'existence d'un nombre fini de solutions, est fondamentale en matière de conception. Supposons que la situation \mathbf{P} d'un bras manipulateur à n liaisons soit exprimée par un nombre m minimal de paramètres. Supposons par ailleurs que \mathbf{P} soit une situation accessible par le bras manipulateur, C'est-à-dire que la situation appartient à l'espace de travail.

Alors (dans la majorité des cas) :

- si $n < m$, il n'existe pas de solution au modèle géométrique inverse (MGI).
- si $n = m$, il existe un nombre fini de solutions en dehors de certaines configurations, appelées configurations singulières.
- si $n > m$, il existe une infinité de solutions.

4.2.3.1. Calcul du Modèle géométrique inverse (MGI) du robot a 3 ddl :

Dans ce cas, nous cherchons les variables articulaires (q)

Calcul de q_3

Puisque ${}^0\mathbf{P}_3 = {}^0\mathbf{P}_4$ on peut écrire que la quatrième colonne du produit des transformations ${}^0\mathbf{T}_1 {}^1\mathbf{T}_2 {}^2\mathbf{T}_3$ est égale à la quatrième colonne de \mathbf{U}_0 soit :

$$\mathbf{T}_3 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0\mathbf{T}_1 {}^1\mathbf{T}_2 {}^2\mathbf{T}_3 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-\sin(q_1)\sin(q_2) + \cos(q_1)\cos(q_2))\cos(q_3)D_4 - (-\cos(q_1)\sin(q_2) - \sin(q_1)\cos(q_2))r_3 + \cos(q_1)D_2 \\ \sin(q_3)D_4 + r_2 \\ (-\cos(q_1)\sin(q_2) - \sin(q_1)\cos(q_2))\cos(q_3)D_4 - (\sin(q_1)\sin(q_2) - \cos(q_1)\cos(q_2))r_3 - \sin(q_1)D_2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$P_x = (-\sin(q_1)\sin(q_2) + \cos(q_1)\cos(q_2))\cos(q_3)D_4 - (-\cos(q_1)\sin(q_2) - \sin(q_1)\cos(q_2))r_3 + \cos(q_1)D_2$$

$$P_y = \sin(q_3)D_4 + r_2$$

$$P_z = (-\cos(q_1)\sin(q_2) - \sin(q_1)\cos(q_2))\cos(q_3)D_4 - [\sin(q_1)\sin(q_2) - \cos(q_1)\cos(q_2)]r_3 - \sin(q_1)D_2$$

Nous pré-multiplions les deux membres par 1T_0 , et nous identifions, terme à terme, les deux membres, Nous aurons :

- Identification entre les deux éléments $U_2, {}^2T_3$

$$U2[0,3] = {}^0T_3 [0,3],$$

$$U2[1,3] = {}^1T_3 [1,3],$$

$$U2[2,3] = {}^2T_3 [2,3],$$

$$\begin{cases} \cos(q_2)(\cos(q_1)P_x - \sin(q_1)P_z) + \sin(q_2)(-\sin(q_1)P_x - \cos(q_1)P_z) - \cos(q_2)D_2 = \cos(q_3)D_3 + D_2 & (1) \\ -\sin(q_2)(\cos(q_1)P_x - \sin(q_1)P_z) + \cos(q_2)(-\sin(q_1)P_x - \cos(q_1)P_z) + \sin(q_2)D_2 = -r_2 & (2) \\ P_y - r_2 = \sin(q_3)D_3 & (3) \end{cases}$$

A partir de l'équation (3) on trouve :

A partir de l'équation (3) on trouve :

$$\sin(q_3) = \frac{(P_z - r^2)}{D_2}$$

Avec :

$$\cos(q_3)^2 = 1 - \sin(q_3)^2$$

Donc :

$$q_3 = \arctang\left(\frac{s_3}{c_3}\right)$$

On peut calculer q_2 en considère les deux premières équations. (1) (2)

Dans un premier temps en élevant chaque équation au carré et en faisant leur somme ; on détermine q_2 (solution d'un système d'équation de type 2.

$$X \sin(q_2) + Y \cos(q_2) = Z$$

Avec :

$$X = 2 r_3 D_2$$

$$Y = \cos(q_3) D_3 D_2 + D_2 D_3$$

$$Z = P_x^2 + P_z^2 - \cos(q_3)^2 D_3^2 - D_2^1 - 2\cos(q_3) D_3 D_2 - r_3^2 - D_2^2$$

$$\sin(q_2) = \frac{XZ - \varepsilon X \sqrt{X^2 + Y^2 - Z^2}}{X^2 + Y^2}$$

$$\cos(q_2) = \frac{YZ + \varepsilon Y \sqrt{X^2 + Y^2 - Z^2}}{X^2 + Y^2}$$

Résolution de q_2 :

$$q_2 = \text{atan2}(\sin(q_2) \cos(q_2))$$

$$\begin{cases} \cos(q_2)(\cos(q_1)P_x - \sin(q_1)P_z) + \sin(q_2)(-\sin(q_1)P_x - \cos(q_1)P_z) - \cos(q_2)D_2 = \cos(q_3)D_3 + D_3 & (4) \\ -\sin(q_2)(\cos(q_1)P_x - \sin(q_1)P_z) + \cos(q_2)(-\sin(q_1)P_x - \cos(q_1)P_z) + \sin(q_2)D_2 = -r_3 & (5) \\ P_y - r_2 = \sin(q_3)D_3 \end{cases}$$

On considère les équations (4) et (5) et on résolvant un système de type 3 en q_1 telle que :

$$X_1 = -\cos(q_2) P_z - \sin(q_2) P_x$$

$$Y_1 = \cos(q_2)P_x - \sin(q_2)P_z$$

$$X_2 = -Y_1$$

$$Y_2 = X_1$$

$$Z_1 = \cos(q_3)D_4 + \cos(q_2)D_2 + D_3$$

$$Z_2 = -r_3 - \sin(q_2)D_2$$

La condition $X_1 Y_2 - X_2 Y_1$ Différent de 0 signifie que les deux équations [4] et [5] sont indépendantes. Mais dans notre cas il y a une relation entre X et Y comme le montre l'équation [a] et [b]

Dans ce cas on choisit l'une des équations et on résout une équation de type 2

$$\sin(q_1) = \frac{X_1 Z_1 - \varepsilon X_1 \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 - Z_1^2}}{X_1^2 + Y_1^2}$$

$$\cos(q_1) = \frac{Y_1 Z_1 + \varepsilon Y_1 \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 - Z_1^2}}{X_1^2 + Y_1^2}$$

Résolution de q_1 :

$$q_1 = \text{atan2}(\sin(q_2), \cos(q_2))$$

4.3. Modélisation Cinématique :

La modélisation cinématique d'un robot manipulateur détermine la relation entre la vitesse articulaire pour $i=1\dots n$ et la vitesse de la sonde sur le corps du patient : \mathbf{V} (vitesses linéaires) et $\boldsymbol{\omega}$ (vitesse angulaire).

Le modèle cinématique direct ou inverse est basé sur la matrice jacobéenne de base. Nous utiliserons également les deux modèles cinématiques directe et inverse et on prend en considération les mêmes paramètres géométriques.

4.3.1. Modélisation cinématique directe (MCD) du robot à 3ddl :

Le modèle cinématique directe du robot décrit les variations élémentaires des coordonnées opérationnelles en fonction des variations élémentaires des coordonnées articulaire. Il est noté :

$$\left\{ \begin{array}{l} dX = J(q) dq \\ \dot{X} = f(q, \dot{q}) \end{array} \right.$$

$J(q)$: désigne la matrice jacobéenne de dimensions $(\mathbf{m} \times \mathbf{n})$ du mécanisme, donnée par :

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_{n-1}}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_{n-1}}{\partial x_{n-1}} & \frac{\partial f_{n-1}}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_{n-1}} & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

A partir de l'équation de jacobéenne J on trouve :

$$\begin{bmatrix} J[1.1] & J[1.2] & J[1.3] \\ J[2.1] & J[2.2] & J[2.3] \\ J[3.1] & J[3.2] & J[3.3] \end{bmatrix}$$

$$J[1.1] = -\cos(q_1)(d_3 \sin(q_2) - r_3 \cos(q_2) + d_2 \cos(q_3) \sin(q_2)) - \sin(q_1)(d_2 + d_2 \cos(q_2) + r_3 \sin(q_2) + d_3 \cos(q_2) \cos(q_3))$$

$$J[1.2] = r_3 [\cos(q_1 + q_2)] - [d_2 + d_3 \cos(q_3)] \sin(q_1 + q_2)$$

$$J[1,3] = -d_3 \sin(q_3) [\cos(q_1) \cos(q_2) - \sin(q_1) \sin(q_2)]$$

$$J[2.1] = 0$$

$$J[2,2] = 0$$

$$J[3,1] = \sin(q_1) [d_2 \sin(q_2) - r_3 \cos(q_2) + d_3 \cos(q_3) \sin(q_2)] - \cos(q_1) [d_2 + d_3 \cos(q_2) + r_3 \sin(q_2) + d_3 \cos(q_2) \cos(q_3)]$$

$$J[3,2] = -[d_2 + d_3 \cos(q_3)] [\cos(q_1 + q_2)] - r_3 \sin(q_1 + q_2)$$

$$J[3,3] = d_3 \sin(q_3) [\cos(q_1) \sin(q_2) + \cos(q_2) \sin(q_1)]$$

D'après les résultats de la dérivation de la matrice jacobéenne on peut calculer les vitesses angulaire (ω) et la vitesse linéaire (V).

On calcule la vitesse angulaire :

$$\omega = [0 \quad 0 \quad 0]$$

$$\omega_1 = [0 \quad 0 \quad qp_1]$$

$$\omega_2 = [0 \quad 0 \quad qp_1 + qp_2]$$

$$\omega_3 = [s(q_3)(qp_1 + qp_2) \quad c(q_3)(qp_1 + qp_2) \quad qp_3]$$

On calcule la vitesse linéaire :

$$V_0 = [0 \quad 0 \quad 0]$$

$$V_1 = [0 \quad 0 \quad 0]$$

$$V_2 = [s(q_2)qp_1D_2c(q_2)qp_1D_2 \quad 0]$$

$$V_3 = [c(q_3)(s(q_2)qp_1D_2 + (qp_1 + qp_2)r_3) \quad -s(q_3)(s(q_2)qp_1D_2 + (qp_1 + qp_2)r_3) \quad -c(q_2)qp_1D_2]$$

4.3.2. Modélisation cinématique inverse (MCI) :

L'objectif du modèle différentiel inverse est de calculer, à partir de la configuration q donnée, la différentielle d'articulation dq à commander pour satisfaire une différentielle des coordonnées opérationnelles dX imposée [10].

$$\dot{q} = J^{-1} * \dot{X}$$

Dans notre travail ne peut pas être calculé le modèle inverse et la modélisation dynamique parce que ne fait pas partie de la commande et la simulation.

Conclusion :

L'étude de la morphologie d'un robot de soudage par point nous a révélé les possibilités d'optimisation (vitesses et accélérations) du robot

L'association d'un appareil de contrôle non destructif du point de soudeur est plus que Souhaitable pour la qualité.

La difficulté de cette association (appareil de contrôle- pince), engendrée par la propagation de chaleur, a été résolue par l'utilisation d'une source génératrice de rayon X, ne nécessitant pas de contact direct avec les tôles.

Référence Bibliographique :

- [1][2] Cours de robotique fondamental David .Daney sophia.inria.fr
[3] module-de-formation-soudage-par-Resistance
- [4] [5] [10] Centre du Liban associe au Conservatoire national des arts et métiers – Paris
2012.TH.18478.Sarkis.Elias
- [6] [11] Modélisation du procédé de soudage par points Chainarong Srikunwong ED n° 432:
Sciences des métiers de l'ingénieur
- [7] Letyet al : 2007
- [8] [9] chapitre 6 soudage par point Sélection de modèles non linéaires par "leave-one-out": étude théorique et application des réseaux de neurones
Au procédé de soudage par points Gaétan Monari
- [12] [13] [14] Modélisation du procédé de soudage par points Chainarong Srikunwong ED n° 432: Sciences des métiers de l'ingénieur
- [15] [16] [17] [18] [19] livre de construction mécanique Mr. mouhamed Mansori université Badji_ Moukhtar
- [20] [21] technique des matériaux
- [22] [23] [24] [25] [27] [28] [29] [30] livret_CND_Chalmont
- [31][33] DS-Dynamique-RdM-Qualification-Pince de soudage (*Centrale S2I 1 2006*)
- [32] TRANSFORMER L'ENERGIE12_VERINS.doc
- [37][38][39] Les assemblages thermiques-serp-prof
- JEAN-LOUIS BOIMOND, robotique, Université Angers.*
http://lars.mec.ua.pt/public/LAR%20Projects/Humanoid/2011_RicardoGodinho/Pesquisa%20Diserta%C3%A7%C3%A3o/Cours_robotique.pdf, consulté le 21/12/2012.
- s.S. BABU, M.L. SANTELLA, Z. FENG, B.W. RIEMER, and J.W. COHON: "Empirical Model of Effects of Pressure and Temperature on Electrical Contact Resistance of Metals", *Science and Technology of Welding and Joining*, 6, 2001, 126-132.
- B.M. BROWN: "A Comparison of AC and DC Current in the Resistance Spot Welding of Automotive Steels", *Welding Journal*, Jan. 1987, 18-23.
- 4836-fanuc-introduction-la-robotique-juin-2014
MICHEL FAYOLLE, Aspects mécaniques en robotique, ENSTA

JEAN-LOUIS BOIMOND, robotique, Université Angers.
http://lars.mec.ua.pt/public/LAR%20Projects/Humanoid/2011_RicardoGodinho/Pesquisa%20Disserta%C3%A7%C3%A3o/Cours_robotique.pdf, consulté le 21/12/2012.

JEAN MICHEL OLIVE, Architecture mécanique des robots, Marseille, 2000.

Le soudage par point— Wikipédia

Les aciers à usage général Wikipédia

Les contrôle par rayons X **MESURES 743** - MARS 2002

Acier — Wikipédia-fichiers

Appareil de radiologie dentaire,

cinematique_des_robots_series