



## Épreuve de Sciences Industrielles PSI

Durée 5 h

---

**Etude d'une machine de  
soudage par friction – malaxage :  
le « *Friction – Stir Welding* » (FSW)**

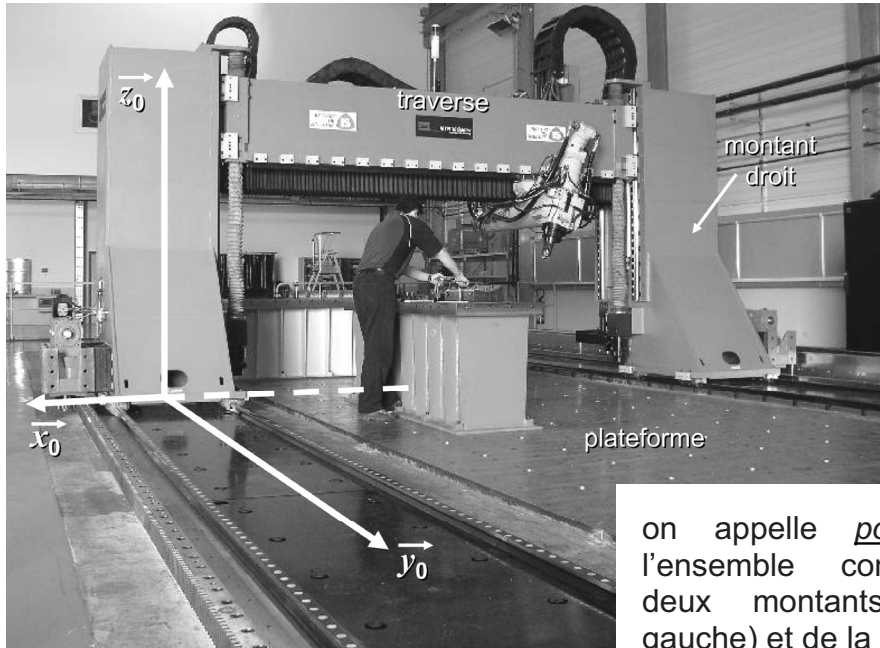
---

## DOSSIER TECHNIQUE

## - ANNEXES -

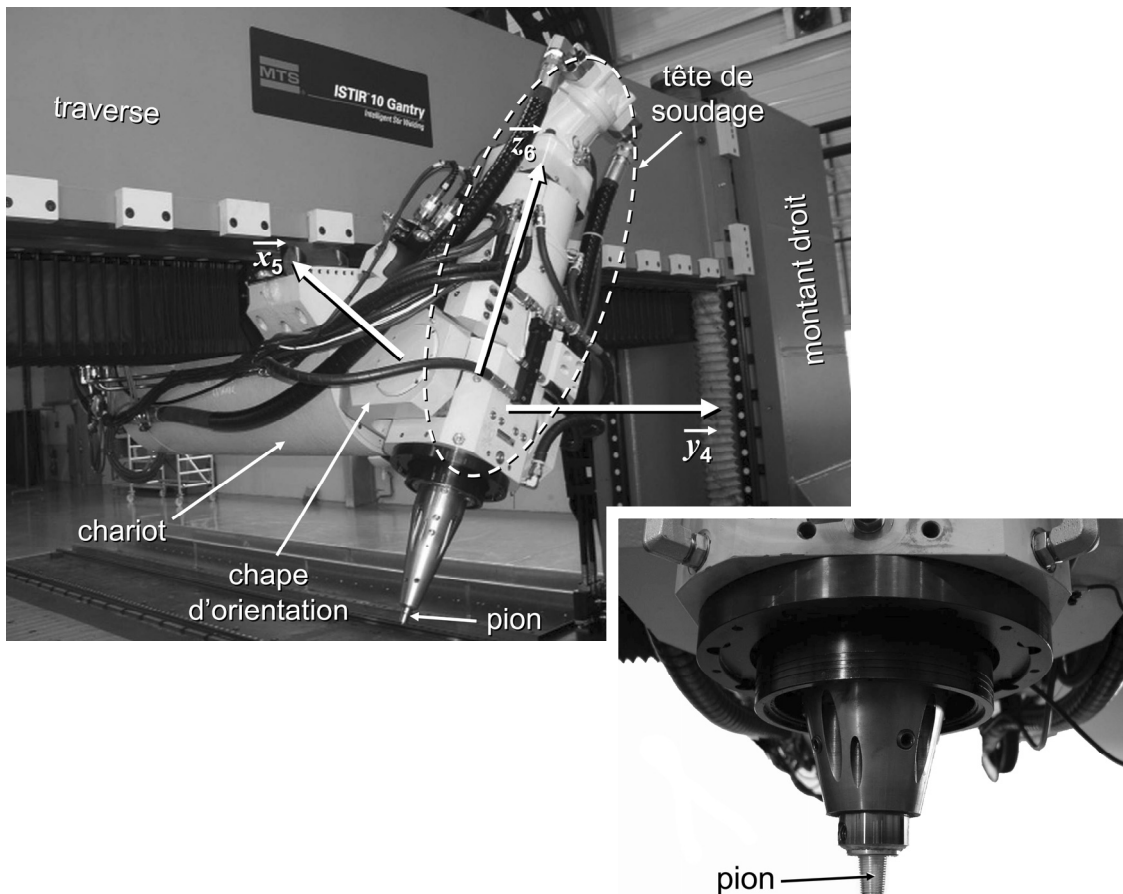
	page
<b>Annexe A</b> .....	2
▪ Description globale de la machine de soudage « FSW », mise en place des axes principaux	
<b>Annexe B</b> .....	3
▪ Schéma cinématique simplifié de la machine de soudage « FSW »	
<b>Annexe C</b> .....	3
▪ Définition des variables géométriques	
<b>Annexe D</b> .....	4
▪ Détails du système d'entraînement du portique	
<b>Annexe E</b> .....	5
▪ Masses et inerties de la tête, du portique et de son système d'entraînement	
<b>Annexe F</b> .....	6
▪ Eprouvette en « V »	
<b>Annexe G</b> .....	10
▪ Description du système de bridage à genouillère	
<b>Annexe H</b> .....	12
▪ Données expérimentales obtenues lors d'un essai de soudage linéaire suivant l'axe $(O_0, \vec{y}_0)$	
<b>Annexe I</b> .....	14
▪ Conditions opératoires pour réaliser des essais de soudage avec de fortes accélérations en début de soudage	
<b>Annexe J</b> .....	16
▪ Système de sécurité de la machine de soudage « FSW »	
<b>Annexe K</b> .....	18
▪ Asservissement en position du portique de la machine de soudage « FSW » sur l'axe $(O_0, \vec{y}_0)$	
<b>Annexe L</b> .....	19
▪ Asservissement de l'effort de pression verticale sur la machine de soudage « FSW »	

- Vue globale



on appelle portique ( $\Sigma_{12}$ ) l'ensemble constitué des deux montants (droit et gauche) et de la traverse.

- Détails de la tête de soudage



**Annexe B**

**Schéma cinématique simplifié  
de la machine de soudage « FSW »**

Courses de la machine :

$$0 \text{ mm} \leq l_x \leq 3000 \text{ mm}$$

$$0 \text{ mm} \leq l_y \leq 19000 \text{ mm}$$

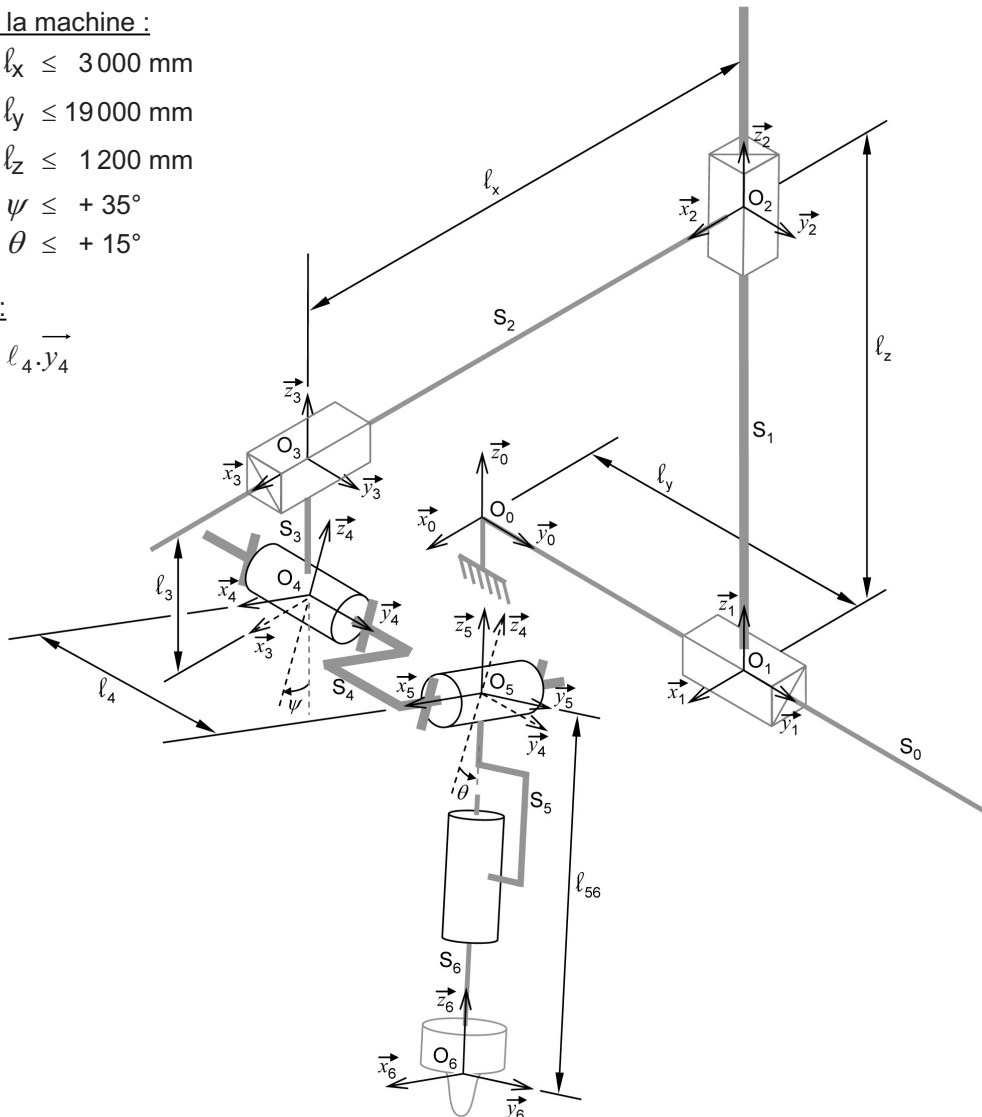
$$0 \text{ mm} \leq l_z \leq 1200 \text{ mm}$$

$$-35^\circ \leq \psi \leq +35^\circ$$

$$-15^\circ \leq \theta \leq +15^\circ$$

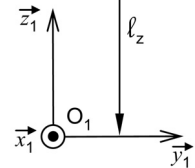
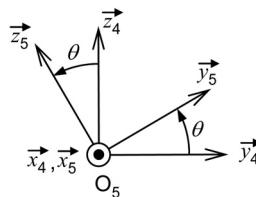
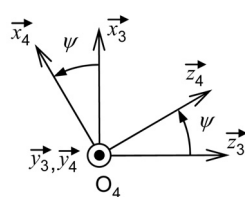
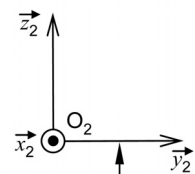
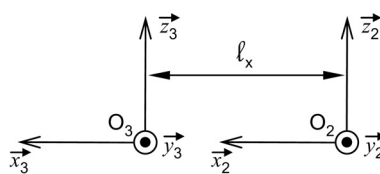
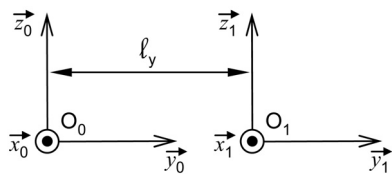
On précise :

$$\vec{O_4O_5} = l_4 \cdot \vec{y}_4$$

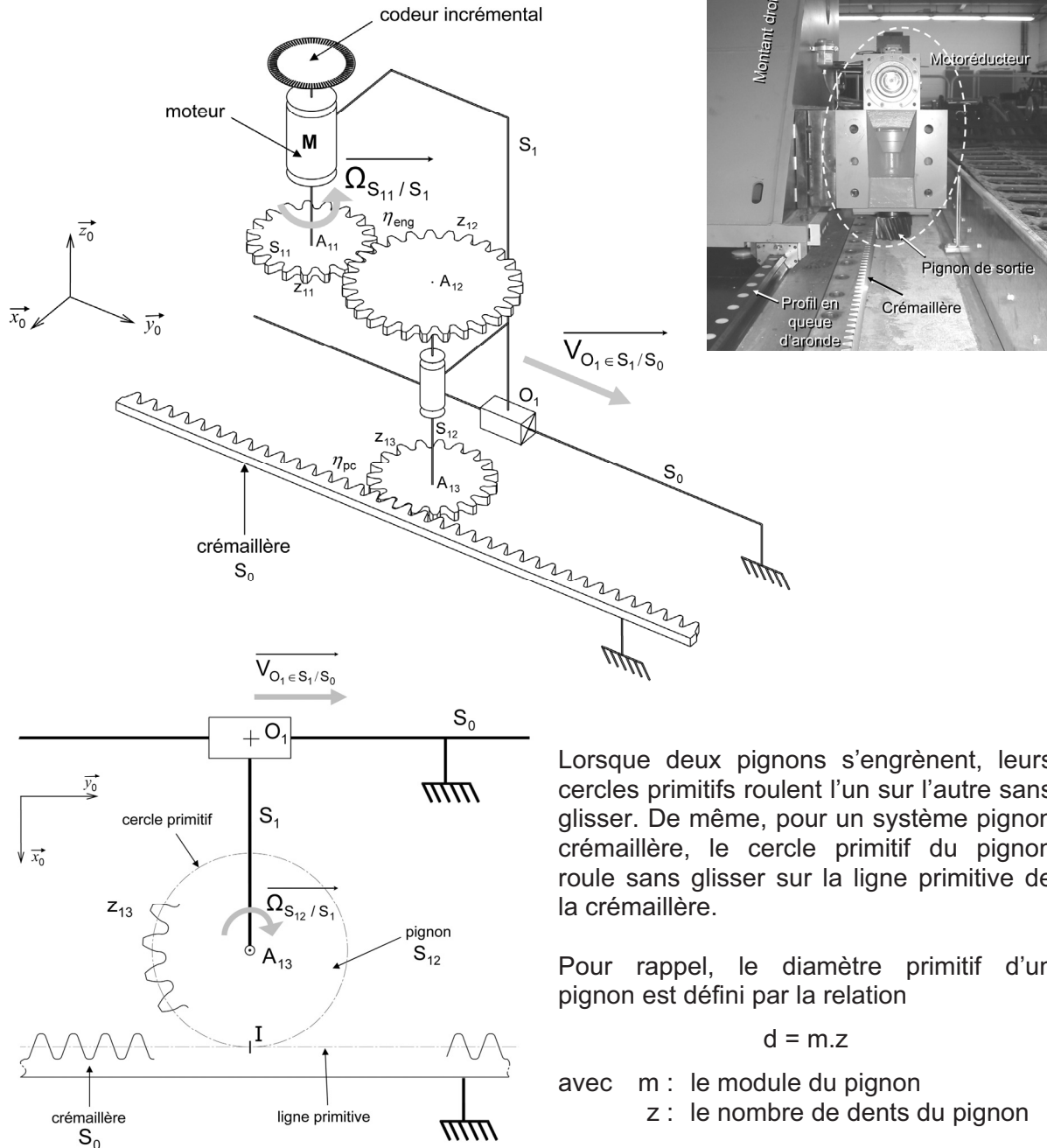


**Annexe C**

**Définition des variables géométriques**



Le portique constitué des montants et de la traverse ( $\Sigma_{12} = S_1 + S_2 + S_1'$ ) peut se déplacer en translation suivant l'axe  $(O_0, \vec{y}_0)$ . Le système est symétrique : le montant droit et le montant gauche sont liés chacun à un motoréducteur hydraulique qui fait rouler un pignon sur une crémaillère. Les illustrations ci-dessous expliquent le sous-système du coté droit, on retrouve un sous-système identique du coté gauche.

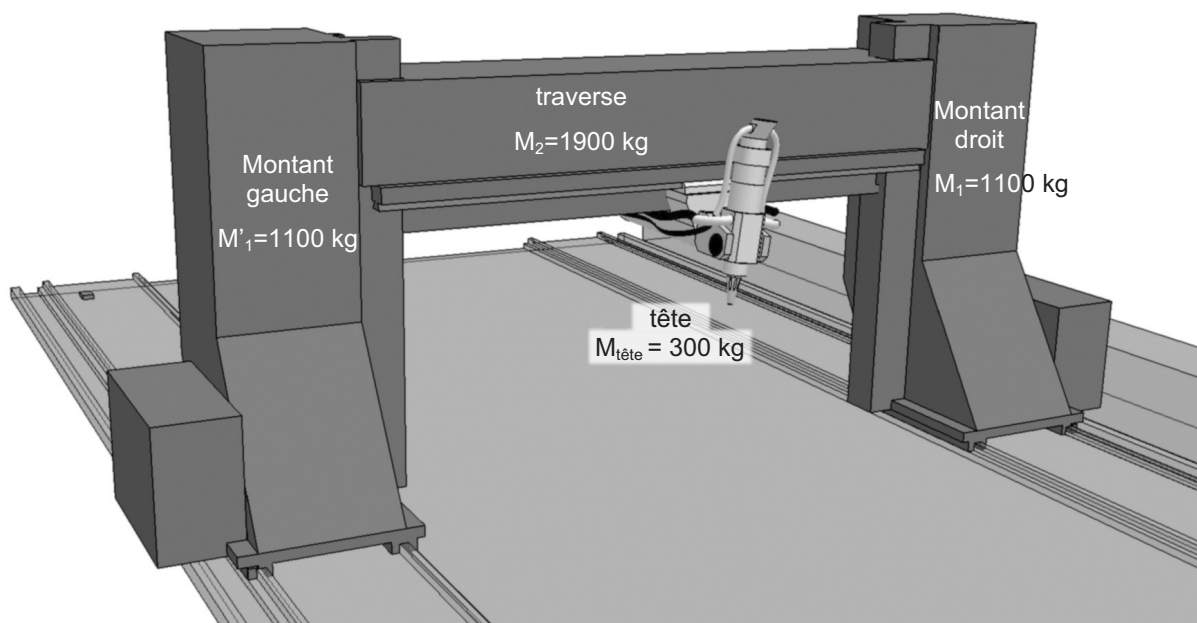


Valeurs numériques :

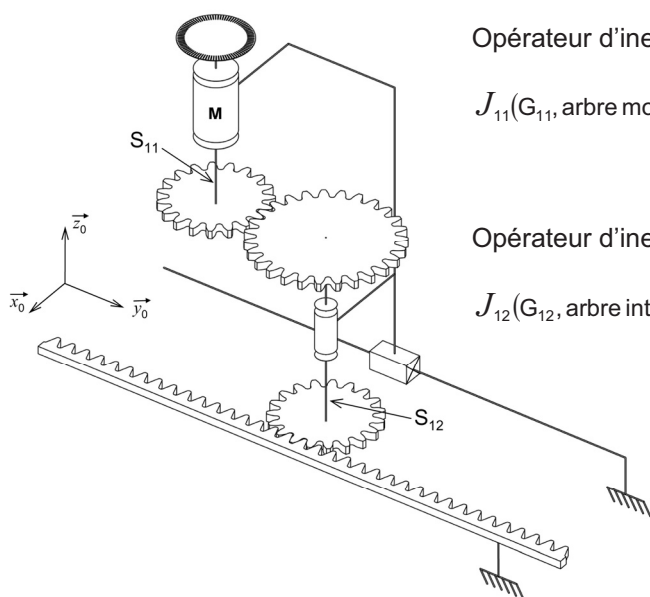
$Z_{11}$	19
$Z_{12}$	27
$Z_{13}$	19
$m$	4 mm

Rendements de la transmission	
système pignon crémaillère	$\eta_{pc} = 0,95$
engrenage $Z_{11}-Z_{12}$	$\eta_{eng} = 0,98$
rendement hydraulique du moteur	$\eta_{hydrau} = 0,65$

### ▪ Masses



### ▪ Inerties



Opérateur d'inertie de l'arbre moteur  $S_{11}$  :

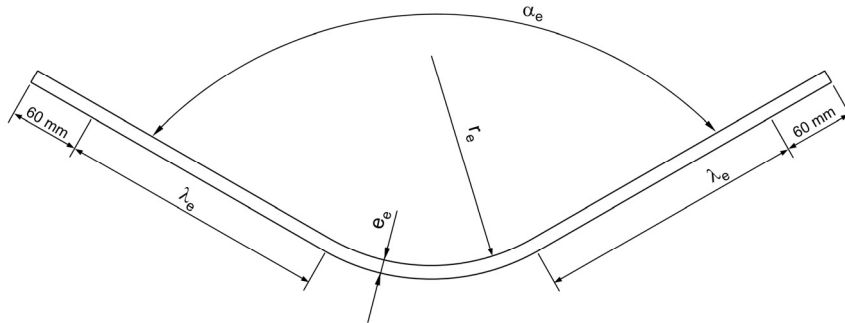
$$J_{11}(G_{11}, \text{arbre moteur}) = \begin{bmatrix} A_{11} = 0,114 & -F_{11} = 0 & -E_{11} = 0 \\ -F_{11} = 0 & B_{11} = 0,114 & -D_{11} = 0 \\ -E_{11} = 0 & -D_{11} = 0 & C_{11} = 0,009 \end{bmatrix}_{R_0}$$

Opérateur d'inertie de l'arbre intermédiaire  $S_{12}$  :

$$J_{12}(G_{12}, \text{arbre intermédiaire}) = \begin{bmatrix} A_{12} = 0,480 & -F_{12} = 0 & -E_{12} = 0 \\ -F_{12} = 0 & B_{12} = 0,480 & -D_{12} = 0 \\ -E_{12} = 0 & -D_{12} = 0 & C_{12} = 0,040 \end{bmatrix}_{R_0}$$

(Valeurs exprimées en  $\text{kg.m}^2$ )

- Description paramétrique

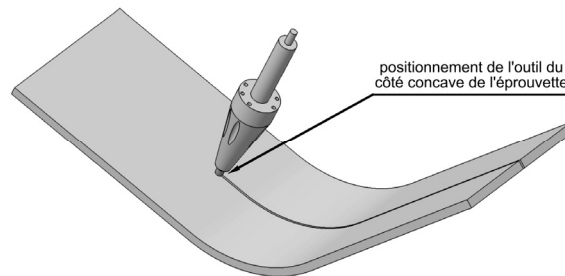


L'éprouvette réalisée est caractérisée par

- ✓ son épaisseur :  $e_e$
- ✓ sa longueur des parties planes :  $\lambda_e$
- ✓ son rayon de raccord :  $r_e$  ( $r_e \geq 100$  mm)
- ✓ son angle d'ouverture :  $\alpha_e$

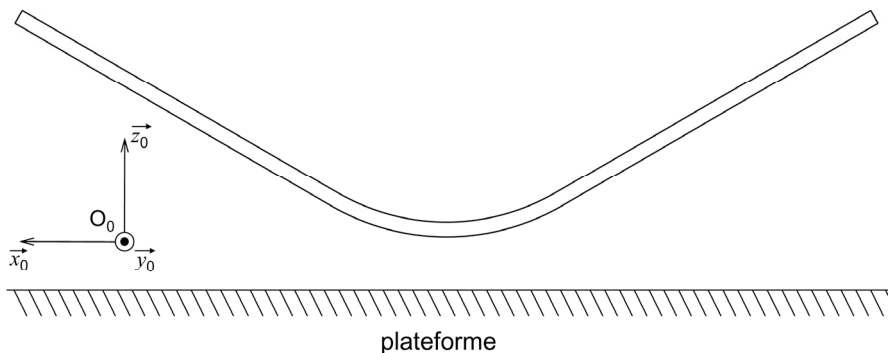
Le procédé de soudage « FSW » oblige de laisser de part et d'autre des parties planes des appendices de 60 mm qui servent à l'entrée et à la sortie du pion. Ces appendices sont ensuite découpés pour obtenir l'éprouvette finale.

- Définition du soudage concave



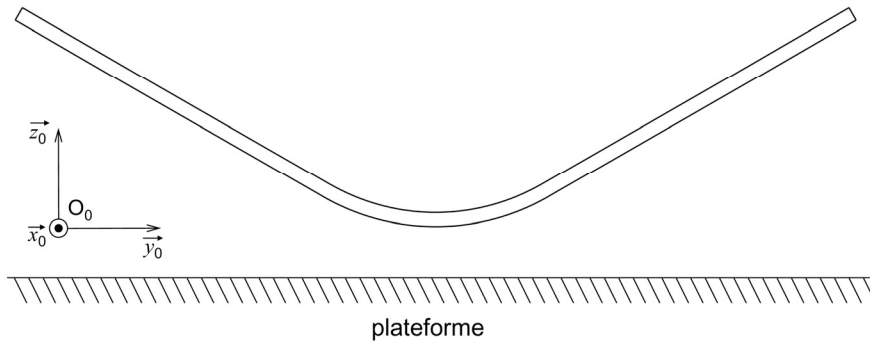
- Posages envisagés (1/4)

- ✓ cas 1 : en « V », avec le cordon de soudure réalisé dans le plan  $(\vec{x}_0, \vec{z}_0)$

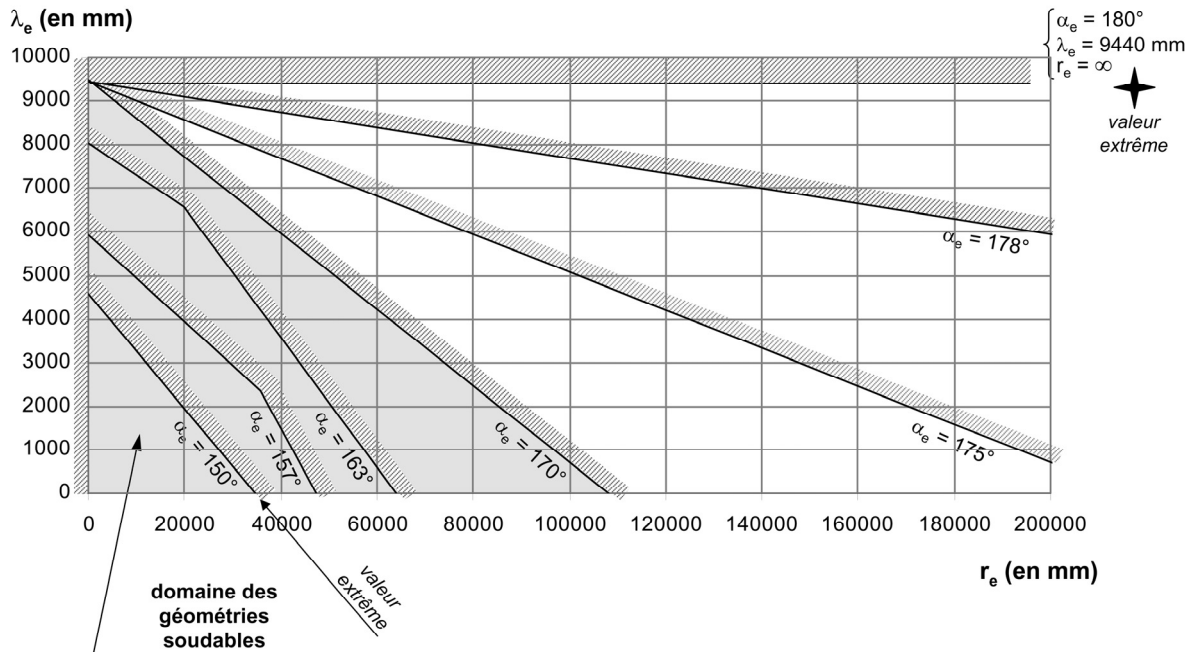


▪ Posages envisagés (2/4)

✓ cas 2 : en « V », avec le cordon de soudure réalisé dans le plan  $(\vec{y}_0, \vec{z}_0)$



**Domaine des géométries soudables pour le posage en « V »,  
avec le cordon de soudure réalisé dans le plan  $(\vec{y}_0, \vec{z}_0)$ .**

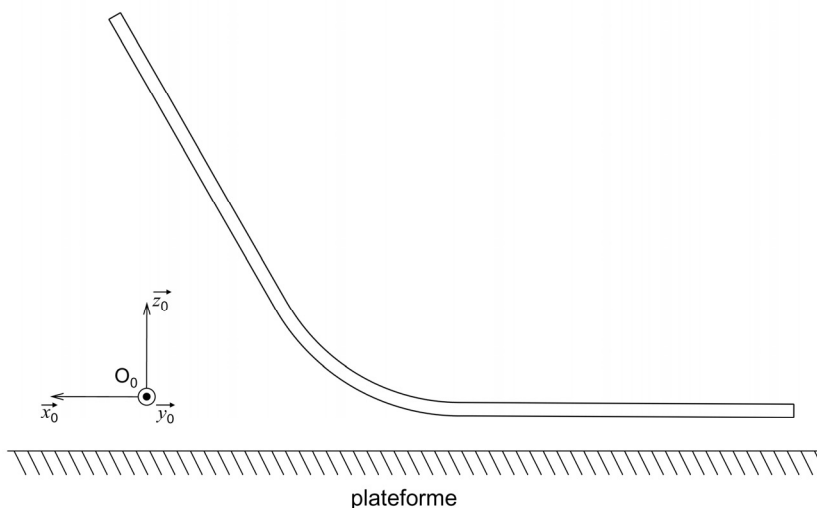


Exemple d'interprétation :

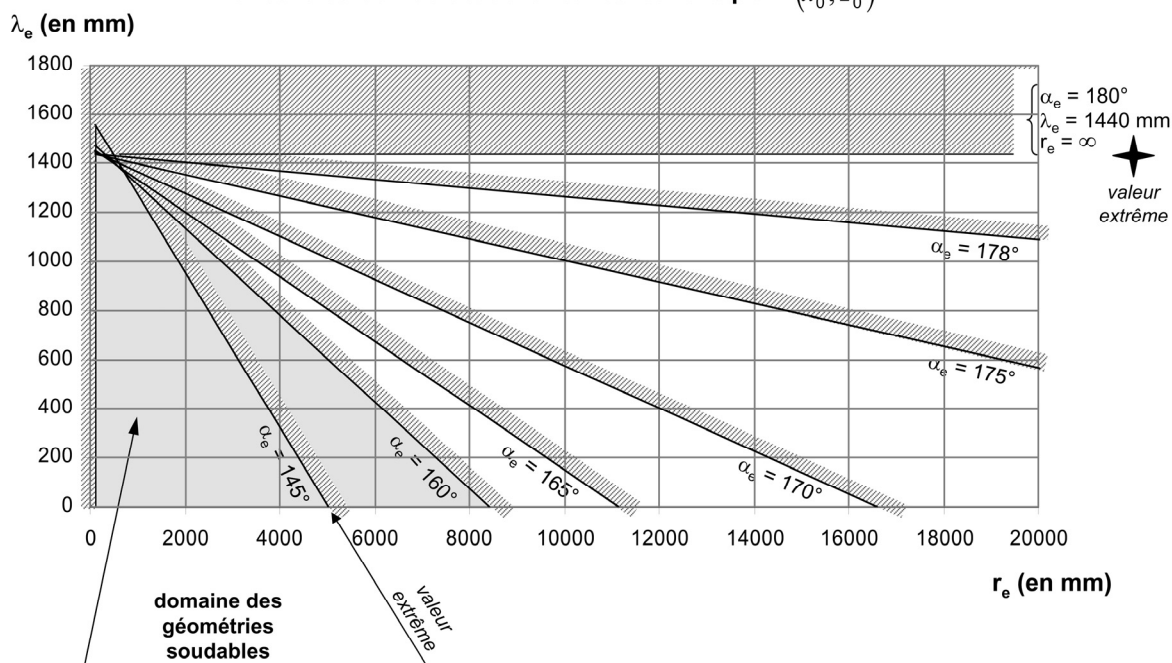
 Domaine des géométries soudables pour  $\alpha_e = 170^\circ$

▪ Posages envisagés (3/4)

✓ cas 3: « à plat », avec le cordon de soudure réalisé dans le plan  $(\vec{x}_0, \vec{z}_0)$

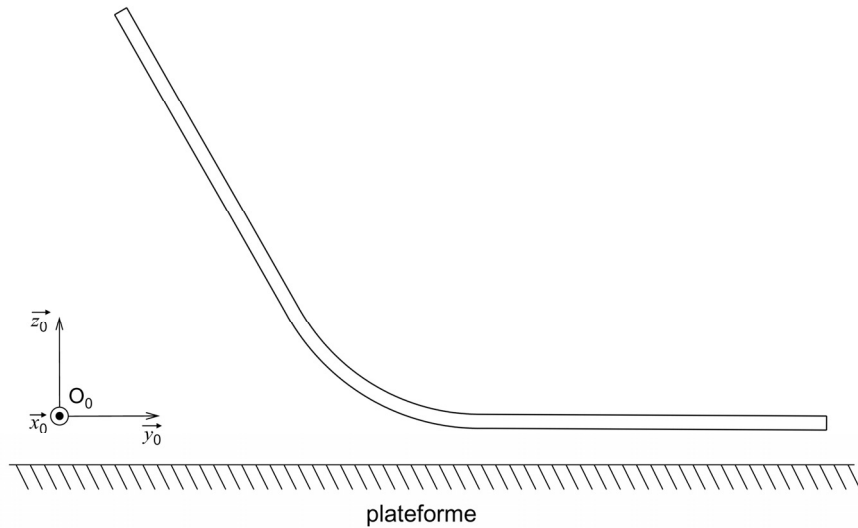


Domaine des géométries soudables pour le posage « à plat »,  
avec le cordon de soudure réalisé dans le plan  $(\vec{x}_0, \vec{z}_0)$ .

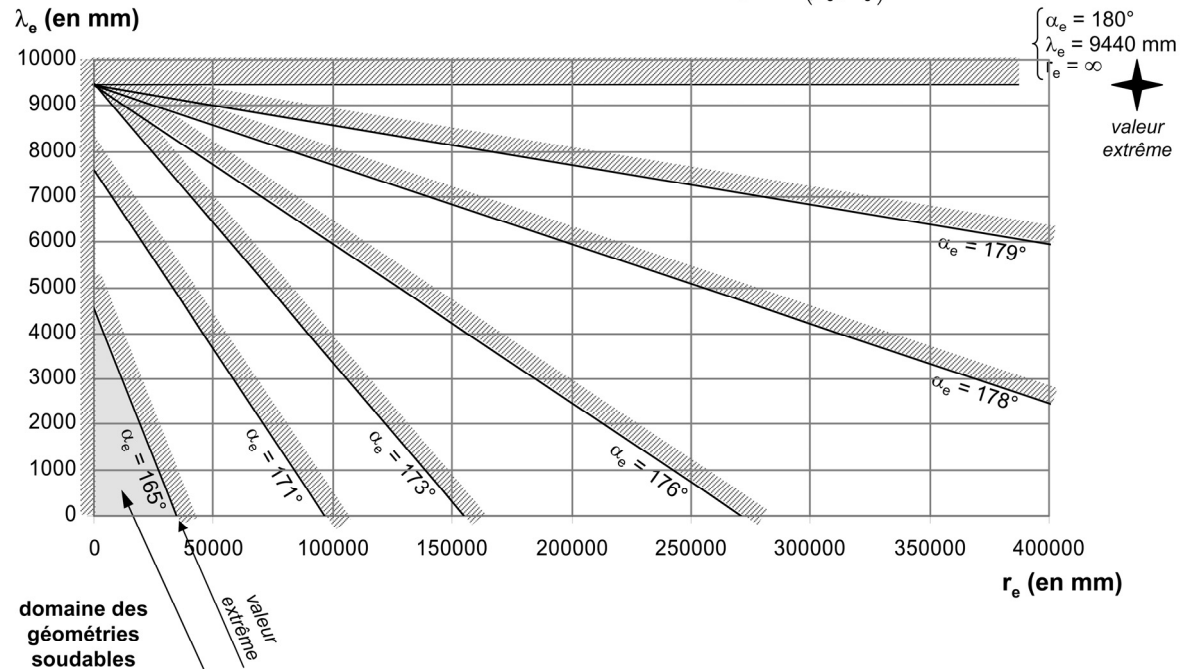


▪ Posages envisagés (4/4)

- ✓ cas 4 : « à plat », avec le cordon de soudure réalisé dans le plan  $(\vec{y}_0, \vec{z}_0)$



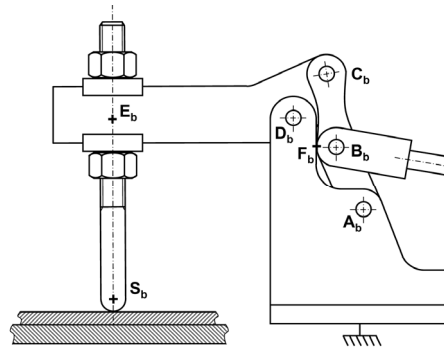
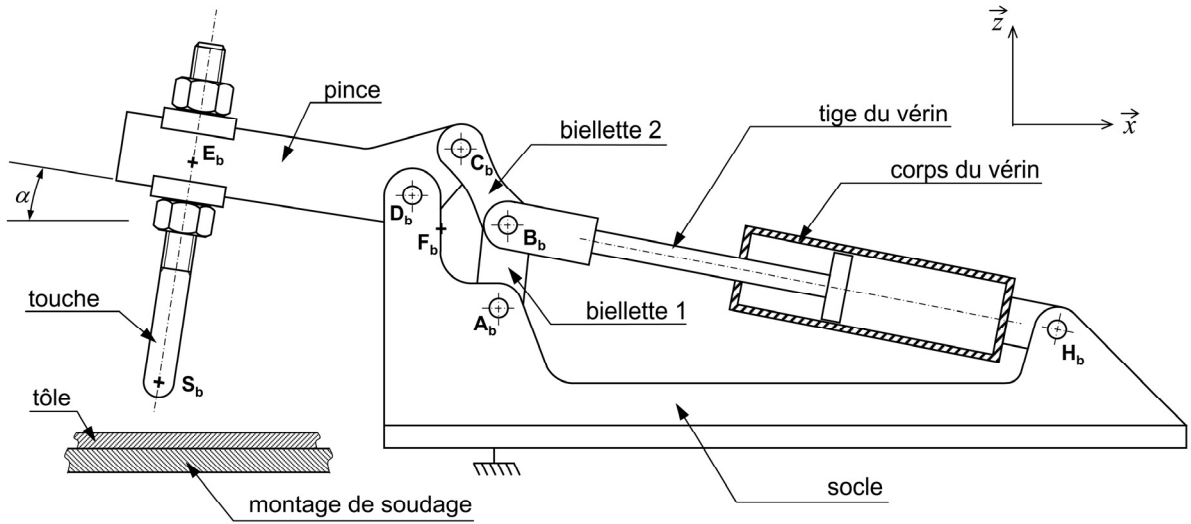
Domaine des géométries soudables pour le posage « à plat »,  
avec le cordon de soudure réalisé dans le plan  $(\vec{y}_0, \vec{z}_0)$ .



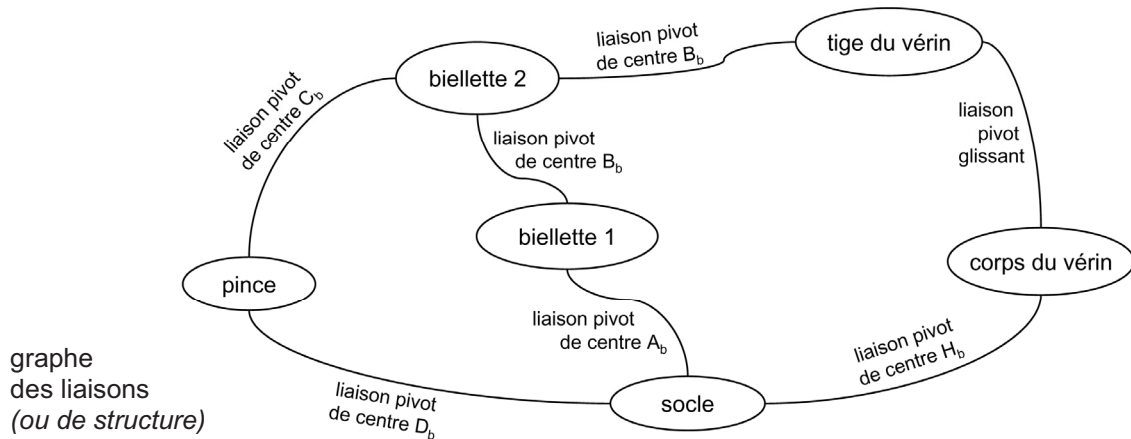
Exemple d'interprétation :

 Domaine des géométries soudables pour  $\alpha_e = 165^\circ$

▪ Schéma de principe du système de bridage

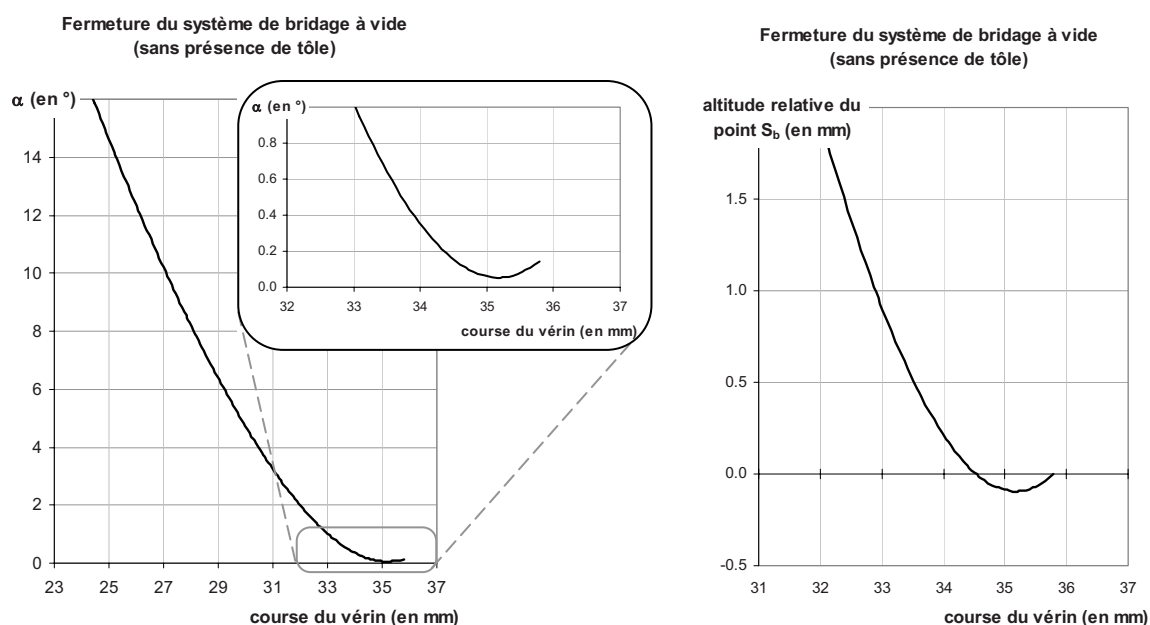


système de bridage en position verrouillée

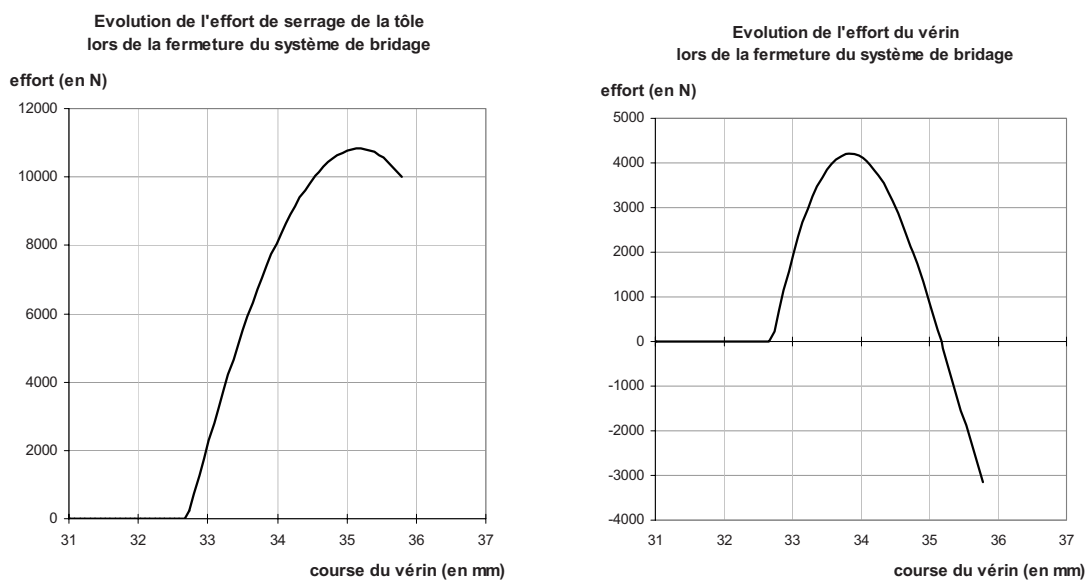


graphe des liaisons (ou de structure)

- Variation des paramètres géométriques du système de bridage à vide (sans présence de tôle)



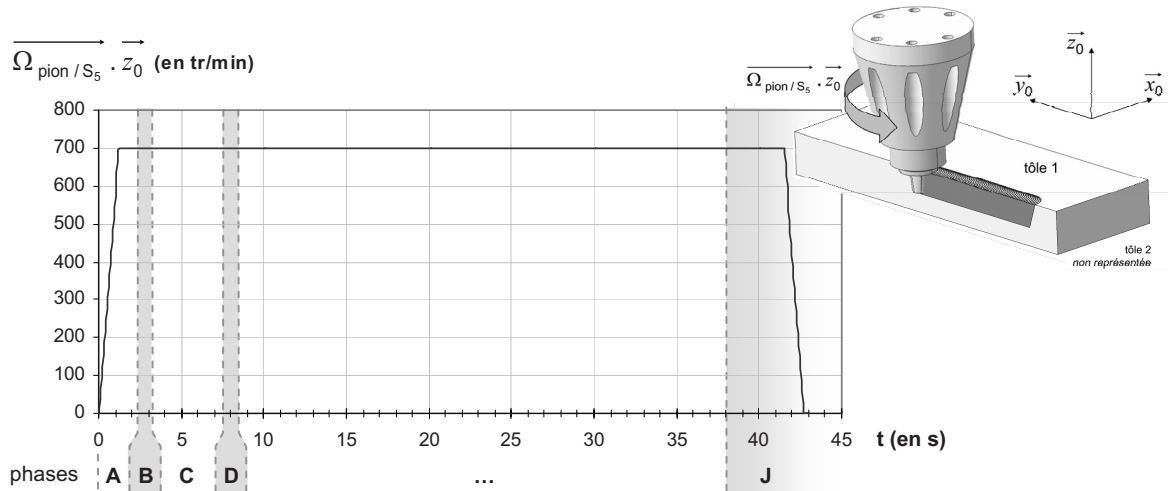
- Allure des efforts dans le système de bridage lors du serrage de la tôle



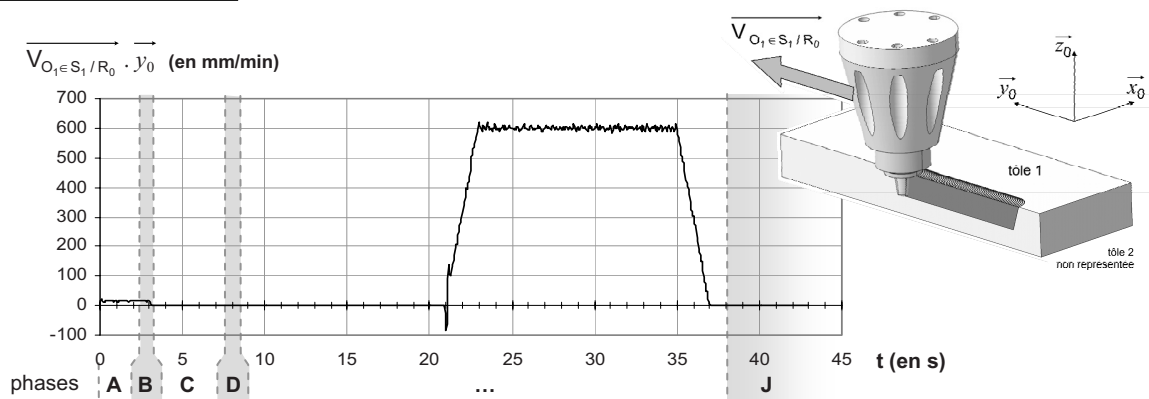
*Nota :* l'origine de la course du vérin a été choisie arbitrairement, un décalage d'origine peut être effectué.

Les données mesurées sont représentées sur l'ensemble de six courbes.  
La base temps est identique pour chacun des relevés.

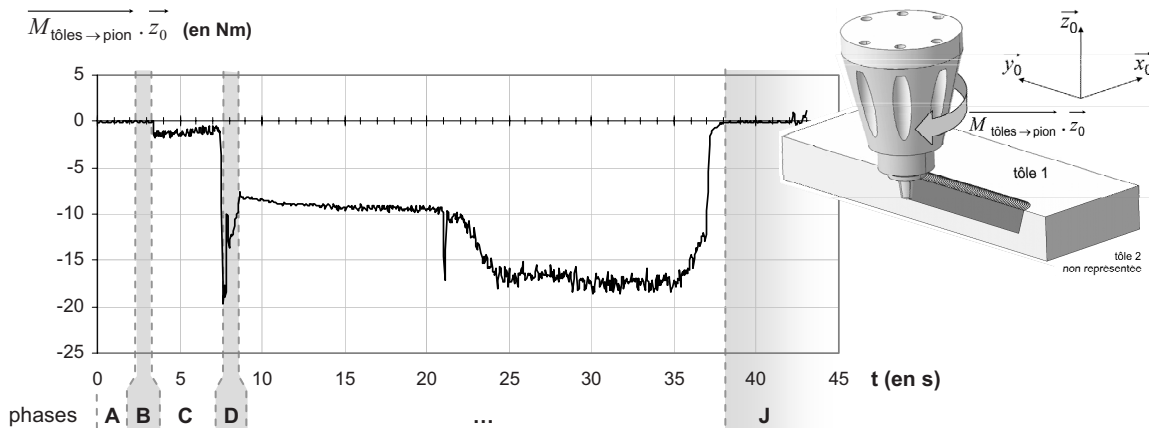
▪ Vitesse de rotation du pion



▪ Vitesse d'avance

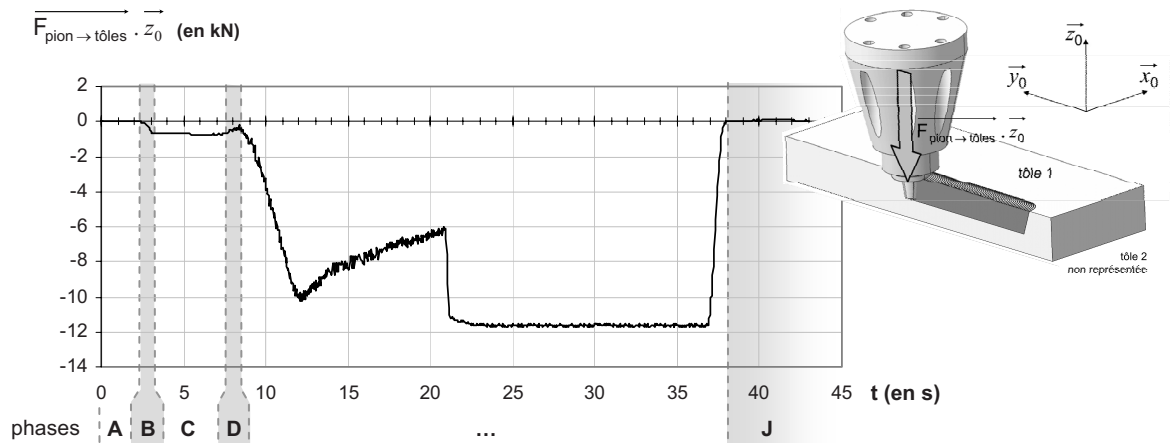


▪ Moment du couple résistant des tôles sur le pion

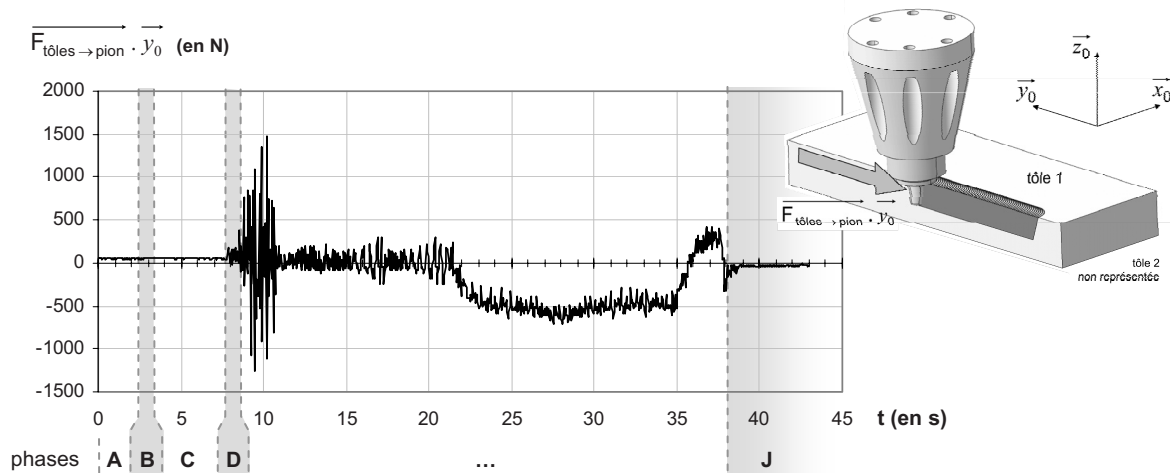


Les données mesurées sont représentées sur l'ensemble de six courbes.  
La base temps est identique pour chacun des relevés.

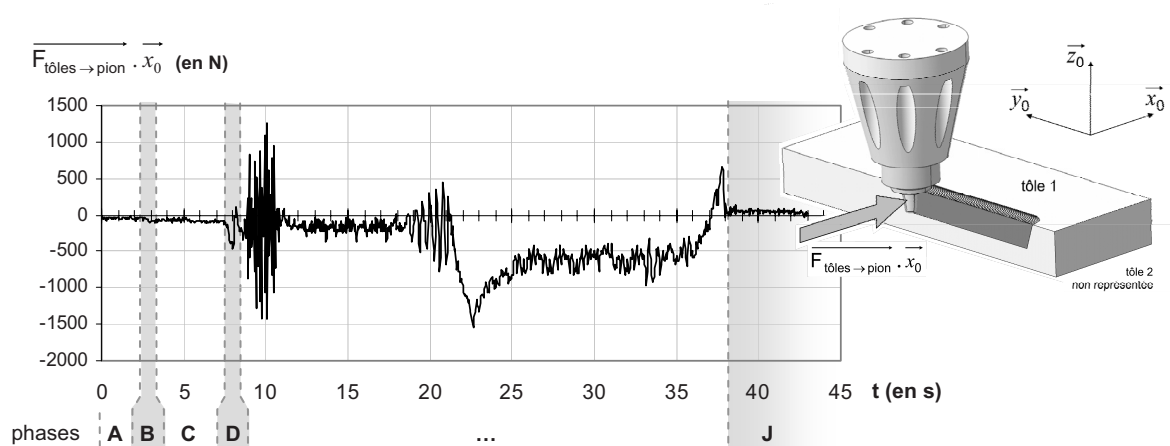
▪ Effort vertical de pression exercé par le pion sur les tôles



▪ Effort résistant au mouvement d'avance exercé par les tôles sur le pion

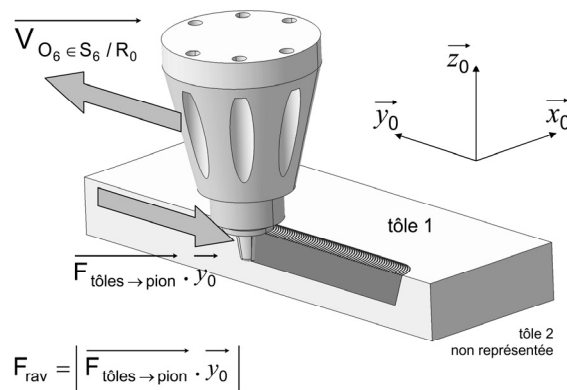


▪ Effort résistant transversal exercé par les tôles sur le pion

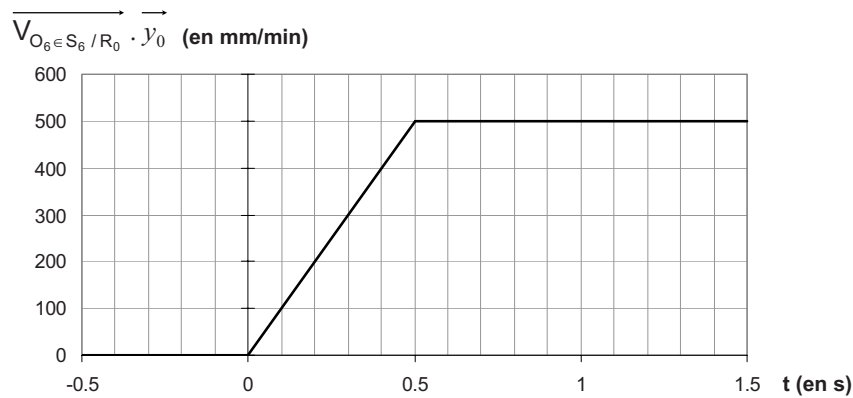


Des essais avec de fortes accélérations en début de soudage sont envisagés. Les cordons de soudure seront réalisés suivant l'axe  $(O_0, \vec{y}_0)$ . La commande du portique en vitesse est imposée. Compte-tenu de la nature des matériaux et de la vitesse d'avance du portique on peut faire l'approximation grossière que l'effort résistant au mouvement d'avance croît linéairement comme indiqué ci-après.

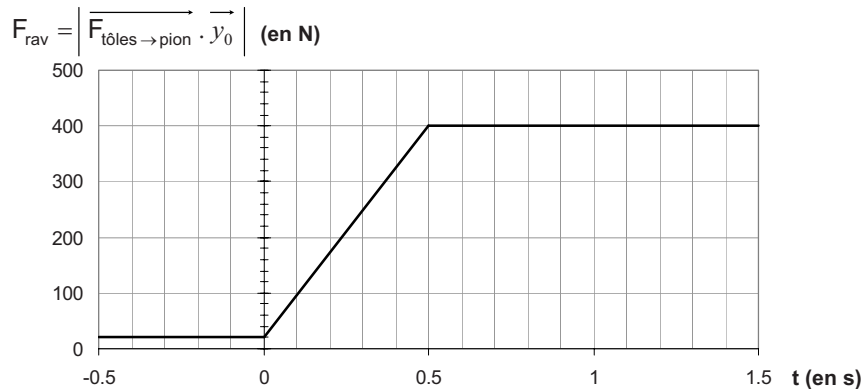
- Schéma de soudage

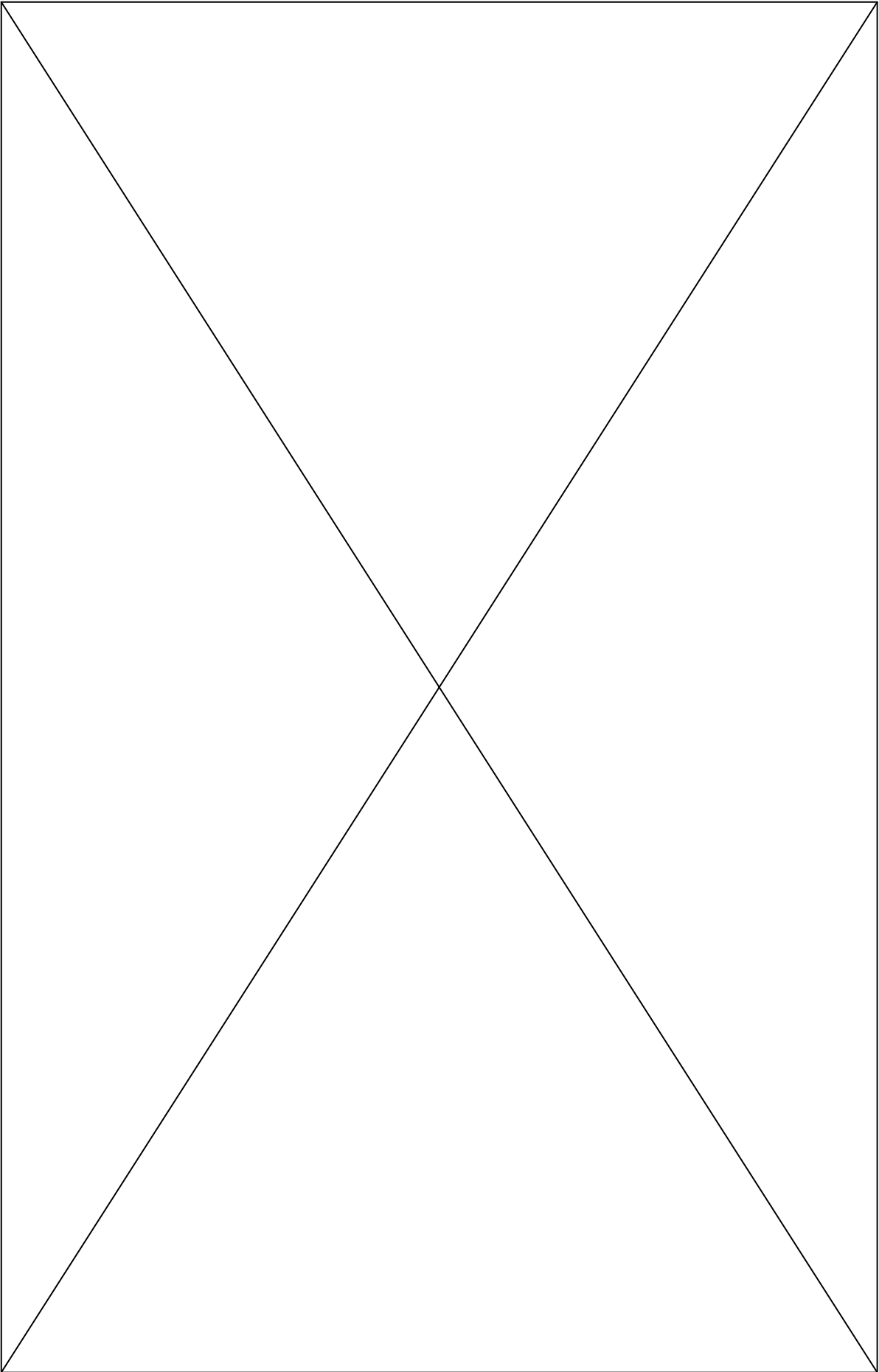


- Loi de commande du portique en vitesse

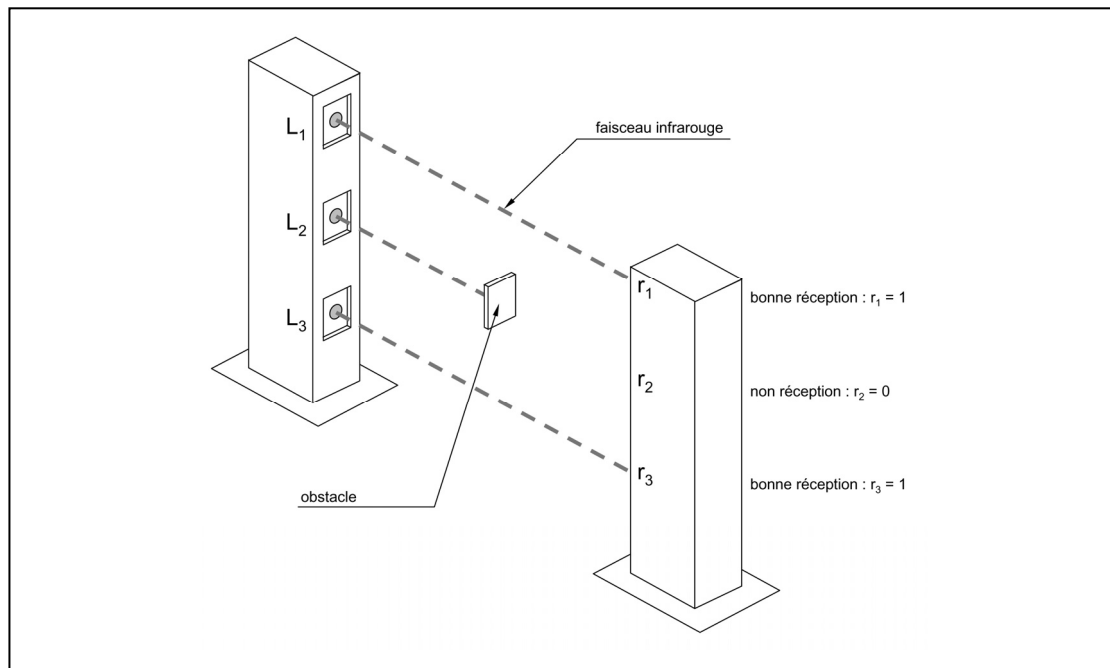


- Estimation de l'effort résistant au mouvement d'avance





Une barrière de sécurité immatérielle est composée de 3 faisceaux infrarouges qui sont captés par 3 cellules photosensibles placées en vis-à-vis. Lors du passage d'une personne au travers cette barrière immatérielle, les faisceaux infrarouges ne sont plus captés et une procédure d'arrêt de la machine est opérée. La mise en sécurité d'une machine nécessite généralement plusieurs barrières immatérielles. Pour simplifier l'étude, une seule barrière est étudiée ici.



La machine est équipée, entre autres, des éléments de sécurité suivant :

- ✓ 3 faisceaux infrarouges monostables :

L <sub>1</sub>	Allumer faisceau infrarouge 1
L <sub>2</sub>	Allumer faisceau infrarouge 2
L <sub>3</sub>	Allumer faisceau infrarouge 3

- ✓ un signal tricolore « vert, orange, rouge » monostable :

Vv	Allumer Voyant Vert	Le voyant vert est allumé lorsqu'une personne peut traverser la barrière immatérielle sans provoquer d'arrêt de la machine.
Vo	Allumer Voyant Orange	Le voyant orange est allumé lorsque qu'un faisceau de la barrière immatérielle n'est pas détecté dans les 3 premières secondes après sa mise en service. Il est également allumé lorsque la machine fonctionne en développement d'un programme de soudage.
Vr	Allumer Voyant Rouge	Le voyant rouge est allumé lorsque la machine est en condition opérationnelle et qu'aucune personne ne doit traverser la barrière immatérielle.

- ✓ 3 cellules photosensibles de détection :

r <sub>1</sub>	Réception du faisceau infrarouge 1
r <sub>2</sub>	Réception du faisceau infrarouge 2
r <sub>3</sub>	Réception du faisceau infrarouge 3

Le pupitre de commande dispose, entre autres, des éléments de sécurité suivant :

✓ 4 boutons poussoir :

au	Arrêt d'Urgence activé	La détection du bouton poussoir d'arrêt d'urgence doit être prioritaire sur les autres actions. Dès la détection d'un front montant de l'arrêt d'urgence ( ↑au ), un arrêt des groupes hydrauliques et le freinage des axes machines est déclenché.
bp <sub>1</sub>	Bouton Poussoir 1 activé	L'appui simultané des deux boutons poussoir permet la mise en service de la barrière immatérielle, si l'arrêt d'urgence n'est pas enclenché. Les boutons poussoirs sont disposés pour que l'opérateur utilise ses deux mains à l'extérieur de la zone protégée.
bp <sub>2</sub>	Bouton Poussoir 2 activé	
ar	Arrêt normal de la machine	L'arrêt normal peut être actionné à la fin d'une utilisation donnée sur la machine de soudage « FSW ». Cet arrêt libère les systèmes de sécurité et stoppe les groupes hydrauliques.

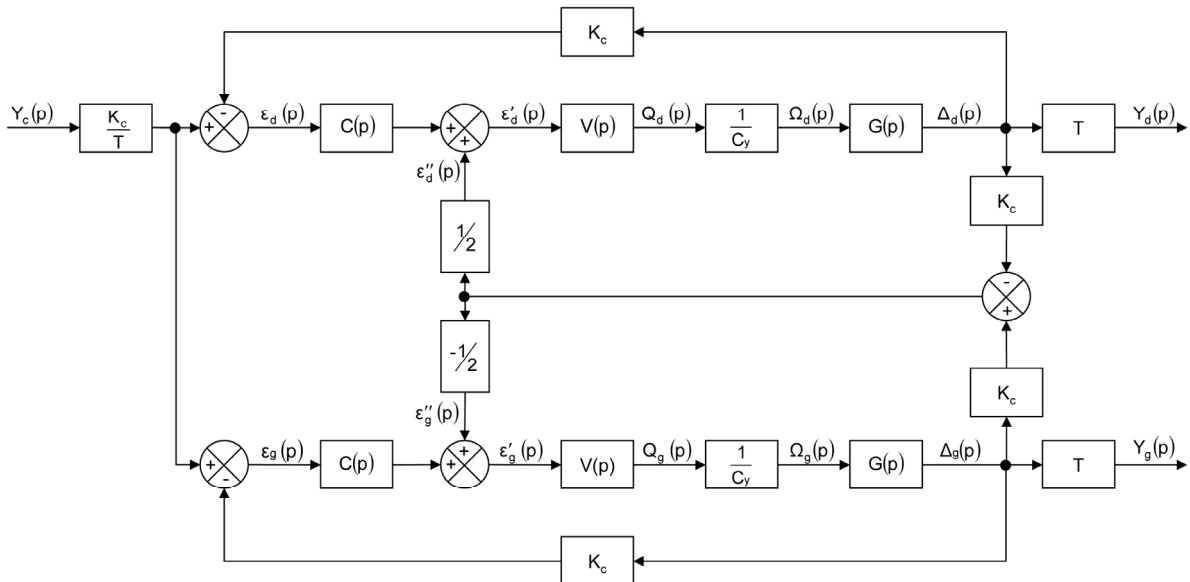
✓ un sélecteur de sensibilité :

sel <sub>1</sub>	Détection du franchissement de la barrière immatérielle par coupure d'au moins 1 faisceau infrarouge
sel <sub>2</sub>	Détection du franchissement de la barrière immatérielle par coupure d'au moins 2 faisceaux infrarouges

✓ un sélecteur de mode de fonctionnement à clé :

prod	En mode « Production », la machine de soudage peut être utilisée dans toutes ses possibilités, l'activation des systèmes de sécurité est obligatoire.
dev	En mode « Développement de gamme de soudage », la machine peut être utilisée avec un opérateur sur la plateforme. La barrière immatérielle doit alors être désactivée. Dans ce mode, la machine est limitée en vitesse et en effort : aucun soudage n'est réalisable ; seules des validations de trajectoires sont possibles.

Le schéma bloc de l'asservissement en position sur l'axe  $(O_0, \vec{y}_0)$  est présenté sur la figure ci-dessous :



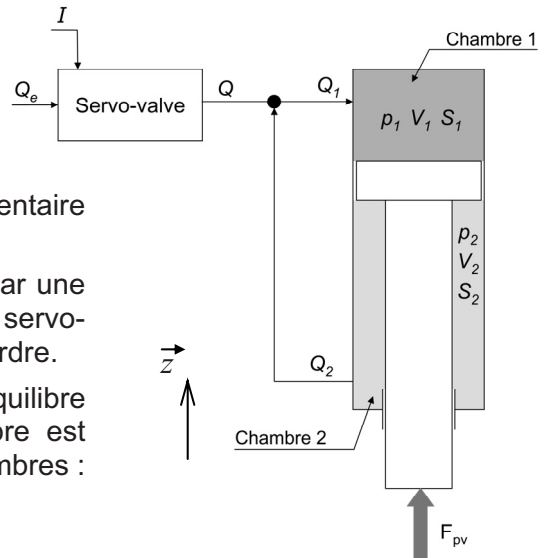
- ✓ La consigne de position est notée  $Y_c$ .
- ✓ La vitesse de rotation du moteur hydraulique  $\Omega_g$  ( $\Omega_d$ ) est directement liée au débit d'alimentation  $Q_g$  ( $Q_d$ ) et sa cylindrée  $C_y$  (constante).
- ✓ Le débit d'alimentation du moteur hydraulique  $Q_g$  ( $Q_d$ ) est régulé par une vanne dont la fonction de transfert est  $\frac{Q(p)}{\varepsilon'(p)} = \frac{1}{1 + \tau \cdot p}$  où  $\tau$  est homogène à une constante de temps.
- ✓ La vitesse de rotation du moteur hydraulique  $\Omega_g$  ( $\Omega_d$ ) est convertie en un angle  $\Delta_g$  ( $\Delta_d$ ) par la fonction de transfert  $G(p)$ .
- ✓ L'angle  $\Delta_g$  ( $\Delta_d$ ) est converti en position  $Y_g$  ( $Y_d$ ) par la constante  $T$  qui traduit la transformation de mouvement par le réducteur et le système pignon-crémaillère.
- ✓ L'angle  $\Delta_g$  ( $\Delta_d$ ) est relevé par le capteur incrémental et converti en « points ». Par interpolation, il est possible d'obtenir un nombre de points non entier ; le capteur est considéré linéaire et continu. La fonction de transfert  $K_c$  est homogène à une constante.
- ✓ La différence  $\varepsilon_g$  ( $\varepsilon_d$ ) entre l'image de la position réelle  $Y_g$  ( $Y_d$ ) et l'image de la position de consigne  $Y_c$  est amplifiée par un correcteur dont la fonction de transfert est notée  $C(p)$ .
- ✓ La position relative entre les angles  $\Delta_g$  et  $\Delta_d$  est divisée par deux et ajoutée ou retranchée à la valeur de sortie du correcteur. Ce dispositif a pour objectif de réduire l'écart de position entre les montants gauche et droit en accélérant le moteur en retard et en freinant celui qui est en avance.

### Principe du vérin différentiel

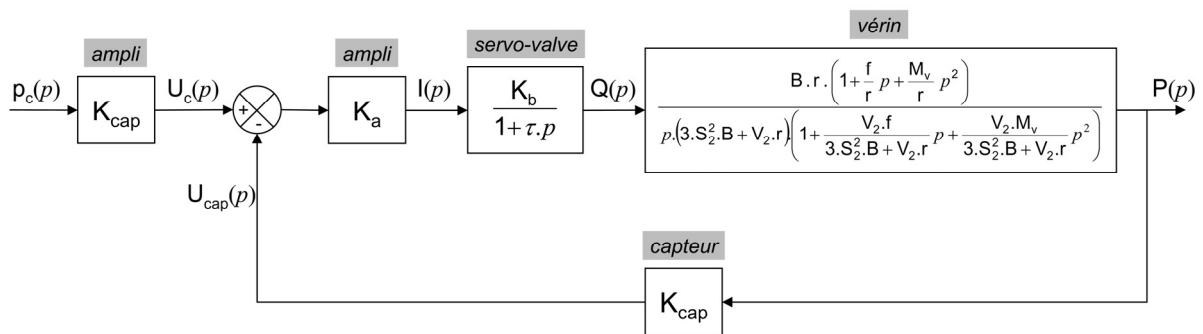
L'effort de pression verticale est exercé par un vérin hydraulique en « montage différentiel ». Dans ce type de circuit, pendant la sortie de la tige, le débit de la chambre 2 est envoyé dans la chambre 1. Ce débit supplémentaire s'ajoute au débit de la pompe.

Le débit d'alimentation du vérin  $Q$  est régulé par une servo-valve alimentée en courant. On identifie la servo-valve à un modèle de système continu du premier ordre.

Avant de commencer le cordon de soudure, l'équilibre est établi à mi-course du vérin. Lorsque l'équilibre est atteint, la pression est identique dans les deux chambres :  $p_1 = p_2$  avec  $F_{pv} \neq 0$  à l'équilibre.



### Schéma bloc de l'asservissement en pression



### Valeurs numériques

$K_a$	Gain d'amplification pure	$1,4 \text{ A V}^{-1}$
$K_{cap}$	Gain du capteur de pression	$1,25 \times 10^{-7} \text{ V Pa}^{-1}$
$K_b$	Gain de la servo-valve	$37,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ A}^{-1}$
$\tau_2$	Constante de temps de la servo-valve	$0,03 \text{ s}$
$B$	Module de compressibilité du fluide	$1500 \text{ MPa}$
$r_{ext}$	Rayon du piston du vérin	$17 \text{ mm}$
$r_{int}$	Rayon de la tige du vérin	$12 \text{ mm}$
$c_v$	Course du vérin	$30 \text{ mm}$
$S_1$	Surface du piston dans la chambre 1	$908 \text{ mm}^2$
$S_2$	Surface du piston dans la chambre 2	$454 \text{ mm}^2$
$V_1$	Volume de la chambre 1	$13618,8 \text{ mm}^3$ (à mi-course du vérin)
$V_2$	Volume de la chambre 2	$6809,4 \text{ mm}^3$ (à mi-course du vérin)
$M_v$	Masse déplacée par le vérin	$8 \text{ kg}$
$f$	Coefficient de frottement visqueux équivalent	$2,8 \times 10^3 \text{ N m}^{-1} \text{ s}$
$r$	Coefficient de raideur équivalente	$3,1 \times 10^8 \text{ N m}^{-1}$
$q_1$	Débit d'alimentation de la chambre 1	
$q_2$	Débit de retour de la chambre 2	
$p_1$	Pression dans la chambre 1	à l'équilibre : $p_1 = p_2$
$p_2$	Pression dans la chambre 2	
$F_{pv}$	Effort résistant exercé sur le vérin	$12000 \text{ N}$

