

Machine de soudage pour l'aéronautique

1 Présentation du procédé de soudage par friction - malaxage¹

Les procédés d'assemblage permanent entrent dans la fabrication de 80% des produits manufacturés. Le soudage représente une grande majorité de ces procédés. Il permet l'obtention d'une liaison complète entre deux pièces.

Les procédés de soudage les plus répandus utilisent l'arc électrique comme source de chaleur. Les matériaux sont localement mis en fusion par cette chaleur et après refroidissement la liaison entre les pièces à assembler est complète. Dans ce cas, les matériaux doivent être compatibles pour que la solidification produise un cordon résistant.

Une solution alternative est le soudage par friction-malaxage, le Friction Stir Welding (FSW), qui met en oeuvre la dissipation énergétique par frottement comme source de chaleur. Ce procédé a l'avantage de pouvoir assembler des matériaux qui ne sont pas compatibles pour réaliser un assemblage par fusion : aluminium / acier, acier / titane par exemple.

Développé depuis 1991, le soudage par friction-malaxage a de nombreuses applications dans le secteur aéronautique. Citons par exemple, l'avion Eclipse pour lequel les assemblages par rivetage ont été remplacés à hauteur de 70% par des joints soudés diminuant ainsi le coût de fabrication (voir figure 1). Il offre alors au concepteur de nouvelles possibilités pour des produits innovants.



FIGURE 1 – Avion Eclipse.

Le frottement généré par la rotation d'un outil sur les pièces à souder dégage de la chaleur. Les matériaux à souder deviennent alors semi-solides (point d'équilibre entre le solidus et le liquidus), mais n'entrent pas dans le domaine liquide, avantage de cette technologie. L'outil possède un épaulement pour augmenter la surface de frottement (voir figure 2). Le déplacement du pion dans les matériaux à l'état semi-solide crée alors un cordon de soudeure.

La machine de soudage « FSW » génère la rotation de l'outil et son déplacement. Le sujet propose l'étude d'une machine de soudage « FSW » implantée dans un centre de recherche et de transfert de technologies. Cette installation assure la réalisation d'essais de soudage, de pièces « tests » pour l'aéronautique, mais aussi la production de pièces pour l'industrie.

Une machine de soudage « FSW » est composée essentiellement (voir Figures 4 et 5) :

- d'un portique qui assure les mobilités en translation de la tête par rapport au bâti,
- d'une tête de soudage qui assure les mobilités complémentaires nécessaires à l'outil de soudage. La mise en rotation de l'outil est assurée par cette tête.
- d'un outil, souvent composé d'un pion et d'un épaulement. Le frottement généré par le pion et l'épaulement permet le dégagement de chaleur. Sa mise en rotation permet un malaxage des deux matériaux et donc la création d'une zone soudée.

1. Adapté du concours E3A PSI 2009

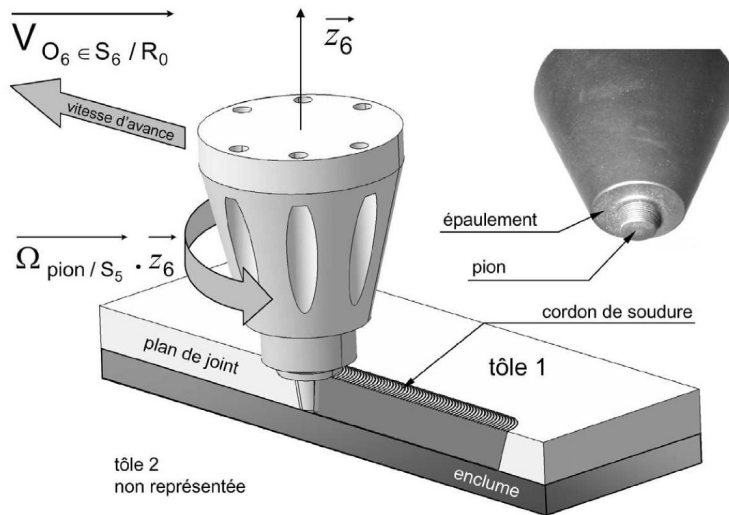


FIGURE 2 – Principe de réalisation d'un cordon de soudure par FSW.

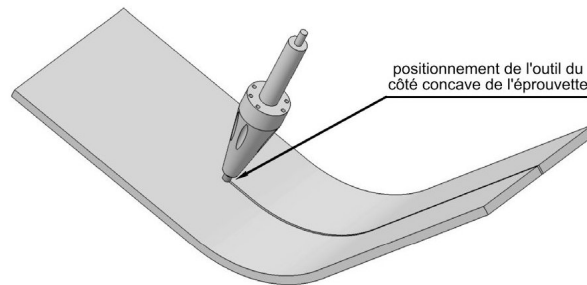


FIGURE 3 – Définition du soudage concave.

— d'une plateforme de soudage sur laquelle sont mises en position les pièces à assembler grâce à un montage.

Contrairement aux autres procédés de soudage, le montage de soudage doit assurer non seulement la mise en position de chacune des pièces avant assemblage mais doit également compenser l'effort de pression verticale exercé par l'outil sur les tôles.

Afin de préparer l'assemblage de tôles pour réaliser des éprouvettes de caractérisation en « V » (voir figures 3 et 8) pour l'industrie aéronautique, on s'intéresse ici à l'élaboration de la loi de commande en position et en vitesse du déplacement de la machine de soudage « FSW », de manière à respecter l'extrait du Cahier des Charges présentée dans le tableau 1.

2 Élaboration du modèle cinématique

Un schéma cinématique simplifié de la machine de soudage « FSW » est donné en figure 6. Il est précisé ici que le montant droit S_1 , le montant gauche S'_1 et la traverse S_2 constituent un portique repéré Σ_{12} ($\Sigma_{12} = S_1 + S_2 + S'_1$). Le paramétrage proposé est indiqué figure 7.

Le chariot S_3 est en liaison pivot avec la chape d'orientation S_4 qui est elle-même en liaison pivot avec la tête de soudage S_5 .

Q 1 : Construire le graphe de structure du mécanisme. Bien indiquer les caractéris-

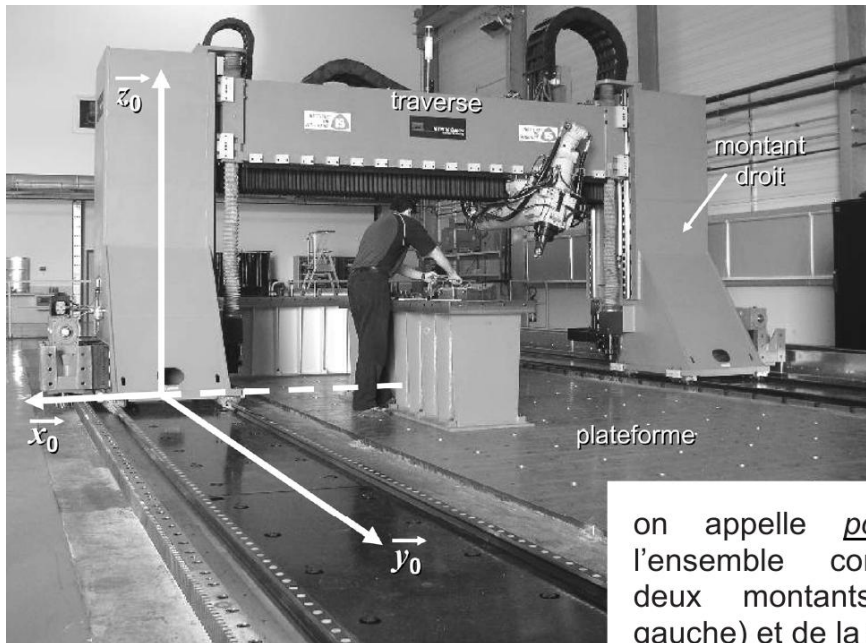


FIGURE 4 – Vue globale de la machine "FSW".

Fonction de service	Critère	Niveau
FS1 : souder des tôles	Géométrie du cordon de soudure	en V, profil donné
	Vitesse de soudure	constante, égale à 400 mm.min^{-1}
	Qualité de la soudure	l'axe principal du pion de soudage doit rester orthogonal à la surface sur laquelle le cordon de soudure est réalisé

TABLE 1 – Extrait du CdCF.

tiques de la liaison.

Q 2 : Exprimer le vecteur position du point O_6 .

Q 3 : Donner le torseur cinématique associé à chaque liaison.

Q 4 : Déterminer la vitesse du point O_6 dans le mouvement 6/0 en utilisant les torseurs.

3 Étude de la loi de commande de chaque axe

Cette partie s'intéresse à la préparation de la programmation en position et en vitesse de la machine pour souder l'éprouvette en « V » réalisée dans le plan $(\vec{y}_0, \vec{z}_0)$ (voir figure 8). On rappelle que, dans tous les cas, l'axe du pion de soudage doit rester perpendiculaire aux surfaces à assembler pour réaliser un cordon de qualité (voir l'extrait du CdC) et que le soudage s'effectue du côté concave de l'éprouvette (voir figure 3).

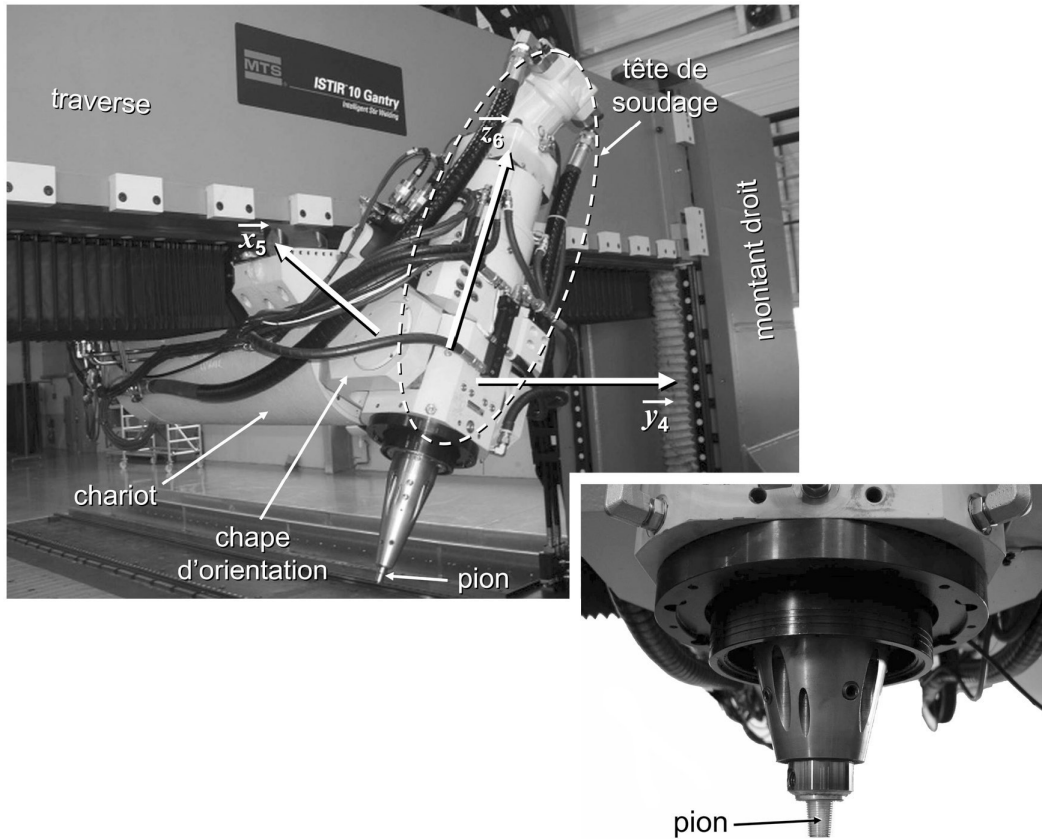


FIGURE 5 – Détail de la tête de soudage de la machine "FSW".

La figure 8 précise la géométrie finale de l'éprouvette à réaliser :

- épaisseur $e_e = 5 \text{ mm}$
- longueur des parties planes : $\lambda_e = 700 \text{ mm}$
- rayon de raccord : $r_e = 300 \text{ mm}$, tel que $r_e < l_{56}$
- angle d'ouverture : $\alpha_e = 120^\circ$
- mise en position en « V », avec le cordon de soudure réalisé dans le plan $(\vec{y}_0, \vec{z}_0)$ (voir le paramétrage proposé en figure 6).

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.

Q 5 : À partir du schéma cinématique 3D de la figure 6, tracer le schéma cinématique 2D dans le plan $(\vec{y}_0, \vec{z}_0)$.

Q 6 : Sur une épure à l'échelle 1/4, tracer les vitesses au niveau des différentes liaisons dans la phase 1 (voir Figure 8). On donne $l_{56} = 410 \text{ mm}$

Q 7 : Sur cette même épure, tracer les vitesses au niveau des différentes liaisons dans la phase 2.

Q 8 : Tracer 2 ou 3 positions du mécanisme dans la phase numérotée 3.

Q 9 : Tracer alors le profil des vitesses au niveau des différentes liaisons dans la phase 3 ainsi que la trajectoire du point 0_5 .

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 :

$$\overrightarrow{O_4 O_5} = l_4 \cdot \vec{y}_4$$

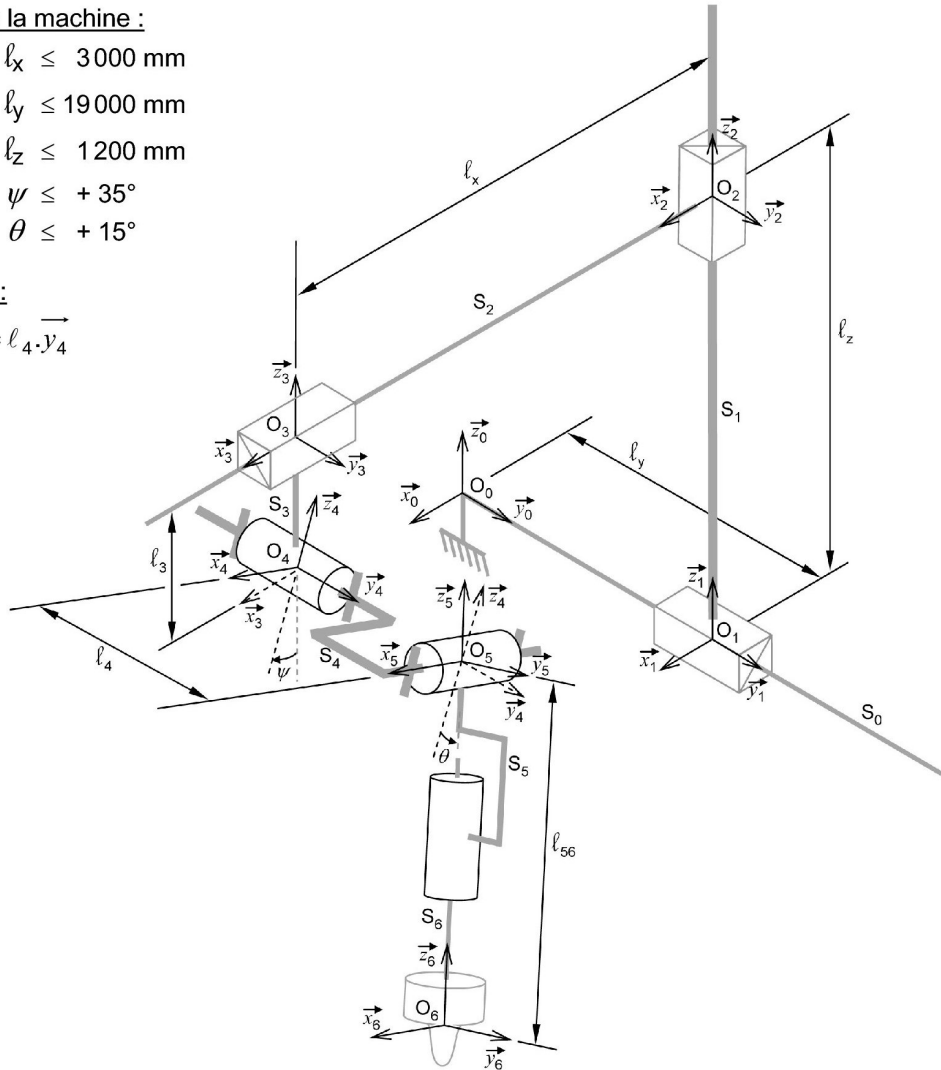


FIGURE 6 – Schéma cinématique simplifié de la machine "FSW".

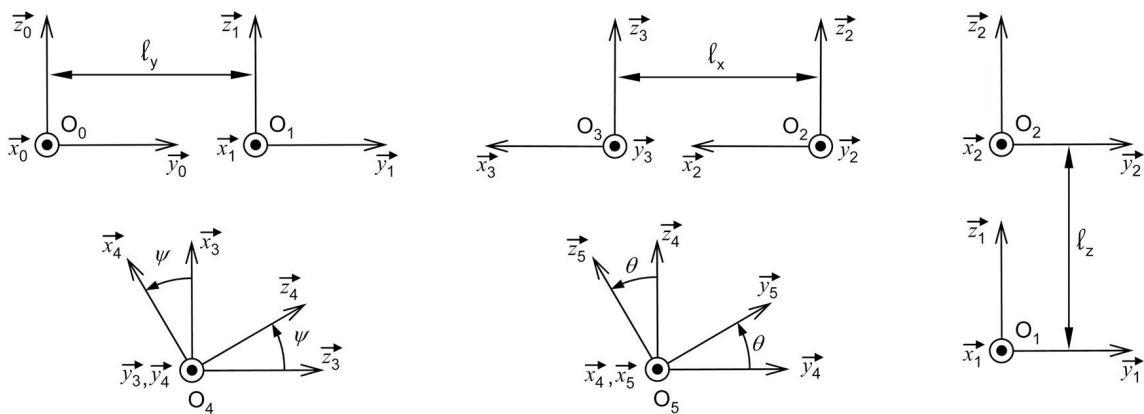


FIGURE 7 – Définition des variables géométriques.

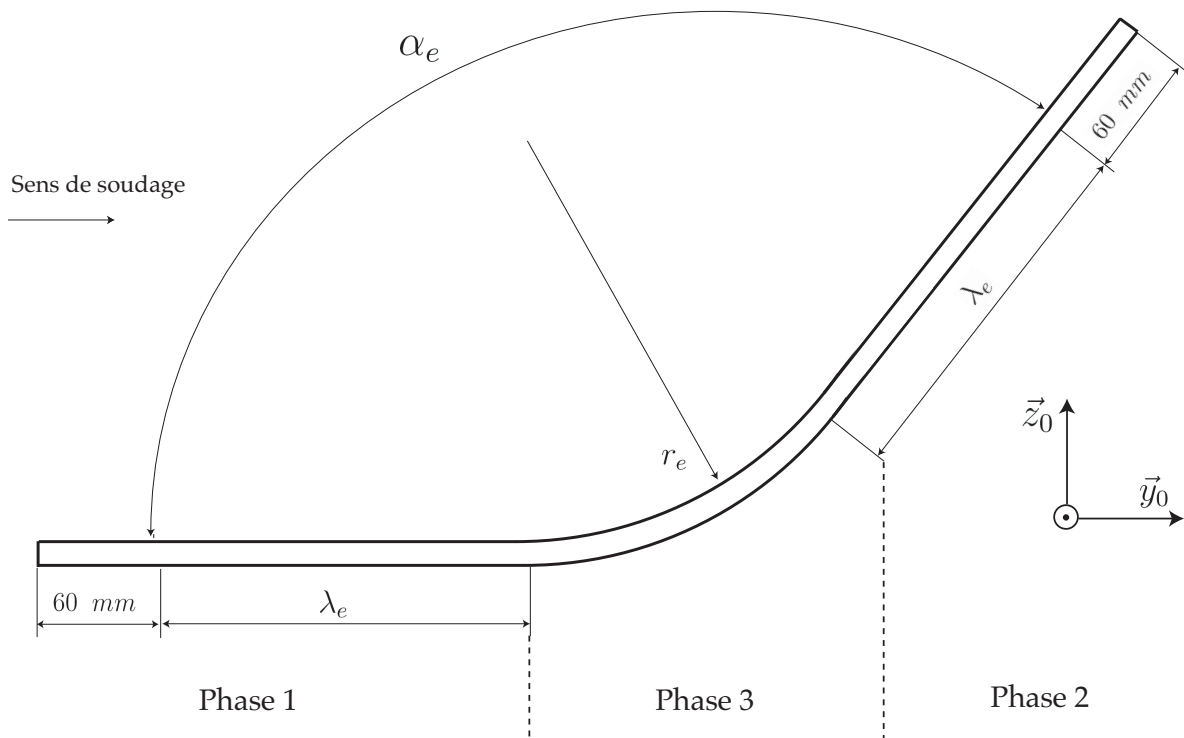


FIGURE 8 – Définition du profil du cordon de soudure étudié.

4 Étude de la loi de commande de motorisation

Le portique Σ_{12} peut se déplacer en translation par rapport à la plateforme S_0 suivant l'axe $(O_0, \vec{y}_0)$, grâce à une liaison glissière. Le déplacement du portique Σ_{12} est quant à lui assuré par une liaison pignon-crémaillère. Le schéma technologique détaillé d'un motoréducteur d'entraînement du portique de la liaison $\Sigma_{12}/0$ suivant l'axe $(O_0, \vec{y}_0)$ est donné en Annexe. Les caractéristiques nécessaires (paramètres des engrenages) y sont précisées.

Objectif : dans la partie précédente, nous avons obtenu la loi de vitesse linéaire du portique nécessaire au suivi du cordon de soudure. Nous nous proposons ici d'en déduire la loi de vitesse au niveau du moteur d'entraînement.

Q 10 : Proposer deux solutions alternatives au système pignon-crémaillère pour entraîner un solide en translation par rapport à un autre.

Q 11 : Réaliser le graphe de structure de ce mécanisme d'entraînement (on pourra utiliser la liaison "engrenage" en précisant le point d'engrènement).

Q 12 : Donner l'expression du torseur cinématique de la liaison S_{11}/S_1 . On notera $\vec{\Omega}_{S_{11}/S_1} = \omega_m \cdot \vec{z}_0$.

Donner l'expression du torseur cinématique de la liaison S_{12}/S_1 . On notera $\vec{\Omega}_{S_{12}/S_1} = \omega_{12/1} \cdot \vec{z}_0$.

On trouvera en Annexe les nombre de dents des engrenages considérés, ainsi que leur module m .

Le diamètre du pignon 11 vaut : $d_{11} = mz_{11}$,

le diamètre du pignon 12 vaut : $d_{12} = mz_{12}$,

le diamètre du pignon 13 vaut : $d_{13} = mz_{13}$,

On pose :

$$\vec{V}(O_1, S_1/S_0) = V \cdot \vec{y}_0$$

où V est la vitesse d'avance.

Q 13 : La propriété d'engrènement entre S_{11} et S_{12} se traduit par la condition de roulement sans glissement :

$$\vec{V}(I_{eng}, S_{12}/S_{11}) = \vec{0}$$

En déduire une relation entre les vitesses de rotation définies à la question précédente en fonction de m, z_{11}, z_{12} .

Q 14 : La propriété d'engrènement entre S_{12} et S_0 se traduit par la condition de roulement sans glissement :

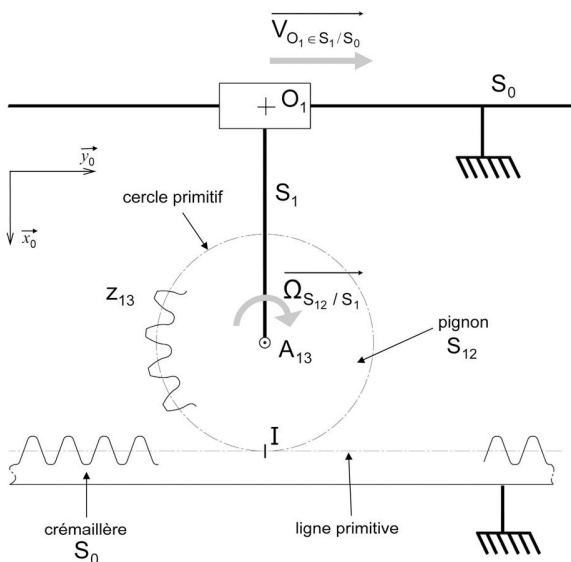
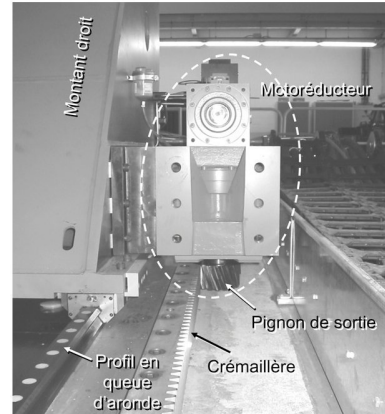
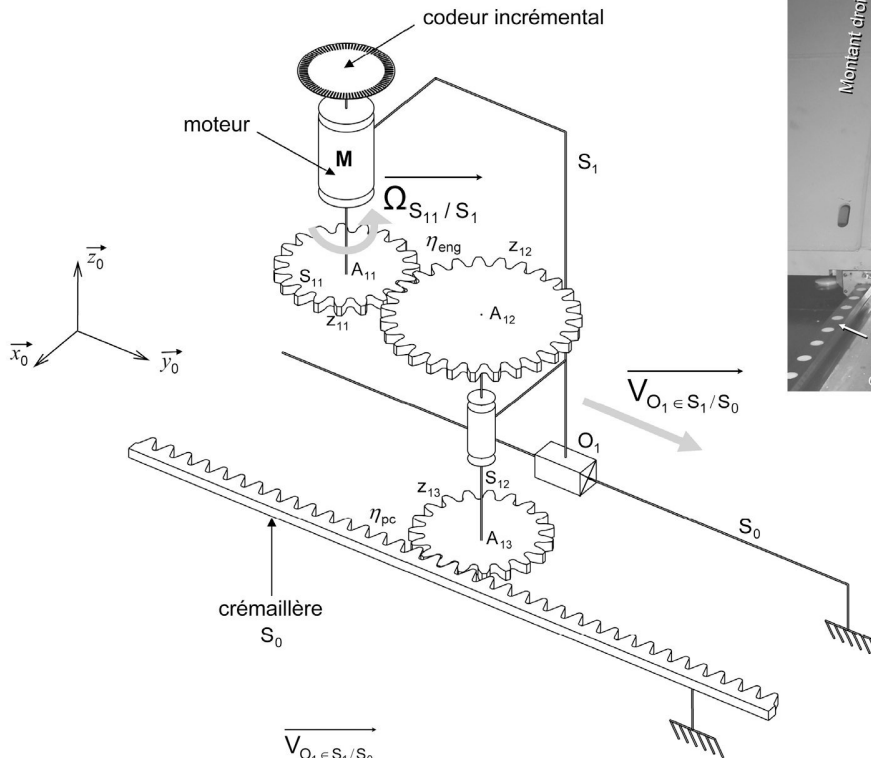
$$\vec{V}(I, S_{12}/S_0) = \vec{0}$$

En déduire une relation entre ω_m et la vitesse d'avance V en fonction de m, z_{11}, z_{12} et z_{13} .

Cette relation permettrait de déterminer la loi de commande de la motorisation du motoréducteur. La principale difficulté réside dans la présence de discontinuités dans la vitesse théorique du point O_5 .

ANNEXE : détails du système d'entraînement du portique

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.



Lorsque deux pignons s'engrènent, leurs cercles primitifs roulent l'un sur l'autre sans glisser. De même, pour un système pignon crémaillère, le cercle primitif du pignon roule sans glisser sur la ligne primitive de la crémaillère.

Pour rappel, le diamètre primitif d'un pignon est défini par la relation

$$d = m \cdot z$$

avec m : le module du pignon
 z : le nombre de dents du pignon

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	$\eta_{hydrau} = 0,65$