

SESSION DE 2004

**Concours externe
de recrutement de professeurs agrégés**

section : génie mécanique

Composition d'automatismes industriels

durée : 6 heures

Aucun document n'est autorisé

Moyen de calcul autorisé :

Calculatrice de poche - y compris calculatrice programmable et alphanumérique - à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-018 du 1^{er} février 1999.

En aucune façon la calculatrice ne pourra posséder de données scientifiques et techniques propres au génie mécanique et à l'automatique.

Ce document comporte trois parties :

- une présentation du sujet : 4 pages,*
- le travail demandé (parties A, B et C) : 16 pages,*
- un dossier comprenant les documents ressources : 6 pages.*

Le candidat traitera chacune des parties (partie A, partie B et partie C) sur des copies séparées en indiquant sur chacune d'entre elles le repère de la partie traitée.

Les candidats sont invités à formuler toutes les hypothèses qu'ils jugeront nécessaires pour répondre aux questions posées.

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale dans sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons de son initiative.

Tournez la page S.V.P.

Les atouts du raboutage pour l'industrie automobile sont si importants que cette technologie est maintenant adoptée dans la conception des nouvelles voitures par une grande majorité des constructeurs.

LE RABOUTAGE LASER

Le raboutage laser est une technique de soudage qui permet d'assembler des tôles de différentes épaisseurs (tôles fines soudées avec des tôles épaisses). Ce procédé d'assemblage consiste à souder deux flans d'épaisseurs et/ou de revêtements différents. Le soudage est réalisé par une source laser (CO₂ ou Nd : Yag) à une vitesse maximale de déplacement de 15 m/min pour l'acier et de 8 m/min pour le Aluminium.

Les flans sont positionnés bord à bord, sous pression d'accostage. Ils peuvent présenter des bavures dues au procédé de découpage. Pour les flans d'épaisseurs différentes, le raboutage peut se faire côté marche ou côté affleurant (Figure 2).

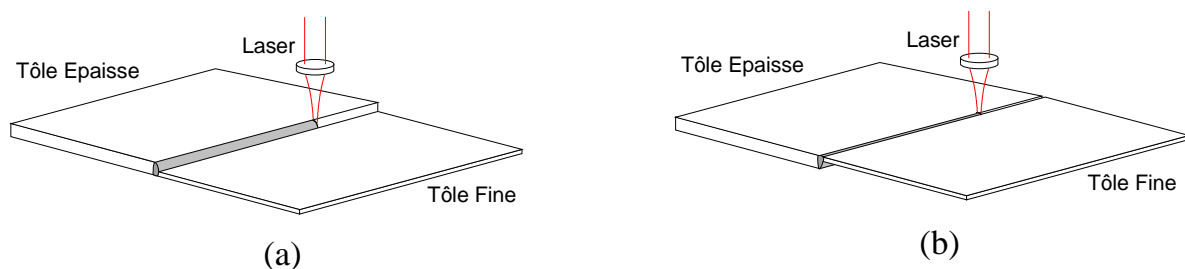


Figure 2 : Le raboutage : (a) côté marche – (b) côté affleurant.

Contrairement à ses concurrents, la société COMAU (ex RENAULT-AUTOMATION COMAU) a choisi de souder du côté de la surface affleurante des tôles plutôt que du côté de la surface "en dénivelé" des deux tôles d'épaisseurs différentes. Ce choix permet d'augmenter la vitesse de soudage car le faisceau laser travaille sur une plus fine épaisseur de tôle. Alors que la majorité des systèmes de soudure fonctionne à une vitesse de 5 à 8 m/min ; l'approche de COMAU permet d'atteindre des vitesses supérieures à 10 m/min. Ce choix nécessite cependant une bonne précision de découpe (qu'une presse classique permet normalement d'atteindre) et permet l'utilisation d'une juste pression pour l'accostage des tôles. L'utilisation de tôles précisément découpées (plus coûteuses) autorise en effet une faible pression de serrage. En revanche, des tôles moins chères, mais moins précisément découpées nécessitent le recours à des pressions plus élevées et de lourds systèmes de bridage pour des flans complexes.

LA CELLULE DE RABOUTAGE

L'augmentation régulière du nombre de flans raboutés par véhicule crée l'émergence d'un besoin spécifique d'équipements fiables et rentables, capables de répondre aux exigences de qualité de l'industrie. Pour cela, COMAU a développé une solution technologique correspondant à une cellule de raboutage laser (Tableau 1). Elle est constituée de plusieurs modules assurant les différentes fonctionnalités :

- le module de chargement ;
- le module de déchargement ;
- le module de maintien (palette-outillage) ;
- le module de soudage.

Ces différents modules peuvent être combinés ou multipliés pour obtenir des configurations diverses et variées de la cellule. La Figure 3 présente *l'une des configurations possibles* avec deux ensembles de chargement/déchargement situés de part et d'autre de la poutre de soudage laser.

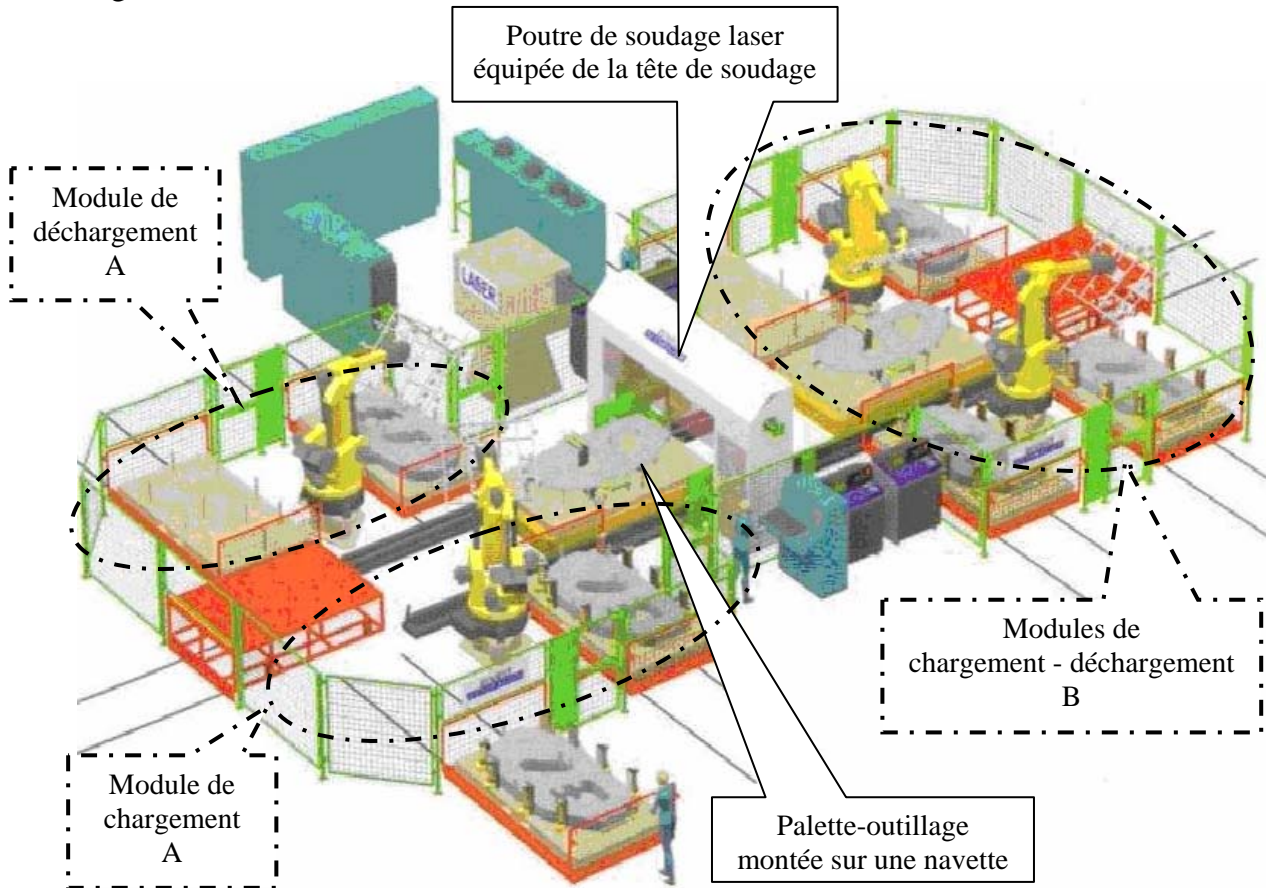


Figure 3 : Exemple d'architecture générale d'une cellule de rabouillage.

Le module de chargement permet la mise en place des flans à souder sur la palette-outillage utilisée lors du rabouillage. Ce module comporte un robot poly-articulé 6 axes (ou plusieurs suivant la solution d'industrialisation retenue) et des palettes de chargement. Les différents flans à rabouter sont pris par le robot et sont déposés sur la palette-outillage.

Le module de déchargement permet l'évacuation de la pièce rabouillée. Ce module comporte un robot poly-articulé 6 axes, des palettes de déchargement et une palette de rebut. Les différents flans raboutés sont pris par le robot et sont déposés sur les palettes de déchargement.

Le module de maintien est constitué d'une palette (appelée palette-outillage) montée sur une navette. Une fois les flans déposés par le robot sur la palette-outillage, ils sont mis en position grâce à un système de ventouses. Les éléments magnétiques du système de bridage sont situés sur les surfaces inférieures et supérieures du flan, le long du joint. Ils sont adaptables aux spécificités du client. L'application d'un champ magnétique par rebouclage des lignes de flux engendre une force suffisante pour maintenir fermement les flans sur la palette et éviter ainsi toute déformation durant l'opération de soudage. Ce système de bridage magnétique est autonome et par conséquent très flexible.

La palette-outillage est ensuite transférée à l'aide d'une navette sous le portique de soudage pour procéder à l'opération de raboutage. Suivant le type de pièces, les changements de campagne s'effectuent par rechargement direct de la palette ou par échange complet de celle-ci.

Le module de soudage est constitué d'une poutre de soudage laser fixe équipée de deux axes de translation (un axe horizontal et un axe vertical) et d'un axe de rotation autour de l'axe vertical. Au bout de ce robot est fixée une tête de soudage. Celle-ci supporte la tête du laser, un capteur de température, un capteur infrarouge ainsi qu'un système de vision artificielle pour suivre le joint. Pour réaliser l'opération de raboutage, on combine les mouvements du portique et de la navette.

Description	Valeur
Type de Joint	Bord à bord
Matière	acier, aluminium
Revêtement	1 ou 2 faces galvanisées, électro-zinguées, zinc-fer ou Revêtement Organique Mince (ROM)
Propreté	Les flans sont huilés (huile utilisée en emboutissage)
Pollution	Projection de particules + dégagement de fumées de soudage à haute teneur en Zn
Longueur à souder	130 mm à 3850 mm
Epaisseur tôles	0.57 mm à 4 mm
Rapport entre les épaisseurs	1:1 à 2,5:1
Type d'affleurement	Soudage côté affleurant ou côté marche Le flan épais peut se trouver à droite ou à gauche
Vitesse de soudage	15 m/min Acier 12 m/min Aluminium 7 m/min Soudage à clin
Température ambiante	5°C à 45°C
Horaire quotidien de production	3 x 8 h - 22,5 h/j - 6 jours par semaine - 220 jours par an
Laser de Puissance	CO ₂ ($\lambda=1,06 \mu\text{m}$) ou ND:Yag ($\lambda=10,6 \mu\text{m}$)
Focal Laser	150 à 200 mm
Forme du Joint	Joints linéaires, joints courbes avec un Rayon > 50 mm, Soudage à clin

Tableau 1 : Données techniques du raboutage.

Partie A :

CELLULE DE RABOUSAGE LINEAIRE

Introduction

Afin de répondre à diverses contraintes exprimées par un constructeur automobile français, le module de déchargement présenté Figure 3 a été modifié. Dans la suite du sujet ce module de déchargement est appelé : atelier de dépilage. La configuration retenue est présentée documents ressources DR1.1 et DR1.2.

Un atelier de dépilage (Figure 4) est constitué des éléments suivants :

- 4 aires de dépilage RP1A1, RP1A2, RP2A1, RP2A2,
- 4 sas de protection RP1A1SAS, RP1A2SAS, RP2A1SAS, RP2A2SAS,
- 2 Robots de dépilage RP1A et RP2A,
- 1 table de recentrage TRA.

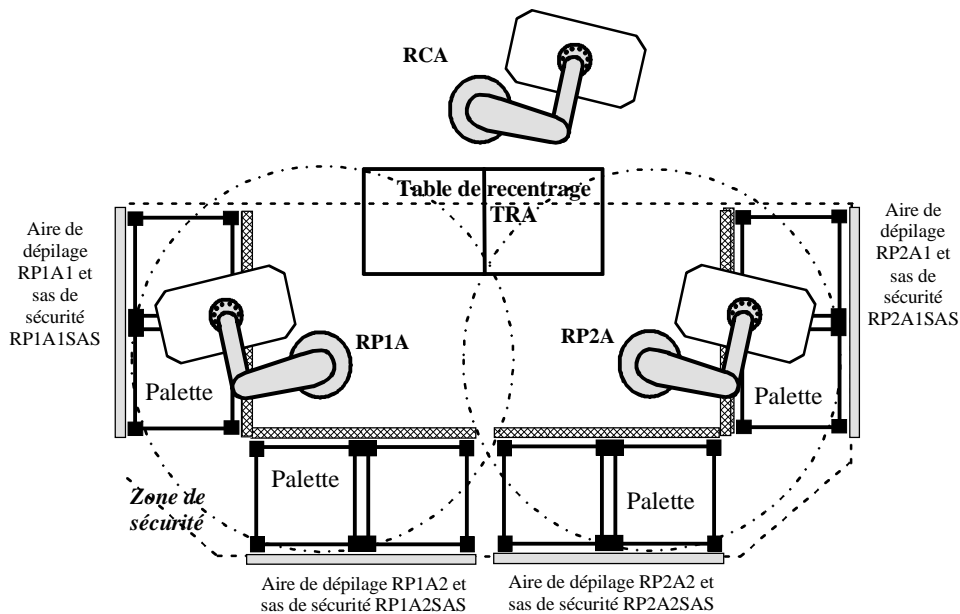


Figure 4 : Atelier de dépilage A.

Tout comme dans la configuration présentée Figure 3, la nouvelle configuration (documents ressources DR1.1 et DR1.2) présente deux zones de travail A et B. La cellule de rabouillage laser est donc équipée de 2 ateliers de dépilage. Les lettres A et B utilisées dans les repères permettent de distinguer les équipements, les informations et les tâches respectives des deux zones de travail situées de part et d'autre de la poutre de soudage laser.

Il est possible de distinguer sept phases dans le cycle de fonctionnement de la cellule de rabotage :

Phase de mise en campagne

A chaque type de pièce à produire les opérateurs doivent reconfigurer la machine en :

- mettant en place la palette-outillage adéquate ;
- sélectionnant la campagne choisie sur un terminal de dialogue ;
- configurant les préhenseurs des robots de chargement et de déchargement ;
- configurant l'atelier de dépilage (aimants, détecteur dernier flan, ...).

Phase de préparation des pièces pour la production

Le chargement des pièces (flans) à l'intérieur de la machine s'effectue par l'intermédiaire des aires de dépilage. Les palettes de pile de flans arrivent des ateliers de découpe et sont transportées par des chariots élévateurs puis déposées dans les aires de dépilage. Les aires de dépilage sont équipées de panneaux grillagés qui forment un sas à l'avant et à l'arrière de cette aire permettant un chargement sécurisé.

Une fois les palettes de flans installées dans l'aire de dépilage, l'opérateur valide la fin de chargement à l'aide du bouton poussoir (un par aire de dépilage : "BP_{RP1A1}", "BP_{RP1A2}", "BP_{RP2A2}", "BP_{RP2A2}") prévu à cet effet.

Le module de dépilage possède deux robots de dépilage. Ils sont chargés de prélever un à un les flans des piles pour les déposer sur une table inclinée dite table de recentrage ou de regroupement.

La table de recentrage reçoit les flans déposés tour à tour ou simultanément par les robots de préparation RP1A (pour les flans de référence) et RP2A (pour les flans de retaillage). La table de recentrage fonctionne par gravité. Les flans déposés glissent au moyen de billes et viennent en contact avec des réglettes de référence.

Phase de chargement des flans sur la palette-outillage

Dès que les flans à souder sont positionnés sur la table de recentrage, le robot de chargement les saisit un par un à l'aide d'un préhenseur à ventouse pour les déposer sur la palette-outillage.

Phase de mise en référence des flans sur la palette-outillage

La palette-outillage (Figure 5) est destinée à recevoir les flans, à les mettre en référence et à les maintenir pendant la phase de soudage. Elle est équipée de modules magnétiques qui ont pour fonction le bridage des tôles et l'accostage, et de dispositifs de mise en référence et de retaillage. Le retaillage consiste, à l'aide de divers actionneurs, de guides, et à quelques libertés de mouvements laissées au flan de retaillage, de positionner ce flan bord à bord avec le flan de référence avant d'effectuer son bridage et le soudage. Une palette est prédisposée pour traiter la diversité des flans d'une même famille.

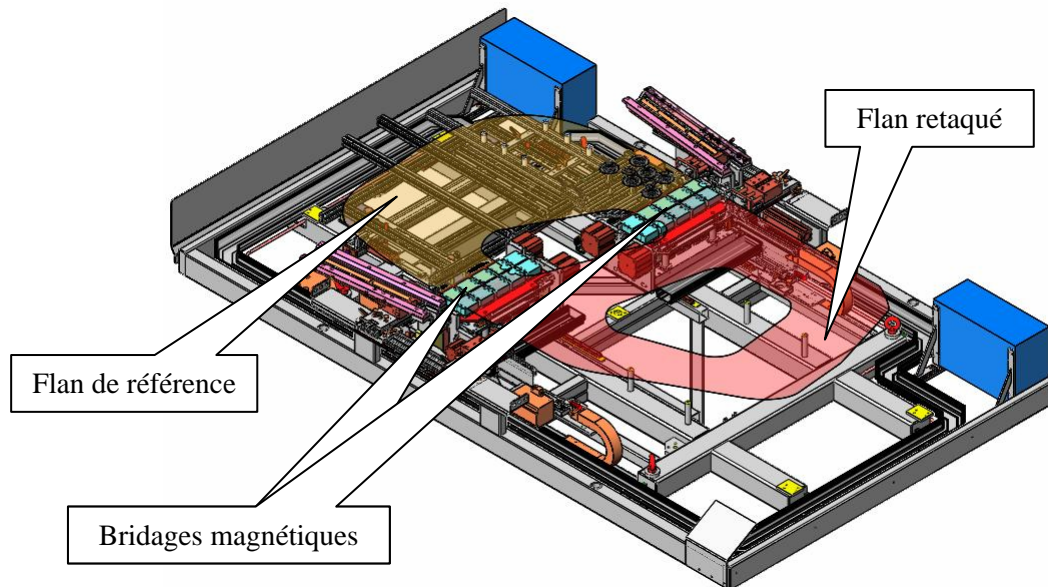


Figure 5 : Palette-outillage

Phase de soudage

La navette emmène la palette-outillage sous la poutre de soudage laser.

La tête laser peut se déplacer selon les axes Y (transversal), Z (vertical) et en rotation autour de l'axe Z. La trajectoire de soudage est adaptée par combinaison des axes Y, Z, de la rotation et de l'axe X de la navette.

Après la soudure la navette retourne à sa position parking pour permettre le déchargement des flans rabotés.

Phase de libération des flans soudés sur la palette-outillage

Les flans soudés sont libérés de façon à pouvoir être évacués par le robot de déchargement.

Phase de transfert des flans soudés vers l'un des chariots de déchargement

Le robot de déchargement saisit les flans rabotés par l'intermédiaire d'un préhenseur à ventouses sur la palette-outillage et les dépose sur l'un des chariots de déchargement.

Phase d'évacuation des pièces à l'extérieur de la machine

Lorsque le nombre de flans déposés sur un chariot de déchargement pour réaliser une pile est atteint, l'opérateur demande sur le pupitre de chargement/déchargement la sortie de ce chariot.

L'opérateur enlève la pile de flans avec un chariot élévateur. Lorsque l'opération est terminée, il commande sur le pupitre de chargement / déchargement le retour du chariot à l'intérieur de la machine.

A1 : APPROVISIONNEMENT DES FLANS et POSITIONNEMENT

Les flans à souder déposés sur la table de recentrage glissent au moyen de billes et viennent se positionner par gravité en contact avec des réglettes de référence (réglables selon la campagne de production). Un détecteur : “flan de référence en butée” (“flan de retaillage en butée” pour le second flan) permet à la commande de s’assurer de ce contact.

Compte tenu du poids de chaque flan et de son inertie quelques dixièmes de secondes sont nécessaires pour obtenir son immobilisation complète. Celle-ci est nécessaire avant que le robot de chargement (RCA ou RCB) ne puisse la saisir.

Question A1.1 :

Montrer à l’aide du modèle comportemental de votre choix comment est générée l’information logique « flan de référence positionné ». Cette information est obtenue 1 seconde après le contact entre le flan et la réglette de référence, dans le cas où l’information “flan de référence en butée” est vraie.

Dans les aires de défilage, chaque palette est équipée d’un détecteur « dernier flan » permettant d’informer l’opérateur de la nécessité de décharger la palette vide et de recharger une palette avec une pile de flans. Ce détecteur fournit une information vraie tant que le dernier flan est présent. Le robot concerné saisit un flan uniquement si la palette est en place, si l’information « dernier flan » est vraie, si le panneau grillagé de sécurité est fermé et si l’opérateur a appuyé sur le bouton poussoir de fin de chargement. Pour cela, une information « pile de flans prête » est fournie au robot par la commande.

Question A1.2 :

Montrer comment est élaborée (sous forme de logigrammes ou d’expressions logiques) l’information « pile de flans prête » dans le cas de la palette située dans l’aire de défilage RP1A2.

Les variables à utiliser sont les suivantes :

Information (aire RP1A2)	Variable logique associée
Palette en place :	PP_{RP1A2}
Panneau grillagé fermé	PG_{RP1A2}
Bouton poussoir actionné	BP_{RP1A2}
Dernier flan	DF_{RP1A2}
Pile de flans prête	PF_{RP1A2}

Gestion du cycle de dépose de flans de référence sur la table de recentrage

Les transferts de flans de référence de RP1A1 ou RP1A2 vers la partie gauche de la table de recentrage ne peuvent se faire que si l’information PF_{RP1A1} respectivement PF_{RP1A2} est vraie. Si l’information PF_{RP1A1} n’est plus vraie et que PF_{RP1A2} est vraie, le robot RP1A peut aller chercher un flan sur la palette RP1A2 (et inversement). Le robot dépile toujours la même palette jusqu’à ce que l’information pile de flans prête ne soit plus vraie. La priorité est donnée à la palette RP1A1 en début de cycle si les deux informations « pile de flans » sont vraies.

Le Robot RP1A positionne son préhenseur en attente (point d'attente) hors zones table de recentrage TRA, RP1A1 et RP1A2 : s'il a saisi un flan et que TRA n'est pas libre ou si aucune des piles de flans à dépiler n'est prête. Si l'attente n'est pas nécessaire, le point d'attente devient un simple point de passage (sans arrêt du robot).

Le cycle du robot est lancé si la partie gauche de TRA est libre : "TRAg1" et si l'autorisation de début de cycle est donnée : "Aut_RP1A".

Dans le cadre de ce sujet, la construction de l'information "TRAg1" n'est pas à traiter.

La liste des tâches exécutées par le robot RP1A est la suivante :

Repère	Tâches exécutées par le robot RP1A	Description
T11	Transférer flan de référence de RP1A1 vers point d'attente	Le préhenseur est au point d'attente, le robot va saisir un flan de référence et le ramène au point d'attente.
T12	Transférer flan de référence de RP1A2 vers point d'attente	idem
T13	Transférer flan de référence du point d'attente vers TRA	Le préhenseur est au point d'attente, le robot va déposer un flan de référence sur TRA et ramène le préhenseur en position d'attente.

Question A1.3 :

Décrire le cycle du robot RP1A en utilisant le modèle de votre choix.

Le point d'attente est essentiellement utilisé pour dégager les zones de travail : TRA, RP1A1 et RP1A2 dans le cas où certaines conditions ne sont pas remplies (TRAg1, PFP_{RP1A1}, PFP_{RP1A2}, Aut_RP1A). Pour diminuer le temps de manipulation il est possible dans certains cas d'éviter ce point d'attente et de choisir une trajectoire robot plus courte.

Question A1.4 :

- *Tracer un schéma simplifié afin de faire apparaître les trajectoires possibles du préhenseur.*
- *Donner alors l'ensemble des tâches exécutables par le robot RP1A.*

A2 : GESTION DU FONCTIONNEMENT DE LA CELLULE DE RABOUTAGE AVEC LA ZONE DE TRAVAIL A

La zone de travail A comprend l'atelier de défilage A (documents ressources DR1.1 et DR1.2), le robot de chargement RCA de la palette-outillage, la navette NA avec la palette-outillage POA, le robot de déchargement RDA de la palette-outillage, les deux navettes de déchargement (module de déchargement).

Question A2.1 :

Compte tenu des tâches proposées document DR2, élaborer le grafcet de coordination des tâches en respectant une contrainte de temps de cycle minimum. La situation initiale ne sera pas précisée.

Question A2.2 :

Donner l'expression du temps de cycle T_{cyA} en fonction des durées des différentes tâches.

Les durées seront notées : dTi avec i repère de tâche.

Question A2.3 :

- A l'aide des durées des tâches données document DR2, calculer le temps de cycle T_{cyA} .

- Préciser quelle est la séquence la plus pénalisante dans ce cycle.

- Comparer ce temps de cycle avec l'objectif fixé dans le cahier des charges de l'installation : 36 secondes pour ce type de flans et pour la cellule de raboutage complète. Conclure.

A3 : GESTION DU FONCTIONNEMENT DE LA CELLULE DE RABOUTAGE AVEC LES ZONES DE TRAVAIL A ET B

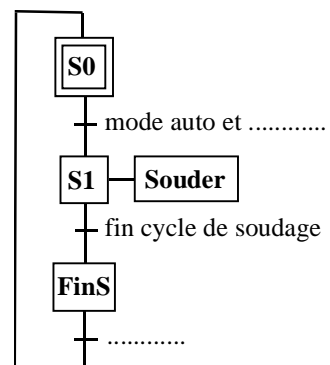
Afin d'augmenter la productivité de l'installation la zone de travail B est utilisée. Les deux zones A et B fonctionnent donc en parallèle, la contrainte de synchronisation étant liée à la poutre de soudage laser.

Question A3.1 :

Proposer une structure grafcet qui permette de synchroniser les deux grafcets (identiques aux indices A ou B près) décrivant les fonctionnements respectifs des zones A et B.

Pour améliorer la lisibilité de la spécification comportementale et faciliter la répartition des traitements dans des commandes différentes, trois grafcets sont créés :

- un grafcet de coordination de la zone de travail A,
- un grafcet de coordination de la zone de travail B,
- un grafcet pour la commande de la poutre de soudage laser dont la structure est donnée ci-contre.



Question A3.2 :

Préciser à l'aide de flèches sur un schéma où chaque commande (zone A, zone B, poutre de soudage laser) sera représentée par un rectangle les informations échangées entre ces différents grafcets pour réaliser la synchronisation.

Partie B :

SUIVI DE JOINT

La première génération de module de soudage est constituée d'une poutre de soudage laser fixe ayant deux axes de translation ainsi qu'un axe de rotation autour de l'axe vertical. Au bout de ce robot est fixée une tête de soudage supportant, entre autre, la tête du laser CO2. Pour réaliser l'opération de raboutage, on combine les mouvements du portique et de la palette. Avec cette génération de module de soudage, seuls des joints rectilignes peuvent être correctement obtenus.

La nécessité de réaliser des joints de formes toujours plus complexes rend pratiquement obligatoire l'utilisation d'un robot poly-articulé 6 axes et de la technologie laser YAG. Grâce à sa faible longueur d'onde, le faisceau YAG peut être acheminé par fibre optique jusqu'au point de focalisation. Simple et fiable, cette solution implique cependant la présence d'un nouveau système de suivi de joint afin d'assurer et de garantir la précision d'impact du faisceau laser sur la ligne de jonction.

Dans sa nouvelle version de rabouteuse (LASER RRY 1800), la société a choisi un robot 6 axes COMAU Smart H3 XL doté d'un septième axe servant de suivi de joint (Figure 6). La palette supportant les deux flans est alors fixe lors de l'opération de soudage. Ces choix technologiques ont permis de souder des pièces avec des joints de formes complexes et de diminuer les coûts, tout en gardant une excellente précision de soudage.

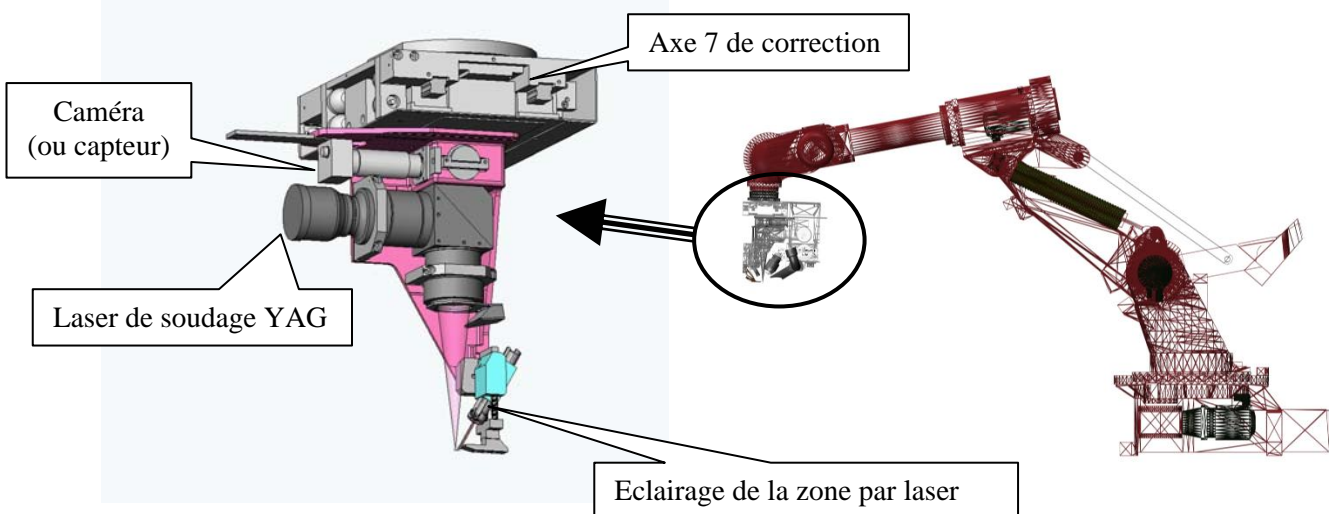


Figure 6 : Robot poly-articulé 6 axes équipé du module de suivi de joint.

Le module de suivi de joint est un système que l'on dispose en bout du robot poly-articulé. Il est constitué de la tête de soudage YAG, d'une caméra (ou capteur), d'une lumière laser chargée d'éclairer la zone à étudier (Figure 6). Le positionnement de cet ensemble sur le joint est assuré par un moteur linéaire. Il équivaut à un septième axe. La Figure 7 présente l'architecture de principe du module de suivi de joint.

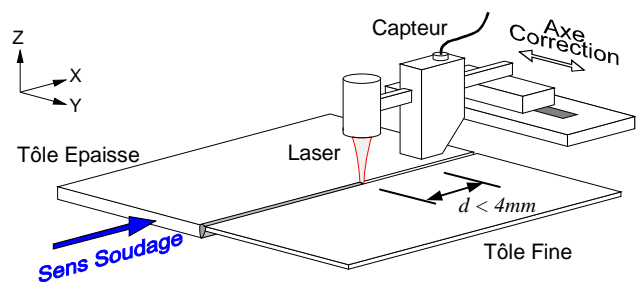


Figure 7 : Architecture de principe du module de suivi de joint.

La caméra mesure la position de la ligne de jonction en amont du faisceau laser ($d < 4\text{mm}$). La valeur obtenue est utilisée pour calculer la correction de position à appliquer à la tête de focalisation. Le décalage physique d entre la camera et le faisceau permet le traitement des images acquises, le calcul de la consigne et le mouvement de l'axe de correction pour que le laser soit sur le joint. Le suivi de joint se compose fonctionnellement des blocs suivants :

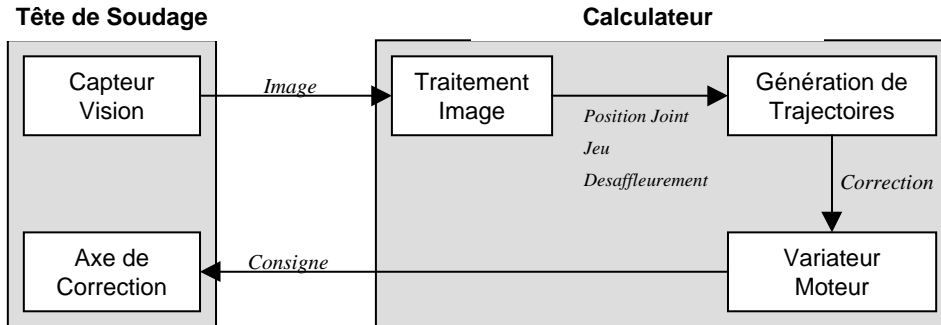


Figure 8 : Schéma-bloc fonctionnel du suivi de joint.

Avec ces choix technologiques, plusieurs types de joints sont alors possibles :

Joints rectilignes :

Les trajectoires de soudage sont rectilignes et horizontales (segments de droite dans le plan XY de la machine, pas forcément parallèles aux axes x et y).

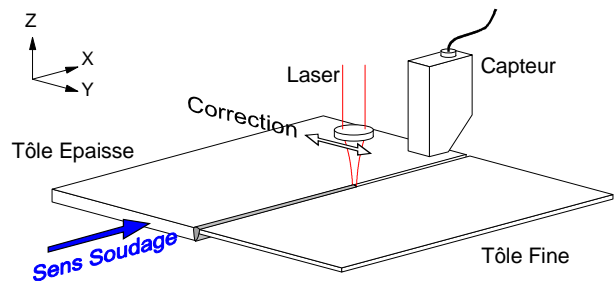


Figure 9 : Suivi de trajectoires rectilignes.

Joints courbes :

Les trajectoires sont composées de segments de droite et d'arcs de raccordement. Le rayon minimal des raccords est de 50 mm.

L'orientation capteur-joint et les retards capteur-laser ne sont pas constants.

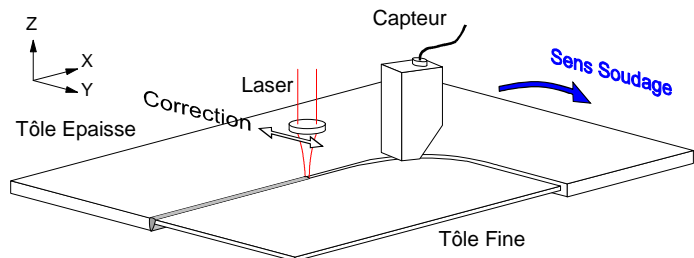


Figure 10 : Suivi de trajectoires courbes.

Soudage à clin :

Les trajectoires de soudage sont de type 3D et composées de segments de droite et de courbes dont le rayon de courbure est supérieur à 500 mm en tous points.

La distance focale est garantie par un dispositif qui assure un effort mécanique programmable jusqu'à 40 daN sur les tôles.

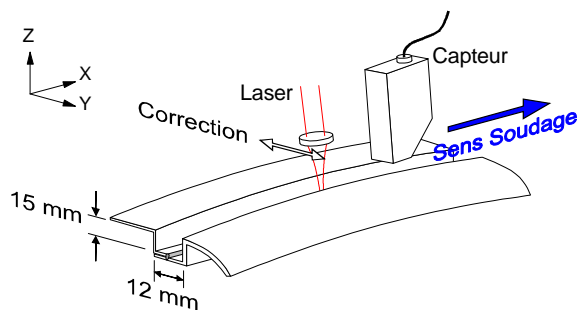


Figure 11 : Configuration pour soudage à clin.

Question B0.1 :

Expliquer le principe de soudage par laser (une réponse concise sera appréciée). Justifier de l'intérêt de ce procédé d'assemblage dans notre application.

B1 : TRAITEMENT DES IMAGES

La caméra (ou capteur de vision) réalise la prise des images à une fréquence d'acquisition pouvant aller jusqu'à 250 images/seconde. A l'aide d'un éclairage adapté, la qualité des images est garantie dans plusieurs modes de fonctionnement.

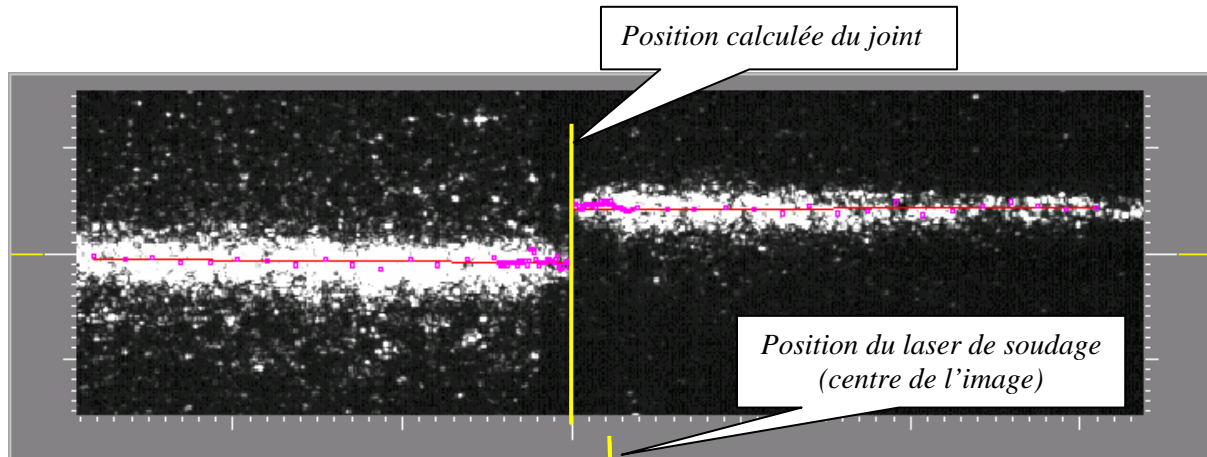


Figure 12 : Image obtenue avec un éclairage laser du joint.

Les images sont ensuite analysées afin d'extraire les informations suivantes :

- position du joint : elle est calculée à partir de la position dans le repère caméra et projetée dans le repère pièce (après correction des éventuelles non-linéarités dues à des défauts optiques, à l'inclinaison de la caméra, ...) ;
- jeu entre les deux flans : il correspond à l'écart entre les deux flans. Un défaut est généré si le jeu se trouve en dehors d'un intervalle prédéfini (dépendant du type de pièce) ;
- hauteur du joint : il s'agit de la distance verticale entre les flans à souder et la caméra ;
- désaffleurement : c'est la différence de hauteur entre les surfaces à souder.

Question B1.1 :

En considérant que la caméra se situe au dessus de la ligne de jonction (Figure 6 et Figure 7) et que la trace due à l'éclairage laser a une direction identique au déplacement du septième axe (suivi de joint), justifier, **par un schéma**, l'image obtenue à la Figure 12.

Question B1.2 :

Donner l'image obtenue par la caméra pour différents cas de joint (flans positionnés avec jeu, désaffleurement important, tôles avec bavure, ...).

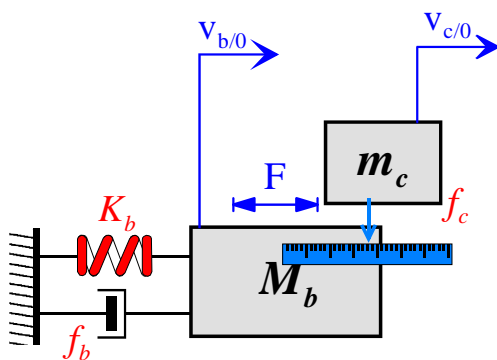
Question B1.3 :

Proposer une solution de traitement de l'image permettant de définir (ou de calculer) la position du joint (Figure 12).

B2 : ANALYSE DES PERFORMANCES EN POURSUITE DE L'AXE DE SUIVI DE JOINT

Le mouvement du module de suivi de joint est assuré par un variateur et un moteur linéaire synchrone à aimants permanents de marque ETEL. Cette technologie présente l'avantage de diminuer la masse embarquée et donc, par conséquence, d'augmenter la dynamique de déplacement de la tête de soudage. Le capteur de position est une règle haute résolution située à coté du moteur. Il informe quant à la position de la partie mobile du module de suivi de joint et, par dérivation, la vitesse de déplacement.

Dans le cadre de ce sujet, la tête est considérée comme compacte et sera modélisée par une simple masse m_c en déplacement. On suppose de plus que le frottement f_c est négligeable. Le modèle retenu dans une direction considérée pour cette étude est représenté à la Figure 13.



M_b : masse « équivalente » de la structure robot (ou de bâti)
 K_b : raideur « équivalente » de la structure robot (ou de bâti)
 f_b : coefficient de frottement visqueux « équivalent » de la structure robot (ou de bâti)
 m_c : masse de la charge embarquée
 F : force exercée par le moteur linéaire
 $V_{b/0}$: vitesse du bâti par rapport à un repère fixe R_0
 $V_{c/0}$: vitesse de la charge par rapport à un repère fixe R_0

Figure 13 : Modèle simple de l'axe de suivi de joint.

Question B2.1 :

Sachant que le module de suivi de joint est disposé au bout du robot 6 axes, justifier le modèle retenu pour notre étude.

A partir des différentes équations différentielles ci-dessous explicitant les relations entrées/sorties entre les différentes grandeurs physiques, donner le schéma-bloc fonctionnel du processus mécanique.

$$R1: m_c \frac{dV_{c/0}}{dt} = F \quad R2: M_b \frac{dV_{b/0}}{dt} = -F - F_{fb} - F_{Kb}$$

$$R3: F_{fb} = f_b V_{b/0} \quad R4: V_{b/0} = \frac{1}{K_b} \frac{dF_{Kb}}{dt}$$

$$R5: V = V_{c/b} = V_{c/0} - V_{b/0}$$

Question B2.2 :

Etablir l'expression de la fonction de transfert $H(s) = V(s)/F(s)$.

Montrer que la fonction de transfert $H(s)$ prend la forme :

$$H(s) = \frac{V(s)}{F(s)} = \frac{K_m}{m_c s} \frac{1 + \frac{2\zeta_b}{\omega_b} s + \frac{1}{\omega_b^2} s^2}{1 + \frac{2\zeta_b}{\omega_b} s + \frac{1}{\omega_b^2 (1+r)} s^2}$$

En posant $r = m_c / M_b$, expliciter les coefficients K_m , ω_b et ζ_b en fonction des paramètres de la chaîne cinématique m_c , M_b , K_b , f_b et r .

L'opérateur de Laplace est noté « s » de sorte que $f(s)$ désigne la transformée ou fonction image de la fonction originale $f(t)$.

$U(t)$ désigne l'échelon unité tel que $U(t)=1$ pour $t \geq 0$, $U(t)=0$ pour $t < 0$

La bande passante en poussée est de l'ordre de 1000 hertz. Elle est suffisamment élevée par rapport à celle de la boucle de vitesse pour considérer que la fonction de transfert $F(s)/F_{\text{réf}}(s) \cong 1$.

A partir d'un régulateur de vitesse, la grandeur de réglage $F_{\text{réf}}$ (ou consigne de poussée) est élaborée par un correcteur à action proportionnelle telle que :

$$F_{\text{réf}}(s) = k_p (V_{\text{réf}}(s) - V(s))$$

Question B2.3 :

Donner le schéma-bloc de la boucle de vitesse.

Montrer que, si $k_p \rightarrow \infty$, la vitesse relative V tend vers sa référence $V_{\text{réf}}$.

Expliquer pourquoi pratiquement le gain de boucle est limité.

Question B2.4 :

Expliquer comment, à partir d'une information de position, une image de la vitesse peut-être élaborée.

Citer les différents problèmes que l'on risque de rencontrer lors de la mise en œuvre de cette procédure.

Apporter d'éventuelles solutions pour faire face à ces phénomènes.

Dans la suite du sujet, on supposera k_p très grand de sorte que l'on pourra considérer que la fonction de transfert $V(s)/V_{\text{réf}}(s) \cong 1$.

A partir d'un régulateur de position, la grandeur de réglage $V_{\text{réf}}$ (ou consigne de vitesse) est élaborée par un correcteur à action proportionnelle et une anticipation telle que :

$$V_{\text{réf}}(s) = (k_v + k_f s) \cdot x_{\text{réf}}(s) - k_v \cdot x(s)$$

Question B2.5 :

Donner le schéma-bloc de la boucle de position.

Quelle valeur faut-il donner au gain k_f de l'anticipation pour que la position relative x soit égale à sa référence $x_{\text{réf}}$.

Vérifier alors que la position de la tête de soudage dans le repère fixe $x_{c/0}$ dépend de la référence de position $x_{\text{réf}}$ par la relation :

$$x_{c/0}(s) = \frac{1 + \frac{2\zeta_b}{\omega_b} s + \frac{1}{\omega_b^2 (1+r)} s^2}{1 + \frac{2\zeta_b}{\omega_b} s + \frac{1}{\omega_b^2} s^2} x_{\text{réf}}(s)$$

Application numérique :

- $M_b = 180$ kg
- $m_c = 30$ kg
- $K_b = 2,5 \cdot 10^5$ N/m
- $f_b = 700$ N/m/s

Question B2.6 :

Tracer les réponses en fréquence (amplitude et déphasage) de la fonction de transfert complexe $x_{c/o}(j\omega)/x_{réf}(j\omega)$.

B3 : GENERATION DE TRAJECTOIRES

Les images, issues de la caméra en temps réel, sont analysées par un module de traitement d'images afin d'extraire les informations sur la position du joint, le jeu, le désaffleurement, A partir de ces données, le calculateur génère une loi de mouvement visant à supprimer l'écart entre la position du laser de soudage et celle du joint ; ceci en accord avec les limites physiques du module (accélération, vitesse, position, ... maximum). La chaîne totale de correction doit avoir un temps de réponse inférieur à celui nécessaire à l'avance entre le système de vision et le faisceau laser. Les vitesses de correction doivent rester compatibles avec le système de vision (ne pas engendrer un flou). Afin de garantir l'exécution des différentes tâches acquisition, traitement, filtrage, commande, une architecture type PC a été retenue.

L'objectif de cette partie est d'étudier l'influence de la loi de mouvement sur le comportement dynamique de la tête de soudage laser. Dans le cadre de ce sujet, deux lois de mouvement seront étudiées et comparées (Figure 14).

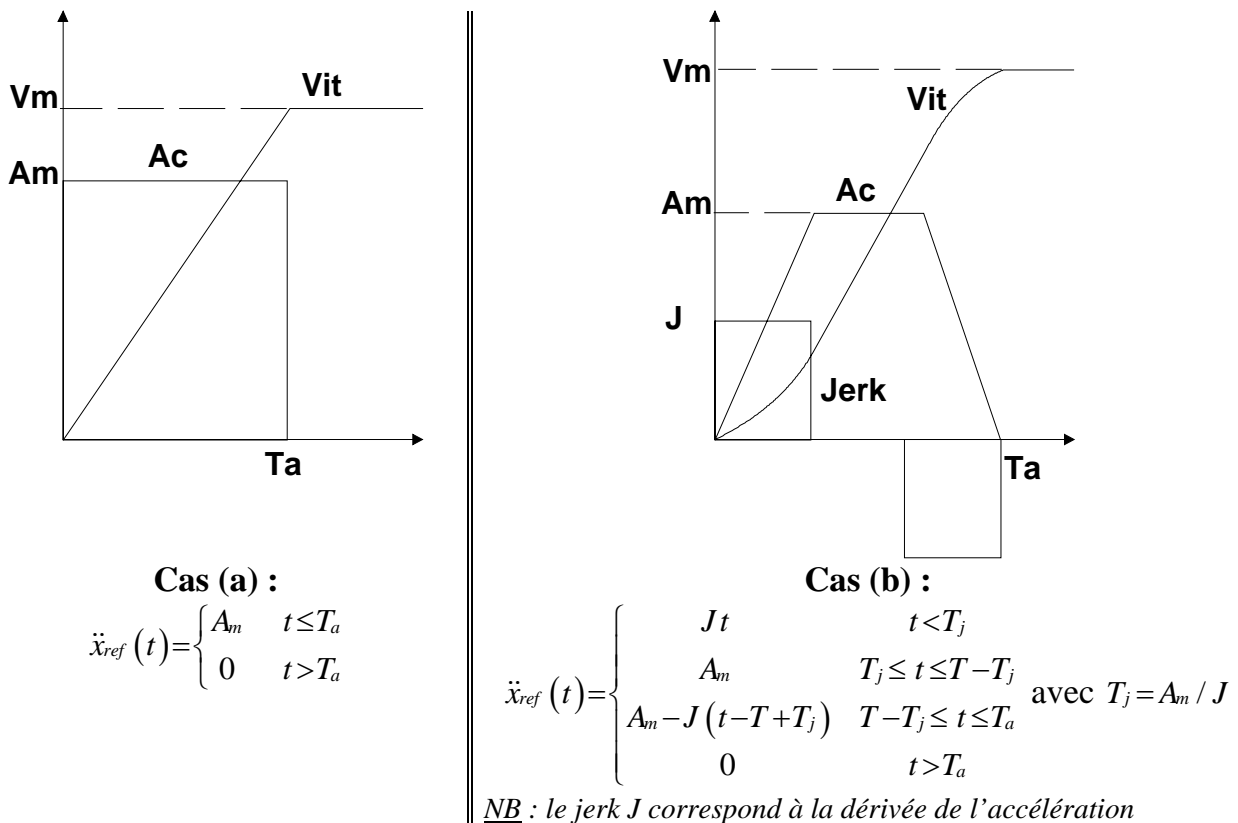


Figure 14 : Loi de vitesse en trapèze (a) – avec jerk (b).

Dans la suite de ce sujet, nous considérerons que l'anticipation est totale, donc $x = x_{réf}$. La loi de mouvement est donc directement appliquée à la mécanique.

Par conséquent, l'erreur dynamique entre la consigne et la position absolue de la charge s'écrit sous la forme d'une équation différentielle :

$$\ddot{\varepsilon}(t) + 2\zeta_b \omega_b \dot{\varepsilon}(t) + \omega_b^2 \varepsilon(t) = \frac{r}{(1+r)} \ddot{x}_{ref}(t)$$

De plus on étudiera uniquement le cas **non-amorti** $\zeta_b=0$. L'erreur dynamique suivra alors un comportement harmonique.

D'où après passage en Laplace $\xrightarrow{1} (s^2 + \omega_b^2)\varepsilon(s) - s\varepsilon(t=0^+) - \dot{\varepsilon}(t=0^+) = \frac{r}{(1+r)} Ac(s)$

B3.1 Profil d'accélération rectangulaire

Question B3.1 :

En vous aidant du document ressource DR5, donner l'expression de l'erreur dynamique $\varepsilon(t)$ pour une sollicitation d'accélération constante (phase à accélération constante $t \leq T_a$) en sachant que les conditions initiales sont : $\varepsilon(0) = 0$; $\dot{\varepsilon}(0) = 0$.

Montrer que sa valeur maximale est égale à :

$$\varepsilon_{\max} = \frac{2rA_m}{(1+r)\omega_b^2}$$

Donner la condition sur T_a pour atteindre cette valeur maximale.

Dans la phase de « vibration libre » ($t > T_a$), les oscillations sont dues aux conditions initiales de cette phase. Leurs expressions sont les suivantes :

$$\varepsilon(T_a) = \frac{rA_m}{(1+r)\omega_b^2} [1 - \cos(\omega_b T_a)]; \quad \dot{\varepsilon}(T_a) = \frac{rA_m}{(1+r)\omega_b} \sin(\omega_b T_a)$$

Nous pouvons en déduire l'expression de l'erreur dynamique $\varepsilon(s)$:

$$\varepsilon(s) = \frac{\varepsilon(T_a)s}{\omega_b^2 + s^2} + \frac{\dot{\varepsilon}(T_a)}{\omega_b^2 + s^2}$$

Ou encore :

$$\varepsilon(s) \xrightarrow{1^{-1}} \varepsilon(t) = \frac{rA_m}{(1+r)\omega_b^2} \left[\sin(\omega_b T_a) \sin(\omega_b \bar{t}) + [1 - \cos(\omega_b T_a)] \cos(\omega_b \bar{t}) \right] \text{ avec } \bar{t} = t - T_a$$

Question B3.2 :

Déterminer la valeur maximale de l'erreur dynamique dans cette phase (on rappelle que le module de la fonction $f(x) = A \cos(x) + B \sin(x)$ est $|f| = \sqrt{A^2 + B^2}$).

Question B3.3 :

Pour les deux phases étudiées de la loi de mouvement en trapèze, comparer les résultats obtenus pour l'erreur maximale ε_{\max} .

Donner la condition sur T_a .

B3.2 Profil d'accélération trapézoïdal

La phase d'accélération constante (dans le cas d'une loi de vitesse trapézoïdale) est maintenant divisée en 3 phases (dans le cas d'un profil d'accélération en trapèze) : phase linéairement accélérée $t < T_j$, phase uniformément accélérée $T_j \leq t \leq T - T_j$ et phase linéairement décélérée $T - T_j \leq t \leq T_a$.

Dans le cadre de ce sujet, seules les deux premières phases seront étudiées.

On notera $T_j = A_m / J$

Question B3.4 :

Donner l'expression de l'erreur dynamique $\varepsilon(t)$ pour une sollicitation linéairement accélérée (phase linéairement accélérée $t < T_j$) (document ressource DR5).

Question B3.5 :

Donner l'expression de l'erreur dynamique $\varepsilon(t)$ pour une sollicitation uniformément accélérée (phase uniformément accélérée $T_j \leq t \leq T - T_j$) (document ressource DR5).
Montrer que sa valeur maximale est égale à :

$$\varepsilon_{\max} = \frac{2rA_m}{(1+r)\omega_b^2} \left[\frac{\sin\left(\frac{\omega_b T_j}{2}\right)}{\frac{\omega_b T_j}{2}} + 1 \right]$$

Commenter le résultat en fonction de la durée du jerk T_j .

La courbe de la Figure 15 représente l'évolution du facteur d'amplification dynamique δ en fonction de la durée de la phase à jerk constant.

Avec $\delta = \text{sinc}\left(\frac{\omega_b T_j}{2}\right) + 1$ et $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x} = \text{sinus cardinal}$

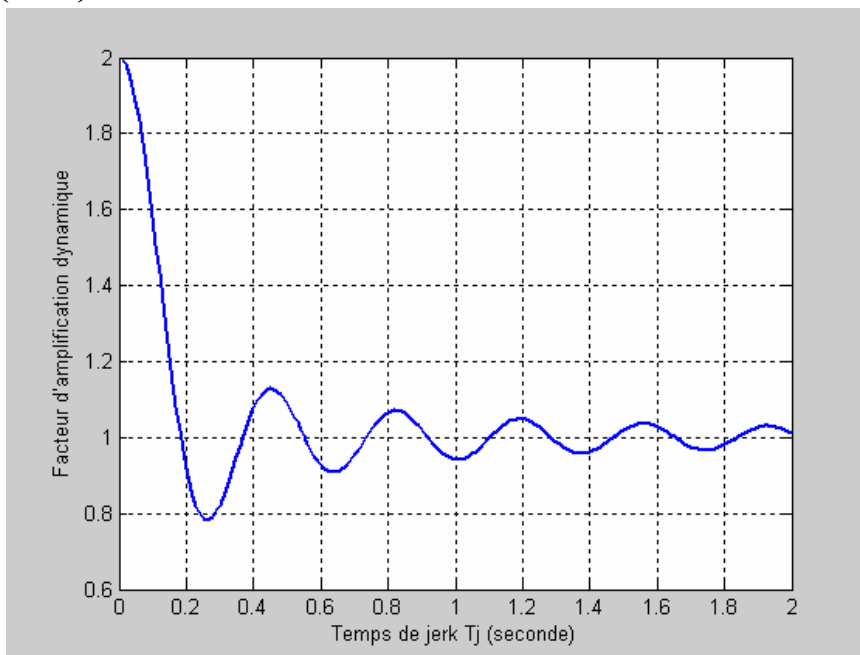


Figure 15 : Evolution du facteur d'amplification dynamique δ .

Question B3.6 :

On remarque que l'évolution du facteur d'amplification dynamique δ est telle que l'on réduit fortement l'amplitude des oscillations dès que l'on met du jerk. Discuter quant à la valeur optimale de T_j à programmer pour que le niveau des oscillations soit minimal.

Quelle est l'influence du jerk sur le temps de cycle. Commenter.

Partie C :

ECHANGE D'INFORMATIONS AU SEIN DE LA CELLULE

Architecture générale de la commande de la cellule de rabotage

L'architecture de commande retenue met en œuvre principalement :

- un automate programmable pour la commande du module de chargement de la zone de travail A et un pour la zone de travail B ;
- un automate programmable pour la commande du module de déchargement de la zone de travail A et un pour la zone de travail B ;
- un automate programmable (un pour chaque zone de travail A et B) pour la commande de la navette et de la palette-outillage associée (retaquage pour soudage des flans) ;
- un automate programmable pour la commande de la poutre de soudage laser (dont les axes sont gérés par une commande numérique) et pour gérer la coordination de l'ensemble de la cellule de rabotage. Cet automate maître est relié par un réseau local industriel aux autres automates ;
- les baies de commande des robots ;
- un PC industriel relié à l'automate maître pour le suivi de la production et pour la télémaintenance de la cellule. Ce PC est relié par à un réseau Ethernet aux autres ordinateurs de l'atelier de production et à un poste de supervision de l'atelier.

Les entrées-sorties « tout ou rien » et les terminaux de dialogue sont reliés aux automates programmables à l'aide de bus capteurs/actionneurs ASi.

Question C.1 :

L'architecture de commande retenue pour la cellule de rabotage met en œuvre trois types de réseaux différents.

- *Préciser quels sont les trois types de réseaux utilisés.*
- *Pourquoi utiliser trois types de réseaux différents ?*
- *Quels sont les principaux services rendus aux exploitants par chacun de ces réseaux ?*

Les choix technologiques d'entrées et sorties de la commande de l'ensemble navette/palette-outillage étant réalisés, l'objectif est ici de choisir les composants permettant leur raccordement à un bus capteurs/actionneurs.

La commande de l'ensemble navette/palette-outillage est assurée par un automate programmable Schneider TSX 37, équipé d'une carte 16E/12S TOR et d'un coupleur ASi (TSX SAZ 10).

Les entrées-sorties sont réparties de la manière suivante :

Nombre d'E/S reliées aux cartes TOR	Nombre d'E/S reliées au bus ASi	Type	Adresse
4 entrées		TOR	%I1.i
7 sorties		Relais	%Q2.i
	62 entrées	Non "Asifiées" <ul style="list-style-type: none">▪ 5 détecteurs de proximité à fibre optique▪ 6 détecteurs à contacts TOR▪ 51 détecteurs inductifs	%I\4.0\i.j
	51 sorties	Distributeurs "Asifiés" répartis sur 9 îlots <ul style="list-style-type: none">▪ 51 électrovannes	%Q\4.0\i.j

Dans le cas des entrées/sorties reliées au bus AS-i :

- Les 51 sorties "Asifiées" sont réparties sur 13 groupes d'adresses (repérées @1 à @13), les îlots de distributeurs nécessitent une alimentation de 24 VDC.
- Les 62 entrées, non "Asifiées", sont réparties sur 16 groupes d'adresses (repérées @15 à @30).

Question C.2 :

A l'aide du document ressource DR3 et des informations ci dessus, indiquer les références et le nombre des composants nécessaires à la réalisation de ce bus ASi.

La distribution de l'air comprimé aux différents actionneurs est réalisée à l'aide de distributeurs « Asifiés » regroupés en îlots connectés au bus ASi. Un schéma représentatif de la structure d'un îlot de distribution est donné document ressource DR4.

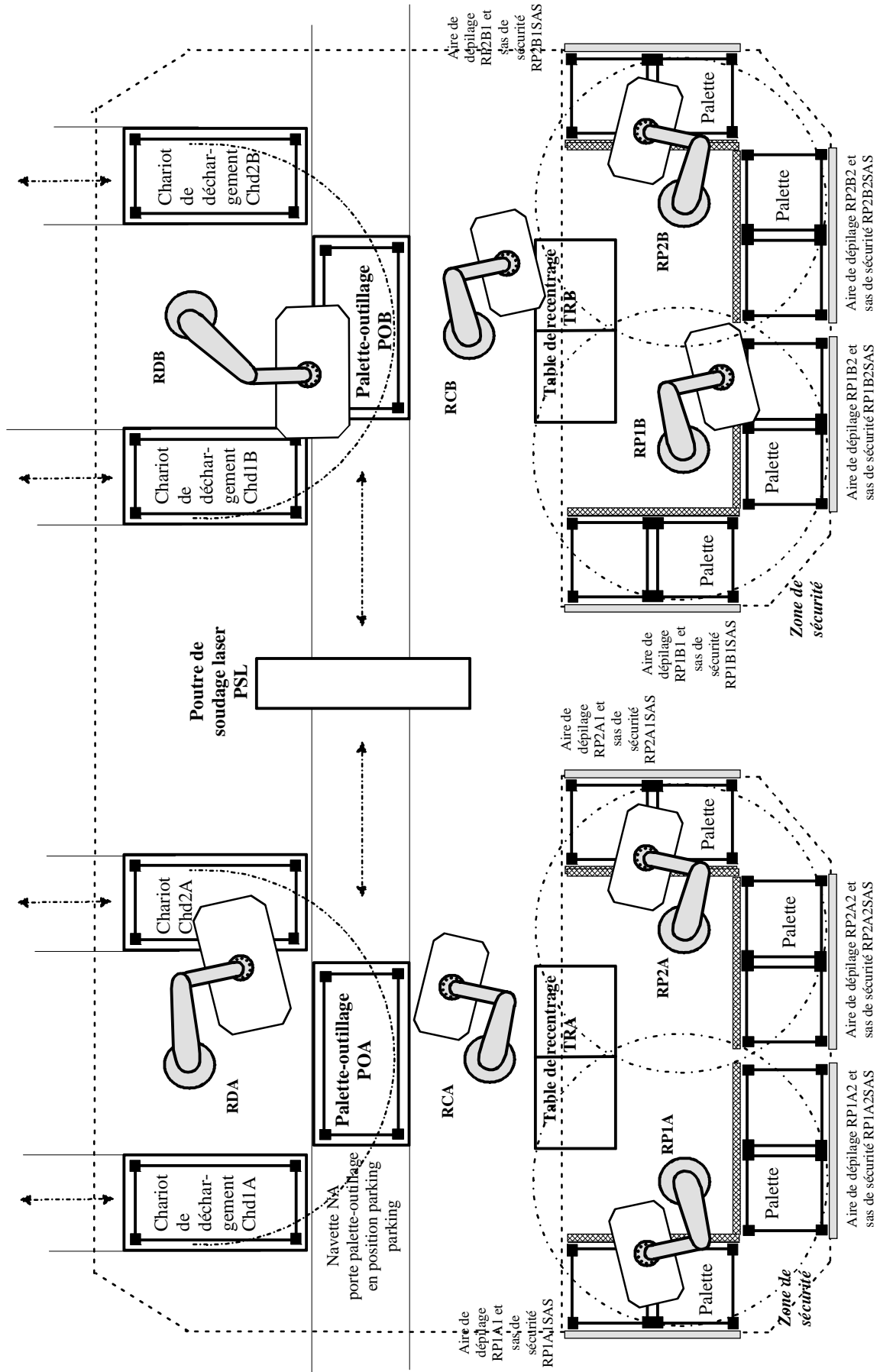
Question C.3 :

Représenter un îlot de distribution selon les données constitutives présentées sur le document ressource DR4 :

- Etablir le schéma représentatif de la structure selon le modèle fourni document ressource DR4.

- Noter la désignation des modules (tête, intermédiaire, transfert), les repères des distributeurs, l'adressage des modules esclaves et indiquer les adresses des bobines de commande.

CELLULE DE RABOUSTAGE



EQUIPEMENTS DE LA CELLULE DE RABOUTAGE LINEAIRE

Elément	Fonction
4 chariots de déchargement Chd1A, Chd2A, Chd1B et Chd2B	2 chariots sont affectés à chaque zone de travail A et B de part et d'autre du robot portique. Chacun d'eux est motorisé et permet le déchargement des pièces par l'opérateur quand l'autre chariot est en production.
2 tables de recentrage (ou regroupement) RCA et RCB	1 table est affectée à chaque zone de travail A et B. Chaque table est animée et permet le déchargement des pièces mauvaises par l'opérateur.
Source laser SL	La source est gérée par un automate programmable (sécurité, contrôle, défaut,...) relié à un écran de dialogue. La mise en fonctionnement du laser même est directement commandée par une commande numérique au niveau des points de trajectoires adéquates.
2 navettes NA et NB	Elles sont commandées par la commande numérique et peuvent recevoir toutes les palettes outillage disponibles chez le client. Une navette est associée à chaque zone de travail A et B
1 Poutre de soudage laser ou robot portique PSL	Elle permet le déplacement de la tête laser selon les directions suivantes : axe Y (latéral), axe Z (vertical), et en rotation autour de Z.
1 système de suivi de joint	Il est composé d'une caméra qui analyse le profil du joint entre les 2 flans. Directement connecté à la commande numérique il lui envoie des données qui permettent de corriger la position de la tête laser par rapport au joint.
4 Robots RCA, RDA, RCB et RDB avec leurs baies respectives	Ils permettent la manipulation des flans. 2 d'entre eux sont dédiés au chargement RCA et RCB, les 2 autres au déchargement RDA et RDB.
4 Préhenseurs robot	Positionnés au bout du bras robot afin de pouvoir manipuler tous les types de flans..
4 Robots de dépilage RP1A, RP2A, RP1B et RP2B	Ils permettent le dépilage et la préparation des flans. 2 robots sont affectés à chaque zone de travail A et B.
4 Préhenseurs robot de dépilage	Positionnés au bout du bras robot afin de pouvoir manipuler tous les types de flans.
2 Palettes outillage POA, POB	Gérées indépendamment grâce à deux automates programmables elles permettent la mise en référence des flans et leur maintien pendant la phase de soudure.

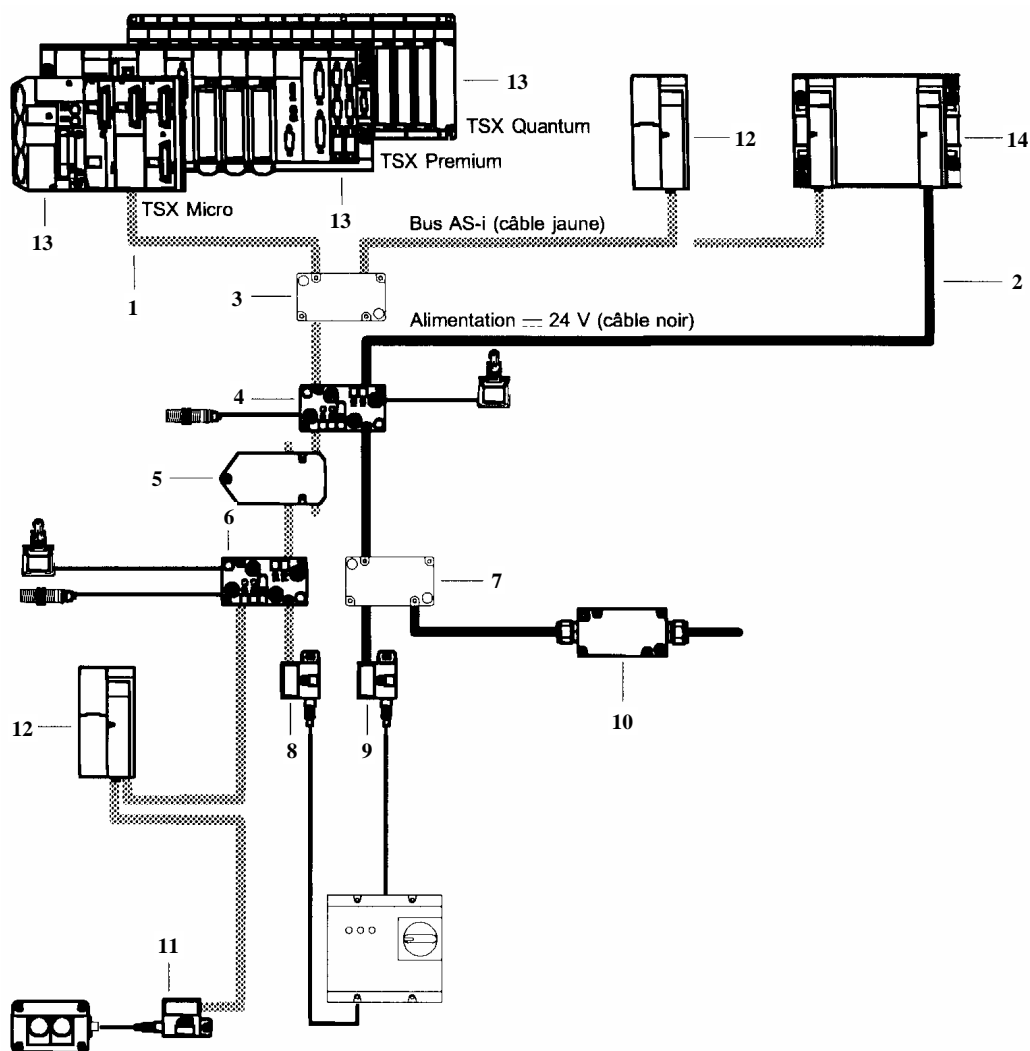
LISTE DES TACHES A PRENDRE EN COMPTE POUR LA GESTION DE LA COORDINATION DE LA CELLULE DE RABOUTAGE

Seule la zone de travail A est utilisée

Repère	Tâche	Commentaire	Durées (secondes)
TA1	Déposer un flan de référence sur la table de recentrage TRA	Cette tâche regroupe les tâches T11, T12, T13 effectuées par le robot RP1A présentées dans la partie A2 du sujet	5
TA2	Déposer un flan de retaillage sur la table de recentrage TRA	Cette tâche regroupe les trois tâches T21, T22, T23 effectuées par le robot RP2A	5
TACpréf	Transférer un flan de référence de TRA vers un point d'attente		2
TACdréf	Transférer un flan de référence du point d'attente vers la palette-outillage POA		3
TACpreta	Transférer un flan de retaillage de TRA vers un point d'attente		2
TACdreta	Transférer un flan de retaillage du point d'attente vers la palette-outillage POA		3
TAD	Transférer les flans soudés de POA vers l'un des chariots de déchargement (zone A)	La gestion est similaire à celle de la tâche TA1 avec utilisation d'un point d'attente	6
TNA+	Mettre en référence les flans et avancer la navette NA sous la poutre de soudage laser		12
TNA-	Ramener la navette NA en position parking et libérer les flans soudés		6
TS	Souder les flans sur la palette-outillage		8

CONSTITUANTS POUR BUS ASi : Architecture du système de câblage ASi

(Source Schneider)



- | | | |
|----|-----------------------------------|--|
| 1 | XZ-CB1●●●1 : | Câble plat jaune pour bus avec profil spécial permettant d'éviter les inversions de polarité, constitué de 2 conducteurs, non torsadés, non blindés. |
| 2 | XZ-CB1●●●2 : | Câble plat noir pour alimentation ~ 24 V séparée, avec profil spécial permettant d'éviter les inversions de polarité, constitué de 2 conducteurs, non torsadés, non blindés. |
| 3 | XZ-SDE1113 + XZ-SDP : | Répartiteur passif permettant le raccordement par prises vampires de deux câbles AS-i jaunes. |
| 4 | XZ-SDE1143 + XZ-SDA22D12 : | Répartiteur actif, constitué d'un module de connexion + un module utilisateur permettant le raccordement de 2 capteurs et 2 actionneurs traditionnels. |
| 5 | XZ-MA1 : | Répéteur, prolongateur de ligne permettant de rallonger les liaisons AS-i de 100 m (soit 300 m maxi). |
| 6 | XZ-SDE1113 + XZ-SDA40D3 : | Répartiteur actif, constitué d'un module de connexion + un module utilisateur permettant le raccordement de 4 capteurs traditionnels. |
| 7 | XZ-SDE1113 + XZ-SDP : | Répartiteur passif permettant le raccordement par prises vampires de deux câbles AS-i jaunes. |
| 8 | XZ-CG012●D : | Dérivation de raccordement sur le bus par prise vampire, raccordement au capteur ou actionneur par câble 2 x 0,34 mm ² à connecteur M12 droit. |
| 9 | XZ-CG0122 : | Dérivation de raccordement sur le bus par prise vampire, raccordement au capteur ou actionneur par câble 2 x 0,34 mm ² à fils dénudés pour bornier. |
| 10 | XZ-SDE2213 + XZ-SDP : | Répartiteur passif permettant le raccordement par bornier à vis d'un câble AS-noir et d'un câble rond. |
| 11 | XZ-CG0120●C : | Dérivation de raccordement sur le bus par prise vampire, raccordement au capteur ou actionneur par câble 2 x 0,34 mm ² à connecteur M12 coudé. |
| 12 | TSX SUP A0● ou ABL-6 : | Bloc d'alimentation pour l'ensemble des capteurs/actionneurs du bus AS-i. |
| 13 | Maître : | Maître du bus AS-i. |
| 14 | Module d'alimentation : | Module d'alimentation séparée 24 V pour l'ensemble des capteurs/actionneurs grands consommateurs de courant. |

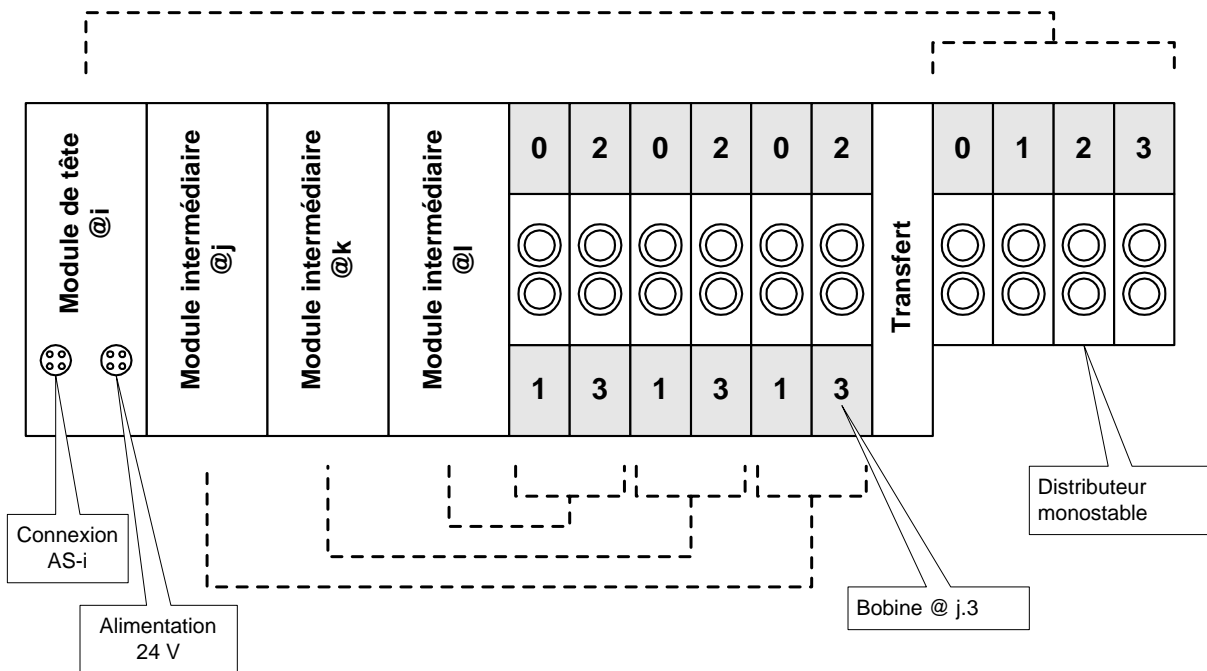
Autre : XZ-SDE1133 + XZ-SDP40D1 : Répartiteur passif 4 voies permettant le raccordement de 4 capteurs ou actionneurs Asifiés.

ÎLOTS DE DISTRIBUTION

Les îlots sont constitués de :

- Un module de tête comportant une connexion AS-i et une connexion pour l'alimentation 24V des électrovannes.
 - Trois modules AS-i intermédiaires maximum, permettant d'adresser chacun jusqu'à 4 électrovannes.
 - Distributeurs 5/2 monostables ou bistables ou 5/3 bistables à commande électropneumatique.
 - Modules transfert permettant le passage bistable→monostable ou monostable→ bistable.
- Un îlot ainsi constitué peut donc occuper 4 adresses AS-i pour 16 électrovannes au maximum.

Les adressages des sorties correspondent au schéma suivant :




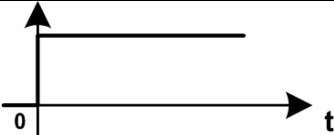

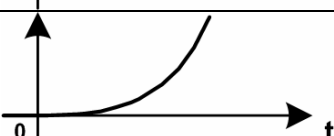

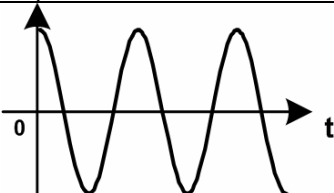
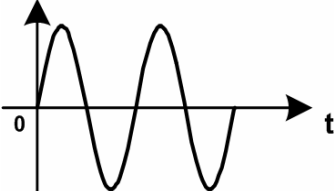
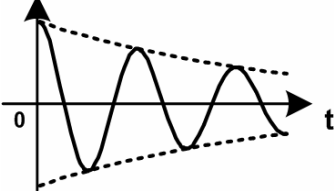
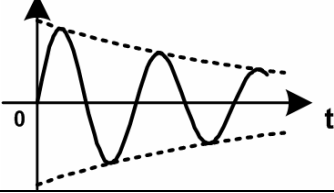
Données constitutives d'un îlot particulier monté sur l'ensemble navette/palette-outillage :

Mouvement	Distributeur	Repère distributeur	Commande	Adresse ASi
AVA 10	5/2 bistable	102V1	102YV12.0	@ 10.1
			102YV14.1	@ 10.0
ASPI 10	5/3 bistable	103V1	103YV12.0	@ 10.3
			103YV14.1	@ 10.2
TRANS 10	5/2 bistable	101V1	101YV12.0	@ 11.1
			101YV14.1	@ 11.0
VERT 10	5/2 monostable	100V1	100YV14.1	@ 11.2
BRID 9	5/2 monostable	91V1	91YV14.1	@ 12.1
VERT 9	5/2 monostable	92V1	92YV14.1	@ 12.0
POUSS 1	5/2 monostable	111V1	111YV14.1	@ 12.2
POUSS 2	5/2 monostable	112V1	112YV14.1	@ 12.3

TABLEAU DES TRANSFORMEES USUELLES

L'opérateur de Laplace est noté « s » de sorte que f(s) désigne la transformée ou fonction image de la fonction originale f(t).

$U(t)$ désigne l'échelon unité tel que $U(t)=1$ pour $t \geq 0$, $U(t)=0$ pour $t < 0$

	Fonction originale	Fonction image
	Impulsion de Dirac δ_0	1
	Echelon : $U(t)$	$\frac{1}{s}$
	Rampe : $t.U(t)$	$\frac{1}{s^2}$
	Fonction puissance : $t^n.U(t)$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
	Exponentielle : $e^{-at}.U(t)$	$\frac{1}{s+a}$
	$\cos(\omega t).U(t)$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
	$\sin(\omega t).U(t)$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
	$e^{-at} \cos(\omega t).U(t)$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$
	$e^{-at} \sin(\omega t).U(t)$	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$