

SESSION DE 2002**concours externe
de recrutement de professeurs agrégés****section : génie mécanique**

composition d'automatismes industriels

Durée : 6 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris programmable, alphanumérique ou à écran graphique - à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

Tout document et tout autre matériel électronique sont interdits.

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 et B) : 15 pages ;
- un dossier comprenant les documents ressources : 12 pages.

Le candidat traitera chacune des parties (partie A et partie B) sur des copies séparées en indiquant sur chacune d'entre elles le numéro 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.

INJECTEUR LINÉAIRE DE PALETTES

INTRODUCTION

Dans un contexte d'amélioration des gains de productivité lié à un marché très concurrentiel dans l'industrie automobile, la transitique reste une préoccupation constante pour les constructeurs et les fournisseurs de biens d'équipements ou de services. En effet, les éléments de manutention rapide deviennent de plus en plus des compléments indispensables aux machines modernes de production.

La société PCI (Process Conception Ingénierie) développe actuellement pour le groupe Peugeot Citroën Industrie un module applicatif de manutention de palettes qui doit s'intégrer dans une ligne d'assemblage d'éléments de blocs moteurs. Les principales difficultés en phase de conception et en phase de mise au point sont directement liées aux performances attendues. Ces performances ne peuvent être atteintes qu'avec :

- une bonne gestion de la coordination des opérations et une prise en compte des contraintes de sûreté de fonctionnement ;
- l'optimisation de l'association contrôle/commande, mécanisme, moteur et variateur ;
- la mise en jeu d'asservissements pointus, finement choisis et réglés.

Le sujet proposé, qui s'appuie essentiellement sur l'étude de ce module et de son intégration dans la ligne d'assemblage, se propose, après avoir comparé cette nouvelle solution à la solution mise en œuvre actuellement, de développer quelques aspects de la problématique de l'automatisation d'un module de transfert rapide.

CONTEXTE DE L'ÉTUDE ET PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

Dans l'industrie automobile, une ligne générique d'assemblage est constituée d'un ensemble de postes totalement ou partiellement automatisés, reliés par des convoyeurs (voir *Figure 1*). A l'intérieur de chaque poste, un injecteur (actuellement un convoyeur équipé d'un élévateur) permet d'amener une palette dans la zone de travail de la machine d'assemblage puis de l'évacuer de cette zone (le document ressource DR1 illustre le principe de fonctionnement du système mis en œuvre actuellement).

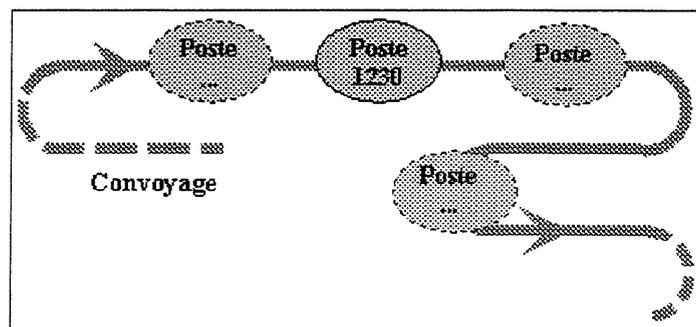


Figure 1 : Architecture générique d'une ligne d'assemblage.

Tournez la page S.V.P.

Une analyse rapide du travail effectué au niveau d'un poste de la ligne d'embellissage du moteur Peugeot HDI permet d'illustrer la problématique. Ce poste réalise la mise en place du vilebrequin dans le bloc moteur. Les palettes sont acheminées par un convoyeur à rouleaux vers un dispositif élévateur qui isole l'ensemble {palette, bloc moteur} de la ligne transfert. Après la mise en position de cet ensemble, le travail d'assemblage dans la machine peut commencer.

La recherche d'une meilleure productivité passe par une gestion efficace des durées des différentes phases de transfert et de travail. La trajectoire complexe de dépose du vilebrequin induit un temps de travail important dans la machine, ainsi le gain de temps ne peut se faire que sur le transfert. Une première solution consiste alors à doubler le poste concerné, mais cette solution s'avère très coûteuse à mettre en œuvre pour une ligne complète. La deuxième solution repose d'une part sur une optimisation du temps de cycle et, d'autre part, sur une augmentation notable des performances dynamiques des injecteurs.

INJECTEUR LINÉAIRE DE PALETTES

Il s'agit d'un module de type transfert synchrone qui déplace de poste à poste, sur une ligne d'assemblage, deux palettes chargées des constituants moteurs (d'autres cas n'ont pas été pris en compte dans l'étude : boîte de vitesse ou train roulant d'automobile). Ce dispositif (*Figure 2*) est destiné à s'insérer dans certains postes clés et, grâce à des performances de grande vitesse, à augmenter la cadence de la ligne complète.

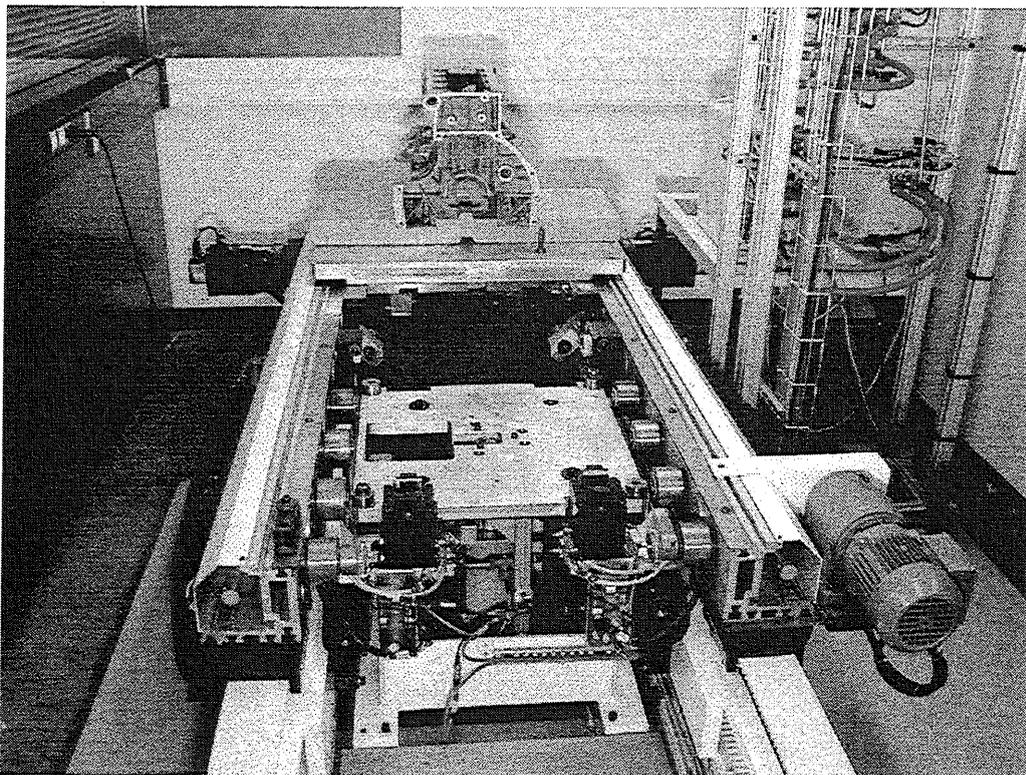


Figure 2 : Photographie d'un prototype d'injecteur linéaire.

Structure de la partie opérative

L'injecteur linéaire (document ressource DR2-1) reprend un maximum d'éléments standards : élévateur, convoyeurs tampons amont et aval, bâti, architecture et servitudes de la station de travail. Il est destiné à s'insérer en lieu et place du convoyeur actuel (document ressource DR1) au niveau de l'élévateur.

L'injecteur linéaire est constitué par deux chariots indépendants guidés sur des patins à rouleaux. Chaque chariot est tracté par une courroie crantée à très haute performance tendue entre deux poulies, l'une en amont motrice au travers d'un réducteur à jeu réduit et un moteur, l'autre folle en aval. Le tout est animé par un pilotage spécifique permettant une synchronisation du type "maître-esclave".

Ce module est équipé d'une motorisation classique afin de réaliser un ensemble à un coût minimal tout en respectant les performances prévues au cahier des charges. Il consiste en deux moteurs pilotés chacun par un variateur numérique avec carte d'axe ; un automate indépendant assure l'enchaînement des cycles et garantit la sécurité du poste.

La fonction ancrage des palettes a été réalisée par des pinces pneumatiques solidaires des chariots (avec rattrapage du jeu entre les mors).

Un convoyeur à rouleaux est embarqué sur chaque chariot afin d'amener et d'évacuer en temps masqué les palettes successives.

Tous ces éléments sont rassemblés sur une plate-forme comprenant aussi l'armoire électrique et les équipements fluides ; de ce fait le poste complet est transportable sans nécessiter de démontage.

Structure de la commande

Lors de la conception du module, une technologie de type automate – variateurs programmables a été retenue.

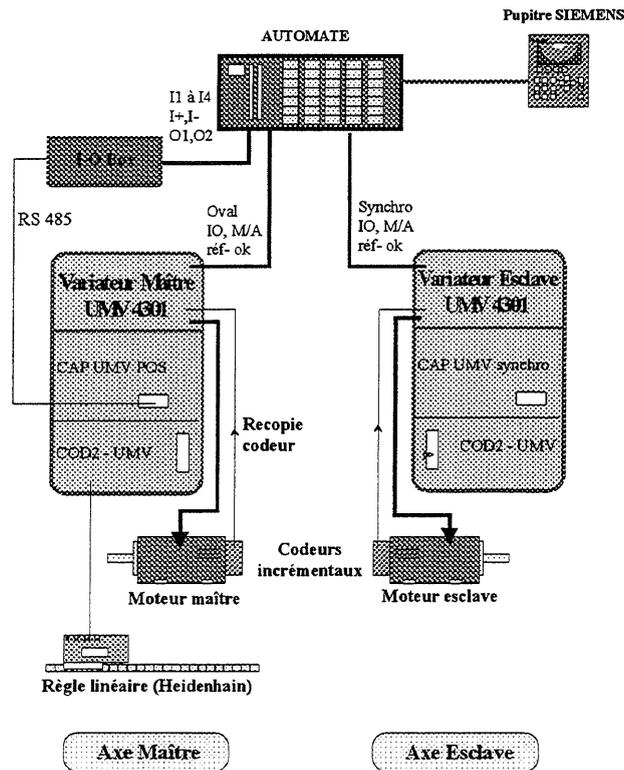


Figure 3 : Architecture de commande de l'injecteur linéaire.

Cette solution présente l'avantage de laisser l'automate programmable gérer le cycle de fonctionnement alors que la gestion du mouvement des chariots est suivie en temps réel par les options intégrées dans les variateurs. L'asservissement des deux moteurs est du type "maître-esclave", ce qui signifie que le variateur esclave est totalement dépendant de la mesure du variateur maître. Les asservissements en courant, vitesse et position de chaque chariot restent toutefois gérés individuellement par chacun des variateurs. La *Figure 3* représente l'architecture de la commande des moteurs. Enfin, la synchronisation des deux variateurs est gérée par une option intégrée et programmable, dans laquelle est stocké le code des procédures de positionnement des moteurs. Cette option gère donc matériellement la servitude du variateur esclave sur le variateur maître.

Extrait de cahier des charges fonctionnel¹ de l'injecteur linéaire automatisé

Fonctions	Critères et caractéristiques	Niveaux
Transférer une palette (amener et évacuer)	Temps de transfert par unité de longueur	6 s par mètre
	Longueur et largeur d'1 palette	600 mm
	Masse d'une palette (+charge embarquée)	200 kg
Injecter (avance rapide des chariots)	Temps d'injection	0,8 s
	Course	1 m
	Masse totale en mouvement	700 kg
	Vitesse de déplacement	2 m/s maxi.
	Accélération / décélération	20 m/s ²
	Dépassement en fin de mouvement	pas de dépassement
Isoler une palette		

Cycle de fonctionnement général de l'injecteur linéaire

Le module injecteur linéaire permet une injection rapide d'une palette au niveau de l'élévateur du poste de travail (0,8 secondes).

Les différentes phases du cycle de l'injecteur linéaire (non ordonnées dans le temps) en cycle continu sont les suivantes :

- Fermeture des pinces (ancrages amont et aval)
- Avance rapide des chariots (et donc de la *table*²)
- Ouverture des pinces (désengager les ancrages)
- Évacuation de la palette aval (en sortie)
- Élévation de la palette amont afin de procéder à l'opération d'assemblage
- Descente de la palette en fin d'opération d'assemblage
- Retour lent des chariots
- Amenée de la palette suivante (en entrée)

¹ - La colonne flexibilité n'a pas été reproduite.

- Seules les spécifications ayant un intérêt potentiel pour la compréhension du sujet ont été retenues.

² La table est constituée des 2 chariots synchronisés par la commande.

Partie A : TRANSFERT DES PALETTES

A1 - ÉTUDE DU TRANSFERT DE PALETTES ACTUEL

Dans la configuration actuelle de la ligne de montage des blocs moteurs, le transfert des palettes d'une machine à une autre est assuré par un ensemble de convoyeurs dont les rouleaux tournent en continu et à la même vitesse (document ressource DR1). Certains convoyeurs permettent le transfert des palettes dans les machines, d'autres assurent la fonction d'accumulation (zone tampon). Chaque palette entraînée parcourt en moyenne 1m en 6s.

Des butées mécaniques et des détecteurs de position permettent la gestion du flux de palettes sur les différents convoyeurs.

La gestion du flux de palettes est basée sur la définition de différentes zones de transfert et de travail (document ressource DR1). Toute palette présente dans l'une des zones ZT_{n-1} , ZA_n , ZP_n ne peut être libérée que si la zone immédiatement suivante n'est pas occupée. Les zones ZA_n , ZP_n et ZE_n seront considérées occupées dans les cas suivants :

Zone considérée occupée	dès le départ d'une palette de la zone	et jusqu'à la détection de son arrivée dans la zone
ZA_n	ZT_{n-1} ($\downarrow ct_{2_{n-1}}$)	ZP_n ($\uparrow cp_n$)
ZP_n	ZA_n	ZE_n
ZE_n	ZP_n	ZT_n (début de zone)

Question A1.1 :

A l'aide du tableau ci-dessus et du document DR1, montrer comment sont élaborées (logigrammes ou expressions logiques) les variables booléennes OZA_n , OZP_n , OZE_n caractérisant respectivement les occupations des zones ZA_n , ZP_n et ZE_n .

La zone ZT_n est une zone tampon. Elle permet l'accumulation de 4 palettes. On considère que cette zone est saturée ($sat_n = 1$) lorsque quatre palettes sont immobilisées pendant une durée supérieure ou égale à 2 secondes dans ZT_n ($ct_{1_n} = ct_{2_n} = 1$) alors que les rouleaux du convoyeur tournent. La variable sat_n repassera à l'état 0 lorsqu'une palette, après avoir été libérée de la zone ZT_n , atteindra la zone ZA_{n+1} .

Question A1.2 :

Élaborer un grafset décrivant comment est générée l'information logique sat_n .

Après avoir abaissé la butée BP_n , la palette libérée se dirige vers la zone ZE_n . Dès que le capteur ce_n détecte l'arrivée de cette palette dans la zone ZE_n , la butée BP_n est relevée.

Tournez la page S.V.P.

Question A1.3 :

Décrire le cycle de fonctionnement de l'ensemble {poste n, zone tampon ZT_n } avec le langage de spécification de votre choix et en utilisant uniquement les entrées/sorties recensées sur le document ressource DR3.

Question A1.4 :

- Tracer un diagramme de Gantt caractérisant la coordination des tâches exécutées par l'ensemble {poste n, zone tampon ZT_n } en faisant les hypothèses suivantes :
 - . la zone ZT_n n'est jamais saturée,
 - . dès que la zone ZA_n est non occupée, une nouvelle palette peut être aussitôt libérée de la zone ZT_{n-1} (pas de rupture d'approvisionnement en palettes),
 - . la situation de départ est la suivante : aucune palette n'est présente sur les convoyeurs, toutes les butées sont abaissées sauf BT_n , l'élévateur EL_n est en position basse.
- Donner alors l'expression du temps de cycle.

Question A1.5 :

Une gestion différente des butées peut-elle permettre de réduire ce temps de cycle ? Justifier succinctement votre réponse.

A2 - ÉTUDE DE L'INJECTEUR LINÉAIRE

Cette partie concerne une étude d'avant projet de l'injecteur linéaire destiné à remplacer le système de transfert actuel.

Fonctionnement du poste n en production normale

On fera les hypothèses suivantes :

- . la zone ZT_n n'est jamais saturée,
- . dès que l'injecteur est prêt à recevoir une palette, une nouvelle palette peut être aussitôt libérée de la zone ZT_{n-1} (pas de rupture d'approvisionnement en palettes).

Question A2.1 :

A l'aide des informations fournies dans la partie présentation générale et des documents ressources DR2-1, DR2-2 et DR4 :

- Préciser comment sont obtenues les informations "chariot maître (ou esclave) en position arrière (ou avant)" et quel est leur type.
- Élaborer un grafcet (GFN2) décrivant le fonctionnement normal du poste n équipé d'un injecteur linéaire avec un objectif d'optimisation du temps de cycle et en utilisant uniquement les entrées/sorties recensées sur le document ressource DR4 (dans un premier temps, on ne précisera pas la situation initiale).
- Calculer le temps de cycle par la méthode de votre choix. Justifier la réponse et commenter le résultat obtenu.

Question A2.2 :

Après avoir pris connaissance de l'extrait de GEMMA proposé document ressource DR5, préciser la situation initiale.

Modes de marche et d'arrêt et sûreté de fonctionnement

La structuration fonctionnelle de la commande retenue est une structuration par grafjets synchronisés. Un extrait du GEMMA du poste n et le grafjet des modes de marche et d'arrêt GMMA correspondant étant fourni, on souhaite dans cette partie vérifier deux propriétés importantes au regard de la sûreté de fonctionnement :

- . l'unicité du mode (à un instant t , le système ne peut pas être simultanément dans deux modes),
- . la stabilité de toutes les situations atteintes au cours de l'évolution de GMMA (une sortie est assignée dans ce grafjet et certaines situations du grafjet GMMA sont testées dans des réceptivités d'autres grafjets).

Question A2.3 :

- Donner l'expression logique permettant d'assigner la sortie « Marche convoyeur table » (document ressource DR6).
- Quel serait le comportement de cette sortie si elle devait être assignée par un état instable (document ressource DR7) ?

La vérification des deux propriétés recherchées s'appuie sur l'élaboration du graphe des situations accessibles à l'échelle de temps interne (document ressource DR7) depuis chaque situation stable. Cette phase consiste à dresser, depuis chaque situation stable et sur occurrence de tout événement extérieur, la liste exhaustive des situations accessibles (stables ou instables) par le grafjet GMMA ainsi que les possibilités d'évolution entre ces situations. Le résultat de cette analyse est présenté sous la forme d'arbre(s) dans lequel (lesquels) chaque nœud est l'image d'une situation et chaque branche celle d'une évolution. Toute évolution d'un grafjet depuis une situation stable ne peut se faire que sur occurrence d'un événement externe, exprimé nécessairement par l'intermédiaire d'un changement de valeur d'au moins une entrée (si plusieurs entrées sont corrélées, elles peuvent changer de valeur simultanément). Cependant, la prise en compte de ce seul changement de valeur ne permet pas de déterminer complètement l'évolution du grafjet induite, il est nécessaire de prendre en compte également la valeur des autres entrées (document ressource DR8).

La génération du graphe des situations accessibles peut aboutir rapidement à une explosion combinatoire du nombre d'évolutions à prendre en compte. La prise en compte des hypothèses ci-dessous et des relations existant entre certaines entrées (par exemple l'utilisation de sélecteurs deux positions sur le pupitre opérateur peut imposer une relation de dépendance entre les valeurs de ces entrées) permettra de limiter le nombre de possibilités d'évolution à envisager.

Pour mener l'étude du grafcet GMMA, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- . on considère (dans cette partie) que le grafcet GMMA n'est soumis à aucun ordre de forçage issu d'un autre grafcet,
- . « vide » et « poe » sont considérées comme des entrées,
- . les réceptivités ne contiennent aucune variable interne,
- . l'information « vide » ne peut être obtenue qu'après avoir demandé et effectué une vidange du poste n,
- . l'information « poe » fournie par les variateurs de vitesse, est considérée toujours vraie.

Question A2.4 :

En prenant en compte les hypothèses ci-dessus :

- *A l'aide du document ressource DR6 définissant le pupitre opérateur, identifier les entrées pour lesquelles des relations de dépendance existent, puis exprimer ces relations.*
- *Parmi les entrées recensées, quelles sont alors les entrées que l'on peut retenir pour mener une analyse des évolutions de situation du grafcet GMMA ?*
- *Quel est alors le nombre de changements de valeur possibles de l'ensemble de ces entrées ?*
- *Dans un cas général d'un nombre N d'entrées non corrélées, donner l'expression du nombre de changements de valeur possibles de ces N entrées.*

La génération des arbres des situations accessibles (document ressource DR8) à l'échelle de temps interne s'effectue arbre par arbre, depuis chaque situation stable atteignable. La racine de chaque arbre représente la situation stable à partir de laquelle sont calculées les évolutions. Chaque élément terminal d'un arbre représente une des situations stables atteignables ou une situation totalement instable (pour vérifier qu'une situation est totalement instable, remonter l'arbre depuis le nœud en cours d'analyse jusqu'à sa racine en vérifiant qu'aucune des situations précédentes n'est cette situation). Lorsque le nœud concerné n'est pas la racine de l'arbre, cette situation est le résultat d'une évolution précédente. Il faut alors rechercher les transitions franchissables sans nouvelle occurrence d'événement externe.

Une démarche progressive, par étapes successives, peut permettre une génération manuelle rigoureuse de chaque arbre :

- a) A partir de chaque situation stable (dans le cas de la racine de l'arbre), recenser tous les ensembles de transitions simultanément franchissables et relever l'ensemble des variations des entrées nécessaires au franchissement.
- b) A partir de chaque situation, recenser tous les ensembles de transitions simultanément franchissables et relever l'ensemble des variations des entrées nécessaires et suffisantes.
- c) Déterminer quel est l'ensemble des étapes actives à l'issue du franchissement de chaque ensemble de transitions.
- d) Parmi les situations ainsi générées rechercher celles qui présentent une instabilité totale. Pour les autres reprendre à partir du point a. Si tous les nœuds terminaux de l'arbre sont des situations totalement instables ou stables passer au point e.
- e) Construire la partie du graphe des situations accessibles correspondant à ces évolutions.

Question A2.5 :

L'analyse démarre de la situation stable {F4} considérée stable.

- Construire les différents arbres des situations accessibles à l'échelle de temps interne en respectant la procédure décrite précédemment.

- Identifier les situations et les évolutions pour lesquelles l'une des propriétés recherchées n'est pas respectée.

Question A2.6 :

Quelles modifications peut-on apporter à la spécification pour respecter ces propriétés ?

Sécurité

La zone proche de l'injecteur linéaire est une zone dangereuse pour les exploitants, son accès est donc protégé. En mode automatique (auto), L'ouverture du portillon permettant d'accéder à cette zone provoque un arrêt d'urgence de l'injecteur (document ressource DR9).

Une défaillance (ou une malveillance) qui se produirait dans le circuit d'arrêt d'urgence doit se traduire par un comportement qui permette de continuer à assurer la sécurité des exploitants.

Question A2.7 :

Quelles sont les principales défaillances pouvant se produire dans le circuit d'arrêt d'urgence et mettant en cause la sécurité ?

Une première solution pour améliorer la sécurité peut consister à utiliser le principe de redondance. Cela consiste à pallier la défaillance d'un élément par le bon fonctionnement d'un autre (en faisant l'hypothèse de non-simultanéité des défaillances).

Question A2.8 :

- Proposer, sur copie, une modification du schéma électrique qui permette d'améliorer la sécurité en utilisant ce principe de redondance.

- L'utilisation de ce principe de redondance est-il suffisant pour prendre en compte tous les risques liés aux défaillances des éléments du circuit d'arrêt d'urgence ? Justifier la réponse.

Partie B : MISE EN POSITION DE LA TABLE

B1 : DIMENSIONNEMENT D'UN CONSTITUANT DE LA CHAÎNE DE POSITIONNEMENT

Ce système est constitué de 2 axes mécaniquement indépendants permettant à un jeu de pinces pneumatiques de déplacer les palettes. Chaque axe est composé d'un ensemble motovariateur autosynchrone, d'un réducteur à train épicycloïdal, d'un système de transformation de mouvement poulies-courroie, d'un chariot guidé par un rail linéaire à patins. L'alimentation et la commande des moteurs sont assurées par 2 variateurs. La synchronisation entre les deux chariots est assurée par la commande (aucun lien mécanique n'existe entre les deux parties).

Dans cette partie, nous ferons l'hypothèse d'une synchronisation « parfaite » des axes. De plus, on considère que la masse de la courroie est négligeable devant les masses en mouvement. Etant donné la symétrie du système, les hypothèses proposées conduisent à un découplage des deux axes, et donc à l'étude d'un système monoaxe présenté sur la *Figure 4*. L'injecteur fonctionne en continu avec un cycle imposé. Il faut donc que le couple « moteur et variateur », composant chacun des 2 axes, soit capable de supporter ce régime sans échauffement anormal.

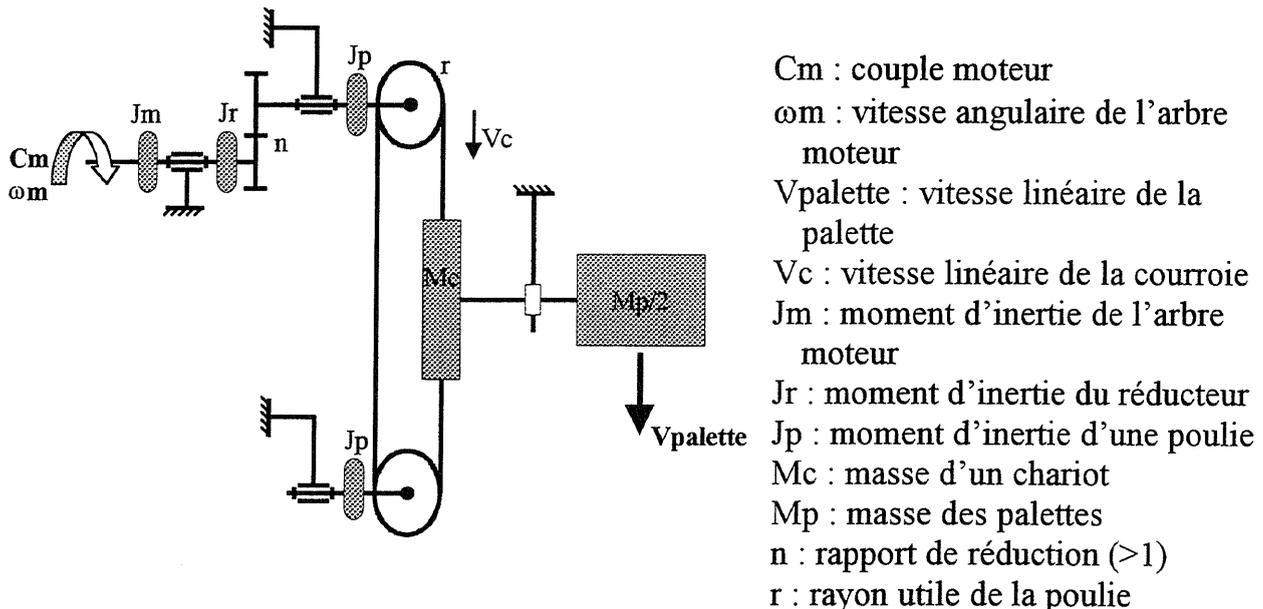


Figure 4 : Schéma de principe de la chaîne de positionnement – constitution d'un axe.

Question B1.1 :

Donner l'expression littérale du moment d'inertie total équivalent ramené à l'arbre moteur J_{Teq} (dans le cas du mouvement d'avance de la table).

Étant donné l'hypothèse de symétrie, la masse en translation est réduite de moitié :

- 350 Kg à l'aller, soit la masse d'une palette ajoutée à celle d'un chariot ;
- 150 Kg au retour, soit la masse d'un chariot uniquement.

Le fonctionnement de l'injecteur a déjà été expliqué dans le chapitre de présentation générale. La loi de mouvement de chaque axe désirée est définie par la *Figure 5*. L'ensemble des 2 chariots (la table) se déplace d'un mètre et l'accélération est égale à 20 m/s^2 (voir extrait du cahier des charges fonctionnel). Le cycle consiste en un déplacement rapide à l'aller en charge (durée = 0,8 s), un déplacement lent au retour à vide (durée = 2,3 s) et, entre ces deux mouvements, un temps d'arrêt dépendant des autres modules de l'injecteur.

Dans cette partie, l'ensemble mécanique est idéalisé : les efforts dus aux frottements secs et visqueux sont négligés.

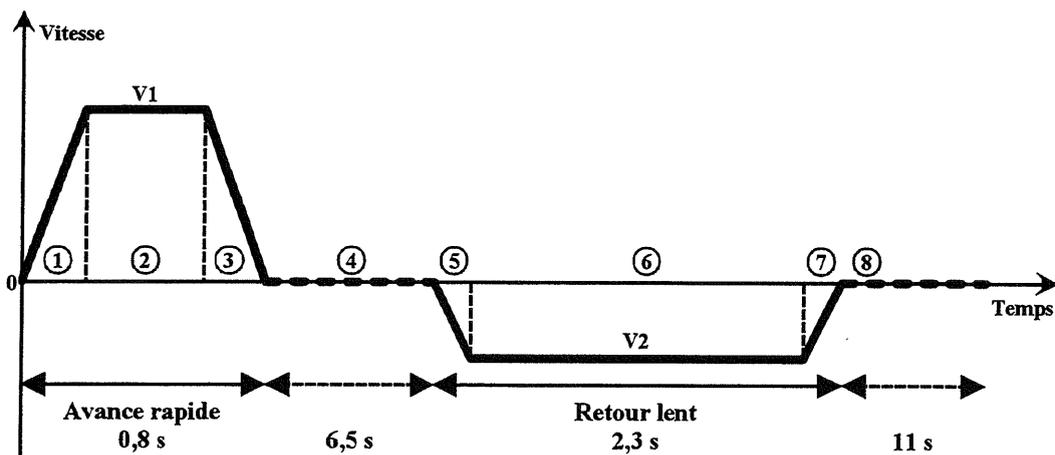


Figure 5 : Allure de la loi de consigne de vitesse.

Question B1.2 :

Donner l'expression littérale du couple électromécanique à fournir par le moteur C_m .

Question B1.3 :

Calculer les caractéristiques de la loi de mouvement désirée pour chacune des 8 phases. Préciser pour chacune des phases : sa durée, l'accélération et la vitesse de l'arbre moteur et le couple électromécanique à fournir). Présenter les résultats sous la forme d'un tableau (voir ci-dessous).

Tracer la loi de mouvement désirée (position, vitesse et accélération).

Phase	Durée	Accélération arbre moteur	Vitesse arbre moteur	Couple à fournir
1				
2				

Application numérique :

- J_m : moment d'inertie de l'arbre moteur (document ressource DR11)
- J_r : moment d'inertie du réducteur (ramené à l'arbre moteur) = $3 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$
- J_p : moment d'inertie d'une poulie = $0,02674 \text{ kg.m}^2$
- M_c : masse d'un chariot = 150 kg
- M_p : masse des palettes = 400 kg
- n : rapport de réduction = 21
- r : rayon utile de la poulie = $85 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Question B1.4 :

- A l'aide du document ressource DR10, calculer le couple équivalent thermique C_{eqth} .
- A l'aide du document ressource DR11, choisir un moteur ayant un couple nominal supérieur ou égal au couple équivalent thermique calculé (choisir un moteur ayant une dimension de bride de 142 : SMV 142...).
- Choisir alors le variateur UMV 4301 associé susceptible de fournir le couple crête.

Pour cette application, l'accélération de la charge entraînée est un paramètre important à prendre en considération. Une solution consiste alors à agir sur le rapport de réduction du réducteur.

On appellera l'inertie équivalente de la "charge", la somme des inerties (masses) situées en aval du réducteur ramenées à l'arbre moteur et l'inertie équivalente "moteur", la somme des inerties situées en amont du réducteur ramenées à l'arbre moteur.

Question B1-5 :

- Montrer que l'accélération de la palette est maximale lorsque l'inertie équivalente de la "charge" ramenée à l'arbre moteur est égale à l'inertie équivalente "moteur".
- Donner alors la valeur du rapport optimal n optimal.

B2 : MODÉLISATION DU PROCESSUS MÉCANIQUE

Les processus mécaniques appartiennent à une classe de systèmes dans laquelle les modèles de connaissance s'établissent directement à partir des lois physiques. La difficulté réside dans la recherche de l'adéquation modèle - système réel. Pour cela, il est important de déterminer les caractéristiques des différents constituants (masse, inertie, rigidité, amortissement). La partie mécanique du système de positionnement de la table a été modélisée en tenant compte des caractéristiques des moteurs d'axes, de la cinématique d'entraînement et du comportement dynamique de la structure. La modélisation discrète repose sur l'hypothèse que chaque élément peut être modélisé par au moins une masse et un ressort de rigidité équivalente à l'élément réel (*Figure 6*).

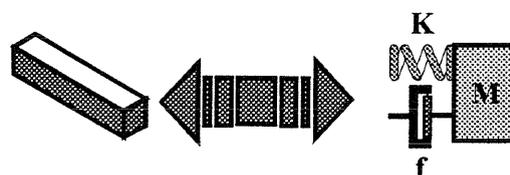
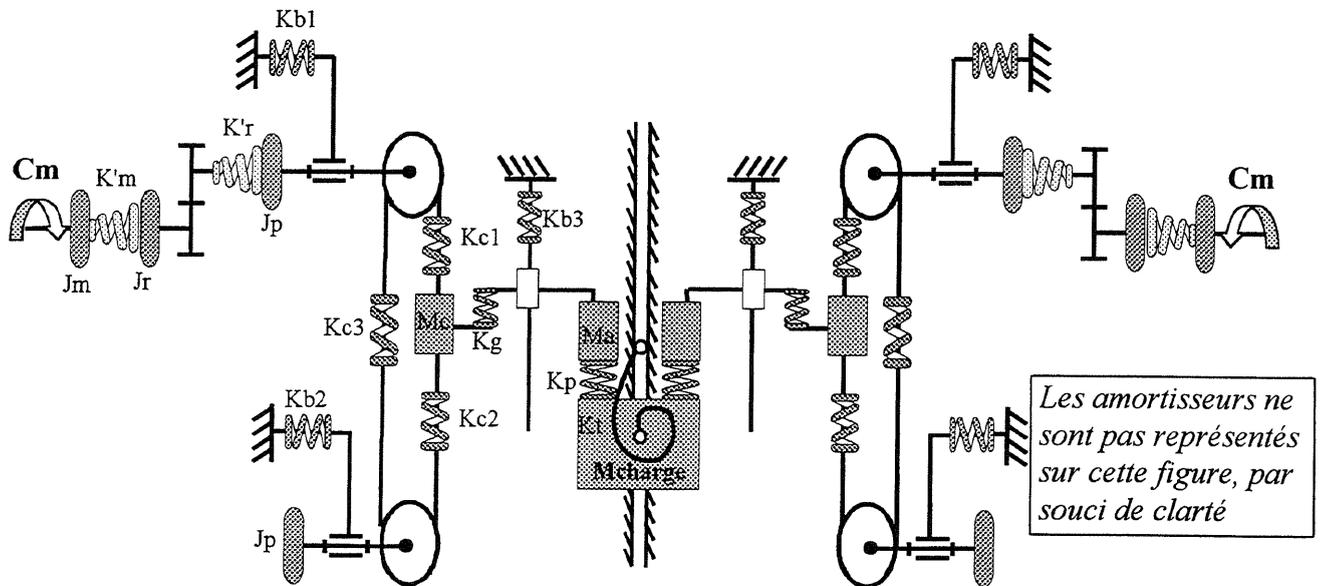


Figure 6 : Principe de la modélisation discrète.

La Figure 7 représente le résultat de cette modélisation discrète du système. Les hypothèses pour cette modélisation sont :

- Action de la pesanteur négligée
- Amortissements limités aux frottements secs et visqueux (pas d'amortissements internes)

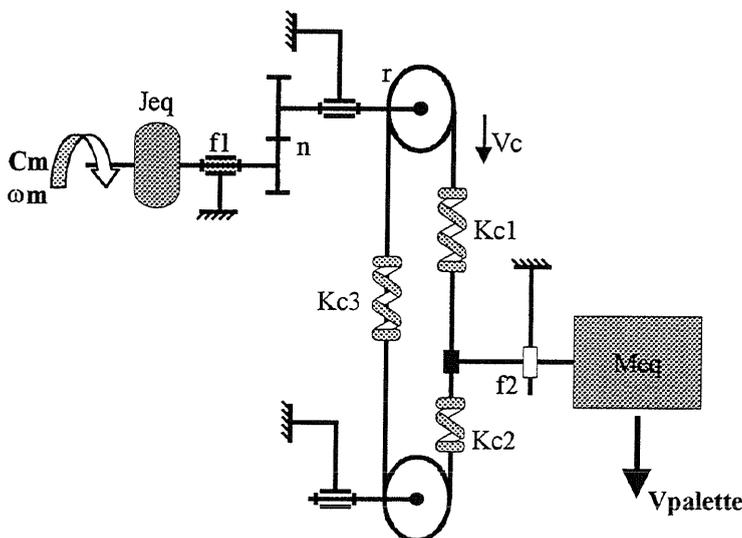


Les amortisseurs ne sont pas représentés sur cette figure, par souci de clarté

Figure 7 : Modèle discret de l'injecteur linéaire.

On remarque la lourdeur de cette modélisation, le nombre de degrés de liberté est trop important pour pouvoir obtenir un modèle facilement utilisable par la commande. La simplification de ce modèle passe par des hypothèses de comportement d'un axe par rapport à l'autre. La difficulté principale réside dans la connaissance de la synchronisation des deux axes.

Dans cette partie, le modèle retenu sera celui d'un « double monoaxe ». On prend ici comme hypothèse que la synchronisation des axes est « parfaite », la charge est déplacée de façon égale par les deux axes. On considère ensuite que le bâti est rigide, et que la masse de la courroie est négligeable devant les masses en mouvement.



- C_m : couple moteur
- ω_m : vitesse angulaire de l'arbre moteur
- $V_{palette}$: vitesse linéaire de la palette
- V_c : vitesse linéaire de la courroie
- J_{eq} : moment d'inertie équivalent ramené à l'arbre moteur
- M_{eq} : masse équivalente ramenée à la palette
- n : rapport de réduction (>1)
- r : rayon utile de la poulie
- K_{ci} : raideur linéique de la courroie
- $f_{1,2}$: coefficients de frottement visqueux

Figure 8 : Modèle discret simplifié de la chaîne de positionnement.

De plus, des essais ont montré que la souplesse prépondérante est celle de la courroie. Nous pouvons donc établir un modèle simplifié ne prenant en compte que la raideur de celle-ci et représentant au mieux le comportement global de la chaîne de positionnement (Figure 8).

Question B2.1 :

Montrer que, à partir du modèle simplifié retenu (Figure 8), nous pouvons établir un modèle équivalent comprenant une inertie équivalente J_{eq} , une raideur équivalente K_{eq} (raideur prépondérante de la courroie) et une masse équivalente M_{eq} . Justifier alors le modèle discret équivalent. Compléter les hypothèses si nécessaire. Donner l'expression littérale de K_{eq} . Etablir les équations différentielles donnant les différentes grandeurs physiques. Justifier alors le schéma-bloc fonctionnel du processus représenté à la Figure 9.

La Figure 9 présente le schéma-bloc fonctionnel correspondant au modèle discret retenu pour cette étude. 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 $t < 0$

Le système est constitué de 3 éléments accumulateurs d'énergie : une inertie, un ressort et une masse. Le processus est donc d'ordre 3.

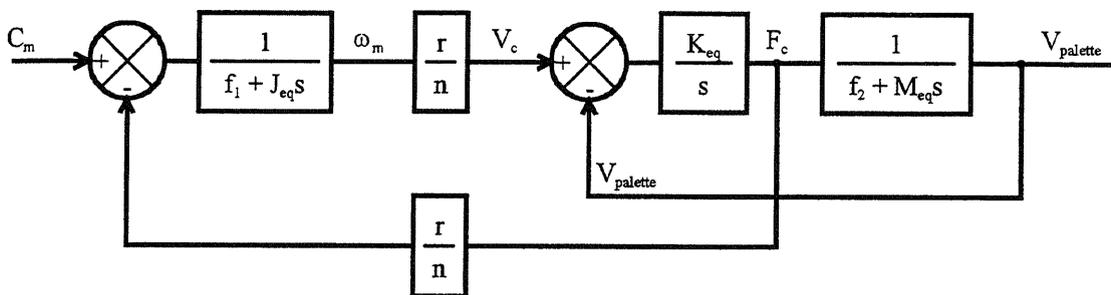


Figure 9 : Schéma-bloc fonctionnel.

Question B2.2 :

A partir de la Figure 9, établir l'expression de la fonction de transfert $H(s) = V_{palette}(s)/C_m(s)$.

Vérifier que l'expression littérale trouvée prend la forme :

$$H(s) = \frac{V_{palette}(s)}{C_m(s)} = \frac{b_0}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3}$$

Question B2.3 :

Montrer que, si le coefficient K_{eq} est considéré de valeur infiniment grande, la fonction de transfert $H(s)$ est de la forme :

$$H(s) = \frac{K_m}{(1 + \tau s)} = \frac{\frac{r}{n} \left[1 / \left(f_1 + \frac{r^2}{n^2} f_2 \right) \right]}{1 + \left[\left(J_{eq} + \frac{r^2}{n^2} M_{eq} \right) / \left(f_1 + \frac{r^2}{n^2} f_2 \right) \right] s}$$

Dans le cas de notre application, la dynamique souhaitée lors de la phase d'injection de la palette est telle que la souplesse de la courroie ne peut pas être ignorée. Le système peut être alors modélisé par un mode dominant du premier ordre et un mode oscillant.

Question B2.4 :

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

$$H(s) = \frac{V_{\text{palette}}(s)}{C_m(s)} = \frac{K_m}{(1 + \tau s) \left(1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2\right)}$$

Expliciter les coefficients ω_n et ζ en fonction des paramètres de la chaîne cinématique J_{eq} , M_{eq} , K_{eq} , f_1 , f_2 , n et r .

Question B2.5 :

Etablir l'expression de la fonction de transfert $H1(s) = \omega_m(s)/C_m(s)$.

Vérifier que l'expression littérale trouvée prend la forme :

$$H1(s) = \frac{\omega_m(s)}{C_m(s)} = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3} = \frac{K_{m1}}{(1 + \tau s) \left(1 + \frac{2\zeta_1}{\omega_{n1}} s + \frac{1}{\omega_{n1}^2} s^2\right)}$$

Expliciter les coefficients K_{m1} , ω_{n1} et ζ_1 en fonction des paramètres de la chaîne cinématique J_{eq} , M_{eq} , K_{eq} , f_1 , f_2 , n et r .

Application numérique :

- $J_{eq} = 0,00241 \text{ kg.m}^2$
- $M_{eq} = 350 \text{ kg}$
- $K_{eq} = 8,6 \cdot 10^6 \text{ N/m}$
- $f_1 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Nm/rad/s}$
- $f_2 = 305 \text{ N/m/s}$
- n : rapport de réduction = 21
- r : rayon utile de la poulie = $85 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

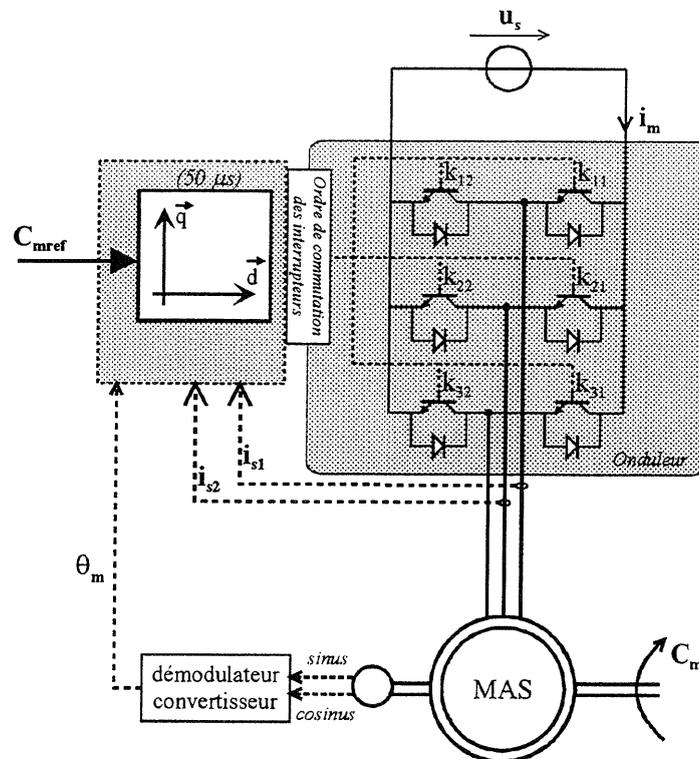
Question B2.6 :

Tracer les réponses en fréquence (amplitude et déphasage) des fonctions de transfert complexes $H(j\omega)$ et $H1(j\omega)$.

B3 : ETUDE DE LA COMMANDE

Le mouvement de chaque axe est assuré par un motovariateur autosynchrone. Cette technologie présente l'avantage d'être robuste et fiable dans le temps. Les moteurs sont capables de développer un couple constant sur une large plage de vitesse de rotation grâce à un contrôle des courants et du flux dans la machine, appelé couramment commande vectorielle de flux.

Ce réglage est possible par l'emploi d'un onduleur. C'est un convertisseur de puissance travaillant en modulation de largeur d'impulsion (MLI) à partir d'une fréquence pilote. L'ensemble moteur - onduleur se présente selon le schéma de principe de la *Figure 10*. Le capteur de position angulaire est un résolveur intégré au moteur électrique. Il délivre 2 signaux, respectivement proportionnels au sinus et au cosinus de l'angle du rotor du moteur Θ_m . Un "démodulateur-convertisseur" élabore un signal digital sur 16 bits représentant la position de l'angle moteur par rapport à une référence absolue.



*Figure 10 : Schéma de principe d'un ensemble :
commande vectorielle - onduleur - moteur synchrone.*

Pour chaque ensemble, un régulateur de vitesse élabore un signal de référence C_{mref} (ou consigne de couple). A partir de la position du rotor et des courants statoriques, le moteur, par l'intermédiaire de sa commande vectorielle de flux, fournit un couple C_m . Le modèle de représentation de cet ensemble, considéré dans le sujet comme linéaire, aura comme fonction de transfert $C_m(s)/C_{mref}(s)$:

$$\frac{C_m(s)}{C_{mref}(s)} = \frac{1}{1 + \tau_c s}$$

Question B3.1 :

Donner l'expression de la réponse temporelle du couple moteur $C_m(t)$ lors d'une sollicitation en échelon d'amplitude C_{mref0} .

Esquisser graphiquement la réponse et préciser toutes les caractéristiques de celle-ci.

Dans la suite du sujet, nous supposons que la boucle de courant est parfaitement réglée et optimisée (fem compensée, ...). La constante de temps τ_c est alors très petite devant la constante de temps naturelle du processus mécanique. La boucle de courant sera négligée et nous supposons que $C_m(s) = C_{mref}(s)$.

Le concepteur du module a laissé la possibilité à l'automaticien de choisir l'emplacement de la prise d'information de position et donc, par calcul, de l'information de vitesse (*Figure 11*) :

- ① : résolveur disposé sur l'arbre moteur,
- ② : règle linéaire de haute précision disposée sur le chariot.

Dans la suite du sujet, nous vous proposons d'étudier l'influence de ce choix sur la stabilité et la précision dynamique du module commandé.

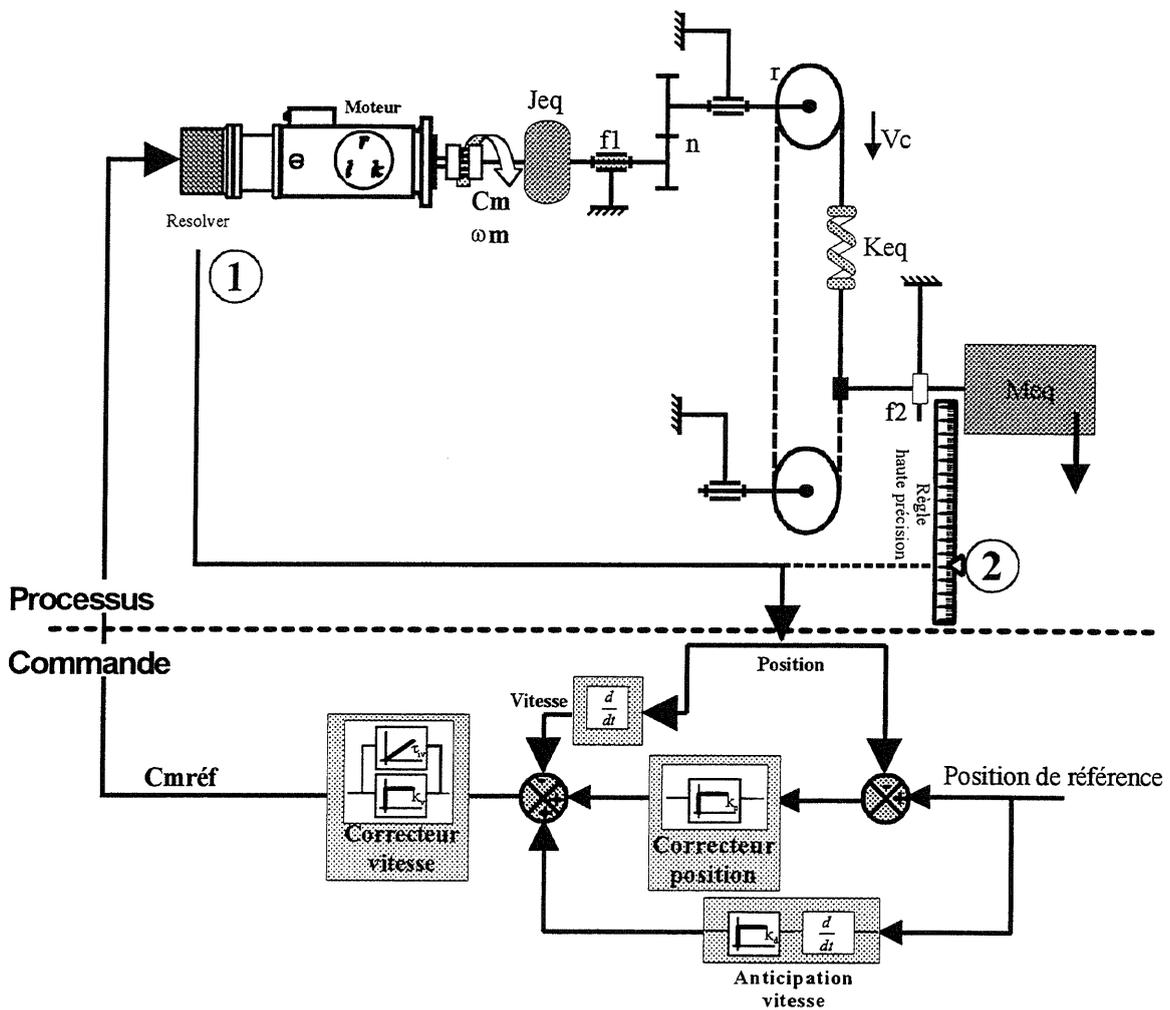


Figure 11 : Principe général d'un asservissement de position et de vitesse.

Étude de la boucle de vitesse et de position à partir du résolver moteur

La Figure 12 présente la boucle de vitesse à partir d'une information provenant de l'arbre moteur (cas ①). Le processus est modélisé par 2 fonctions de transfert. Le correcteur implémenté est à action proportionnelle et intégrale.

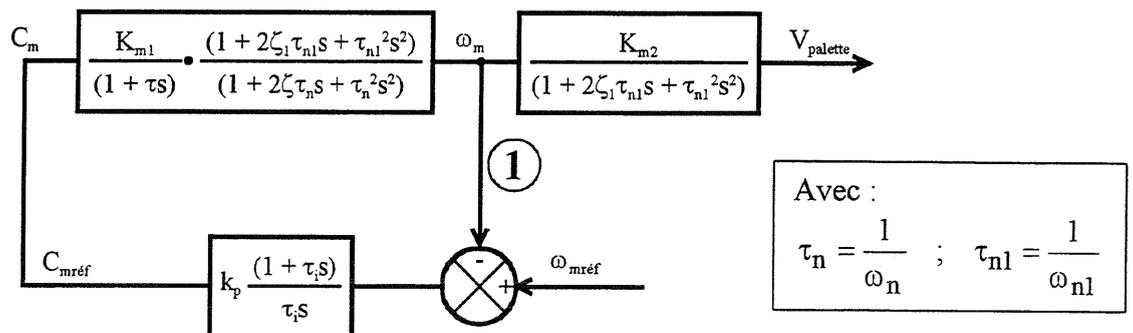


Fig. B3.3 :

Figure 12 : Boucle d'asservissement de vitesse à partir d'une information provenant de l'arbre moteur (cas ①).

Question B3.2 :

En considérant que la constante de temps intégrale τ_i du correcteur de vitesse est égale à la constante de temps τ du mode dominant et que $\omega_n > \omega_n l$, montrer que la boucle de vitesse est toujours stable quelque soit la valeur de $k_p \geq 0$ (vous utiliserez la méthode de votre choix).

Question B3.3 :

Le correcteur de la boucle de position est à action proportionnelle (k_v). Etablir sous la forme d'un schéma bloc, l'architecture complète de l'asservissement de position (à partir d'une loi de vitesse en trapèze de la palette).

Question B3.4 :

En considérant que le réglage de la boucle de vitesse est optimal $\omega_m = \omega_{m \text{réf}}$, ainsi qu'une valeur du gain de la boucle de position k_v importante, justifier les oscillations à la fin du mouvement de la palette (Figure 13).

Proposer des solutions pour atténuer ces oscillations (voire les supprimer).

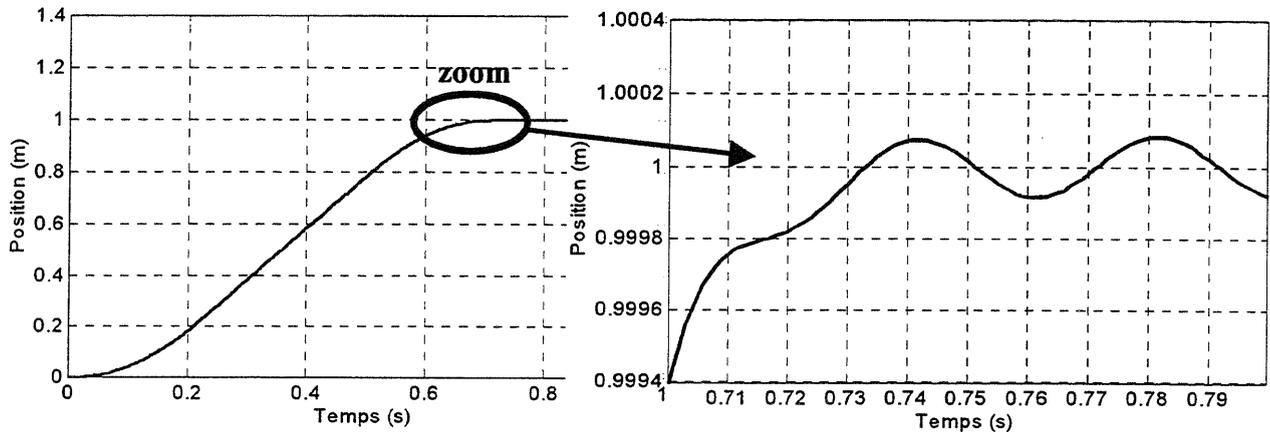


Figure 13 : Oscillations de fin de mouvement de la palette.

Étude de la boucle de vitesse et de position à partir d'une règle linéaire disposée sur le chariot

La Figure 14 présente la boucle de vitesse à partir d'une information provenant d'une règle linéaire haute précision disposée sur le chariot (cas ②). Dans ce cas, le processus est modélisé par une seule fonction de transfert. Le correcteur implémenté est à action proportionnelle et intégrale.

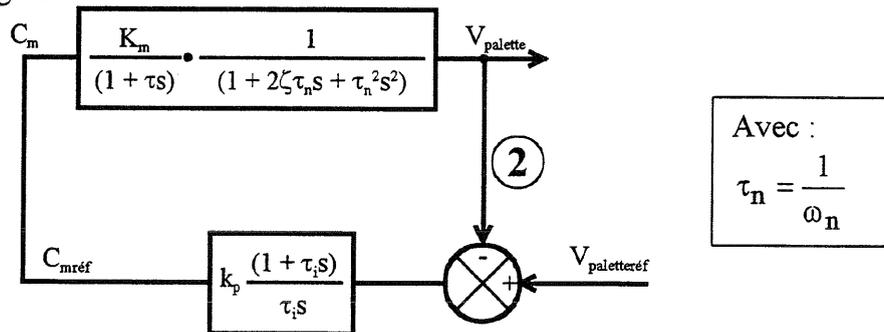


Figure 14 : Boucle d'asservissement de vitesse à partir d'une information provenant du chariot (cas ②).

Question B3.5 :

En considérant que la constante de temps intégrale τ_i du correcteur de vitesse est égale à la constante de temps τ du mode dominant, montrer que le polynôme caractéristique est un polynôme du troisième degré d'expression :

$$P_c(s) = c_0 + c_1s + c_2s^2 + c_3s^3$$

Montrer que la boucle de vitesse est très rapidement instable lorsque la valeur de k_p croît (≥ 0).

Application numérique :

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - $J_{eq} = 0,00241 \text{ kg.m}^2$ - $M_{eq} = 350 \text{ kg}$ - $K_{eq} = 8,6 \cdot 10^6 \text{ N/m}$ - $f_1 := 5 \cdot 10^{-3} \text{ Nm/rad/s}$ - $f_2 := 305 \text{ N/m/s}$ - n : rapport de réduction = 21 - r : rayon utile de la poulie = $85 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ | <ul style="list-style-type: none"> - $K_m = 0,4 \text{ m/s/N.m}$ - $\tau = 0,8 \text{ s}$ - $\zeta = 2,5 \cdot 10^{-3}$ - $\omega_n = 288 \text{ rad/s}$ |
|--|--|

La Figure 15 présente le lieu des racines du polynôme caractéristique à cet asservissement de vitesse lorsque le gain de boucle k_p évolue de zéro vers l'infini (lieu d'Evans).

Question B3.6 :

- Justifier l'allure de ce lieu.
- Déterminer les coordonnées des différents points caractéristiques (points de départ et d'arrivée, asymptotes, ...).
- Déterminer les conditions de stabilité du processus en calculant les points d'intersection des branches du lieu avec l'axe des imaginaires.

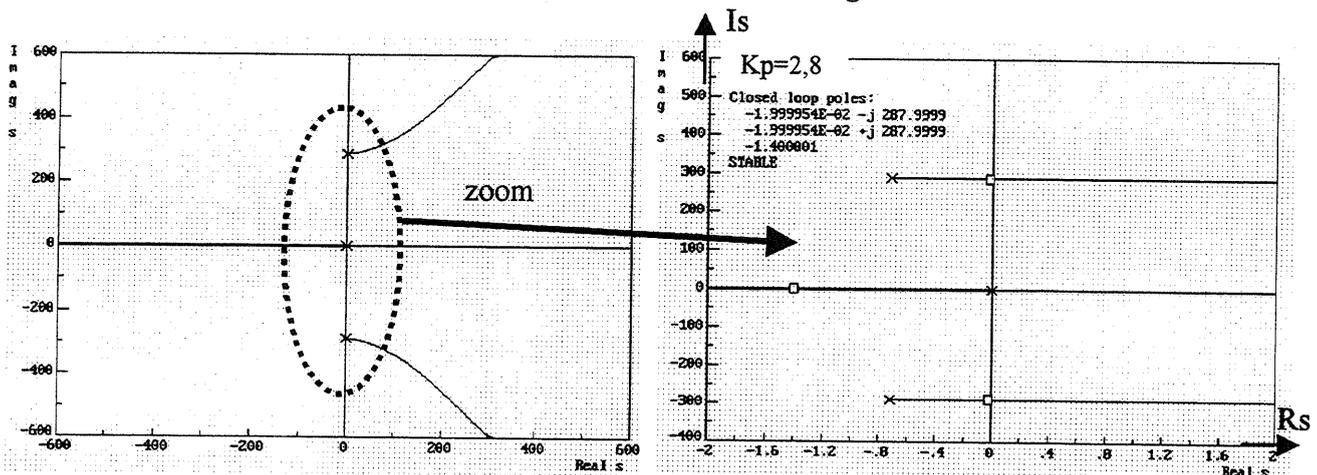


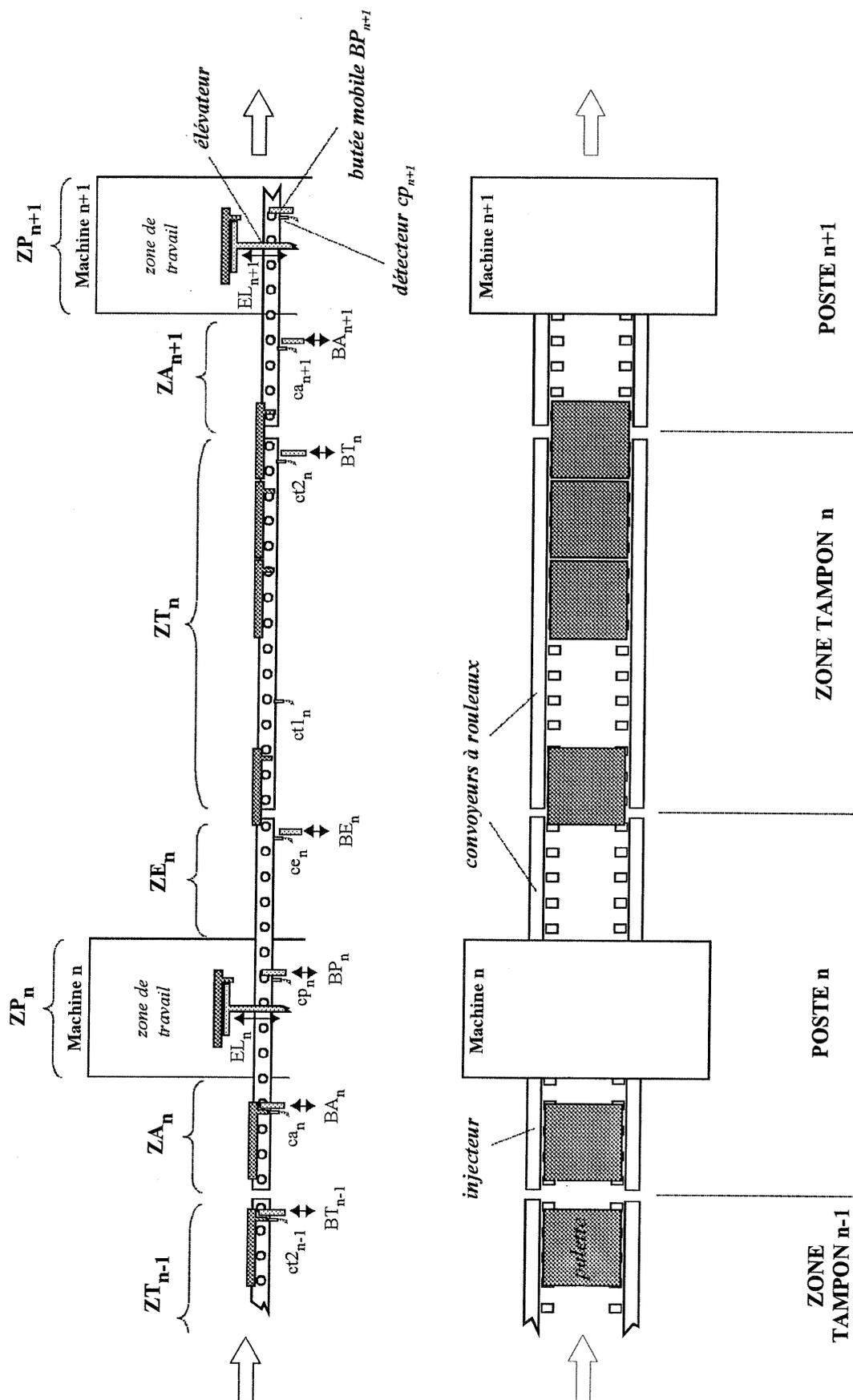
Figure 15 : Lieu d'Evans de la boucle de vitesse

Les trois carrés "□" de la Figure 15 correspondent aux trois racines du polynôme caractéristique en boucle fermée pour un gain $k_p=2,8$.

Question B3.7 :

- Donner directement l'expression de la fonction de transfert en boucle fermée $V_{palette}(s)/V_{palette\text{réf}}(s)$ pour $k_p=2,8$.
- Esquisser l'allure de la réponse indicielle.
- La période transitoire est-elle compatible avec la dynamique désirée ?

SCHEMA DE PRINCIPE DU SYSTEME ACTUEL DE TRANSFERT DE PALETTES

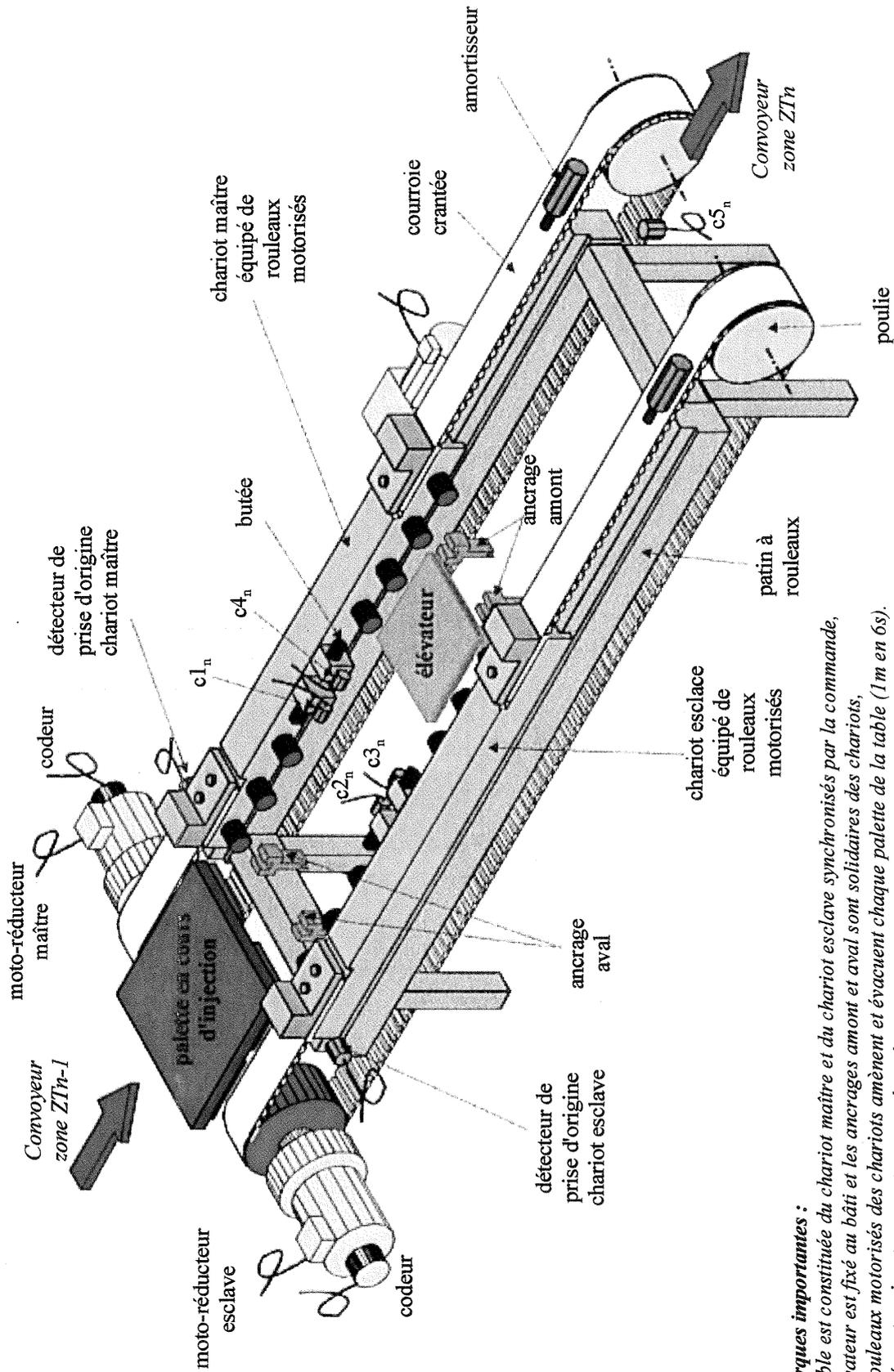


Document ressource DR1

Remarques :

- les distances respectives entre les butées BT_{n-1} et BA_n , BA_n et BP_n , et BP_n et BE_n sont de 1 m, la distance entre BE_n et BT_n est de 3 m,
- on considère que chaque palette met 6s pour parcourir 1m, y compris dans le cas où elle serait libérée par une butée,
- les détecteurs de fin de course des butées mobiles et des élévateurs ne sont pas représentés.

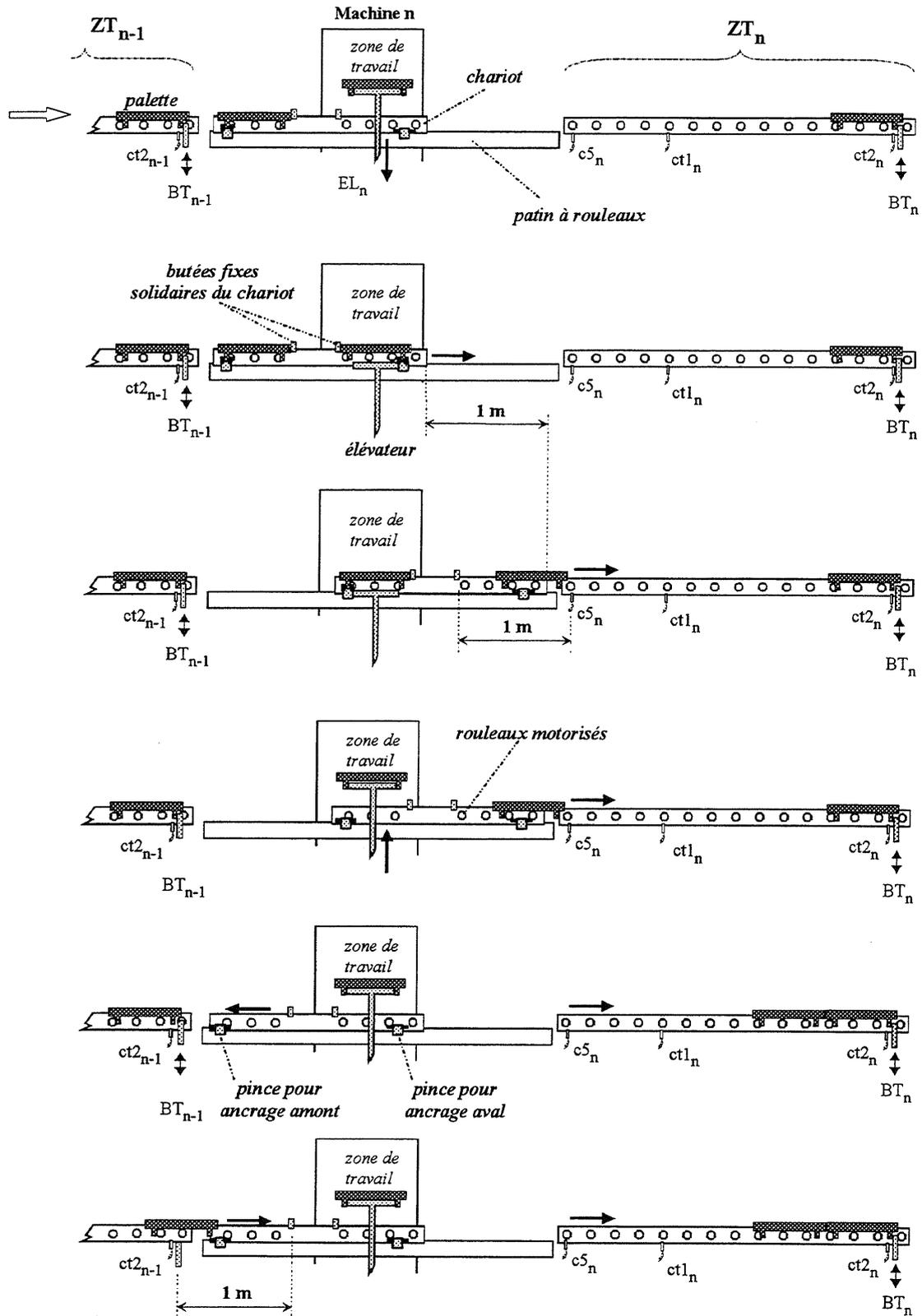
SCHÉMA DE PRINCIPE DE L'INJECTEUR LINÉAIRE



Remarques importantes :

- la table est constituée du chariot maître et du chariot esclave synchronisés par la commande,
 - l'élévateur est fixé au bâti et les ancrages amont et aval sont solidaires des chariots,
 - les rouleaux motorisés des chariots amènent et évacuent chaque palette de la table (1 m en 6s).
- Les éléments suivants ne sont pas représentés :
- les capteurs associés aux systèmes d'ancrage des palettes et à l'élévateur,
 - la liaison permettant la transmission du mouvement aux rouleaux du chariot esclave,
 - l'outillage et les constituants moteur supportés par la palette,
 - les convoyeurs des zones ZT_n et ZT_{n-r}.

PHASES DE FONCTIONNEMENT DE L'INJECTEUR LINÉAIRE



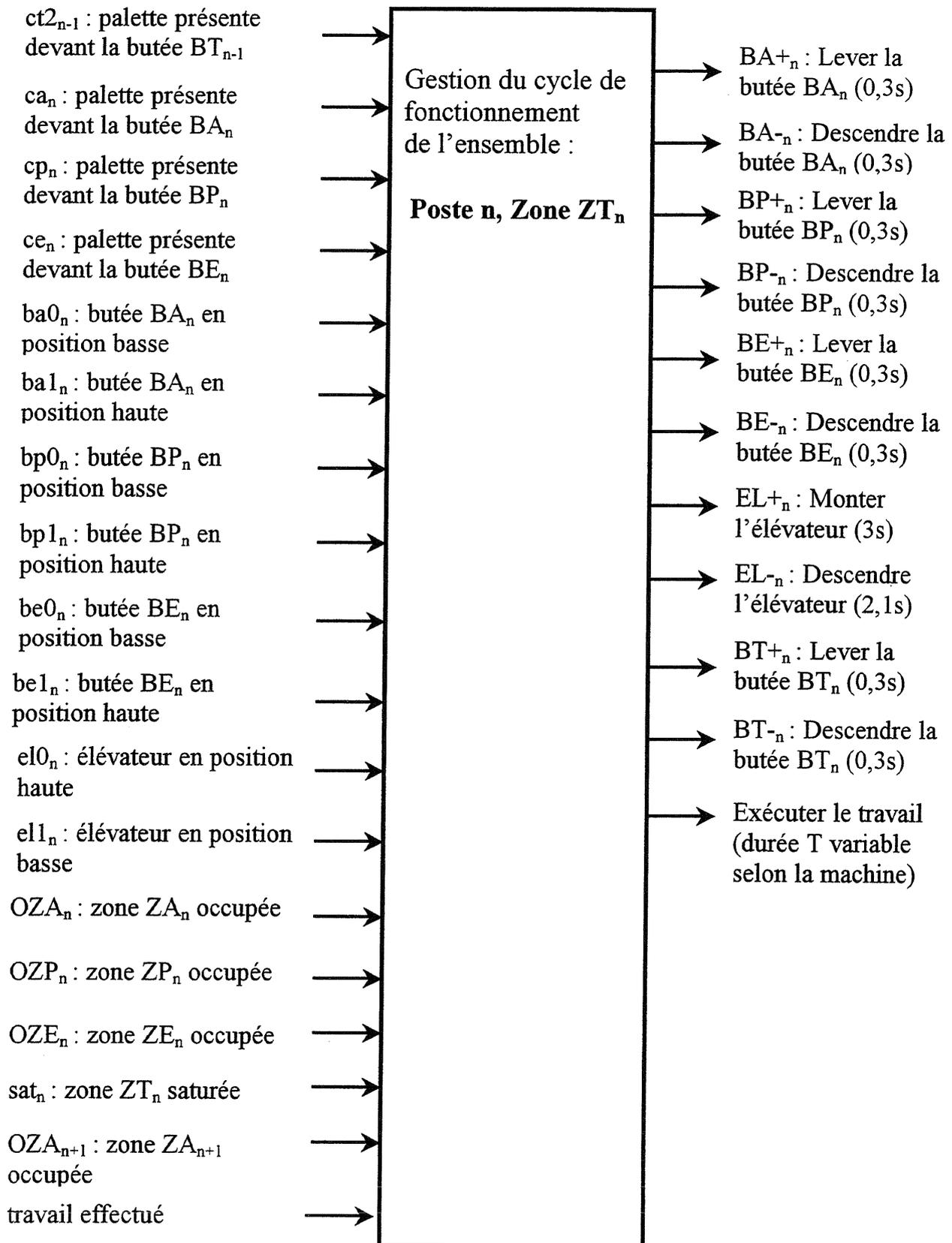
Remarques :

- le capteur $c5_n$ détecte le passage de l'arrière de la palette,
- on considère que chaque palette met 6s pour parcourir 1m (lorsqu'elle est entraînée par des rouleaux) même dans le cas où elle serait libérée par une butée,
- les détecteurs de fin de course des butées mobiles et des élévateurs ne sont pas représentés.

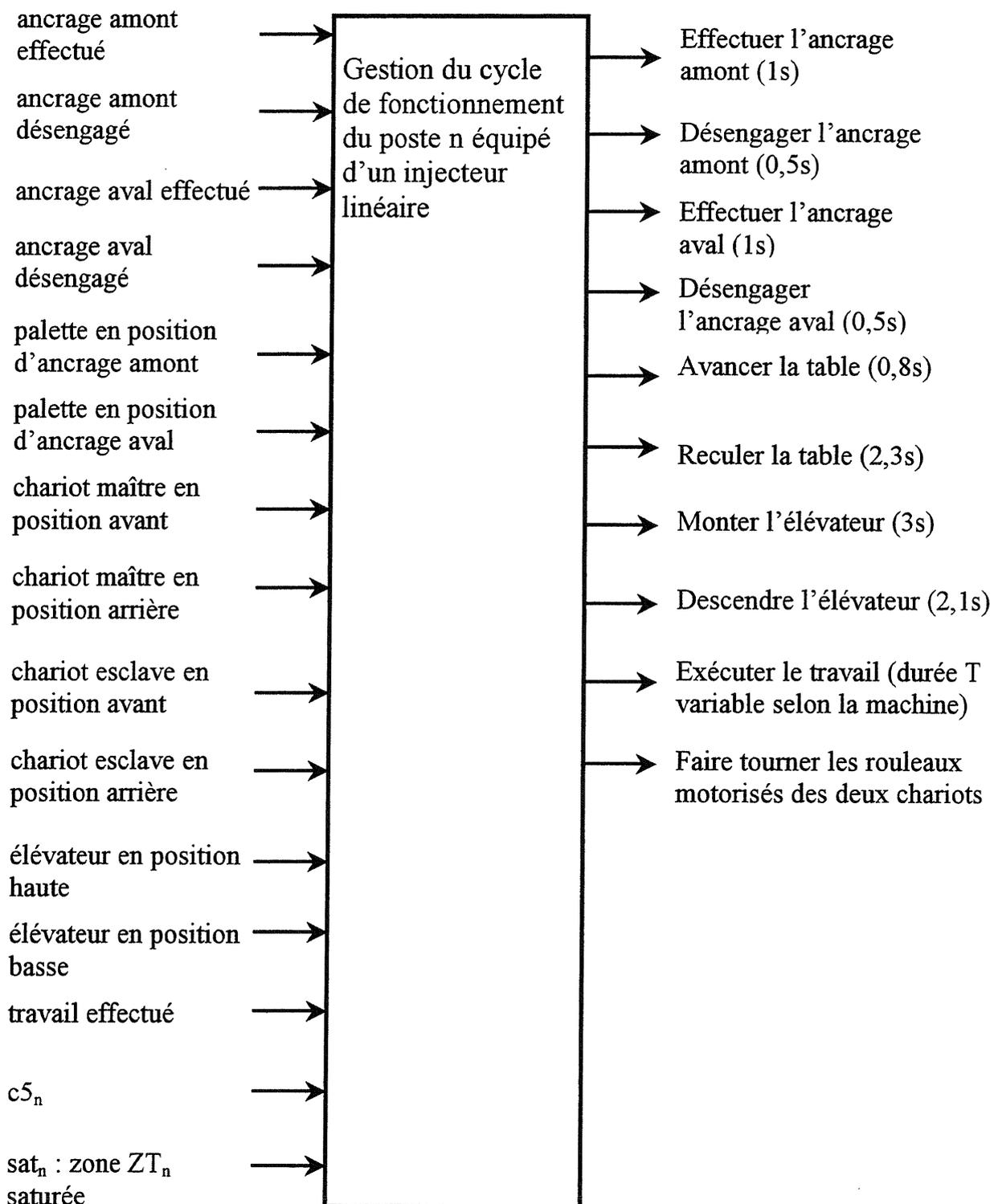
Document ressource : DR2-2

Tournez la page S.V.P.

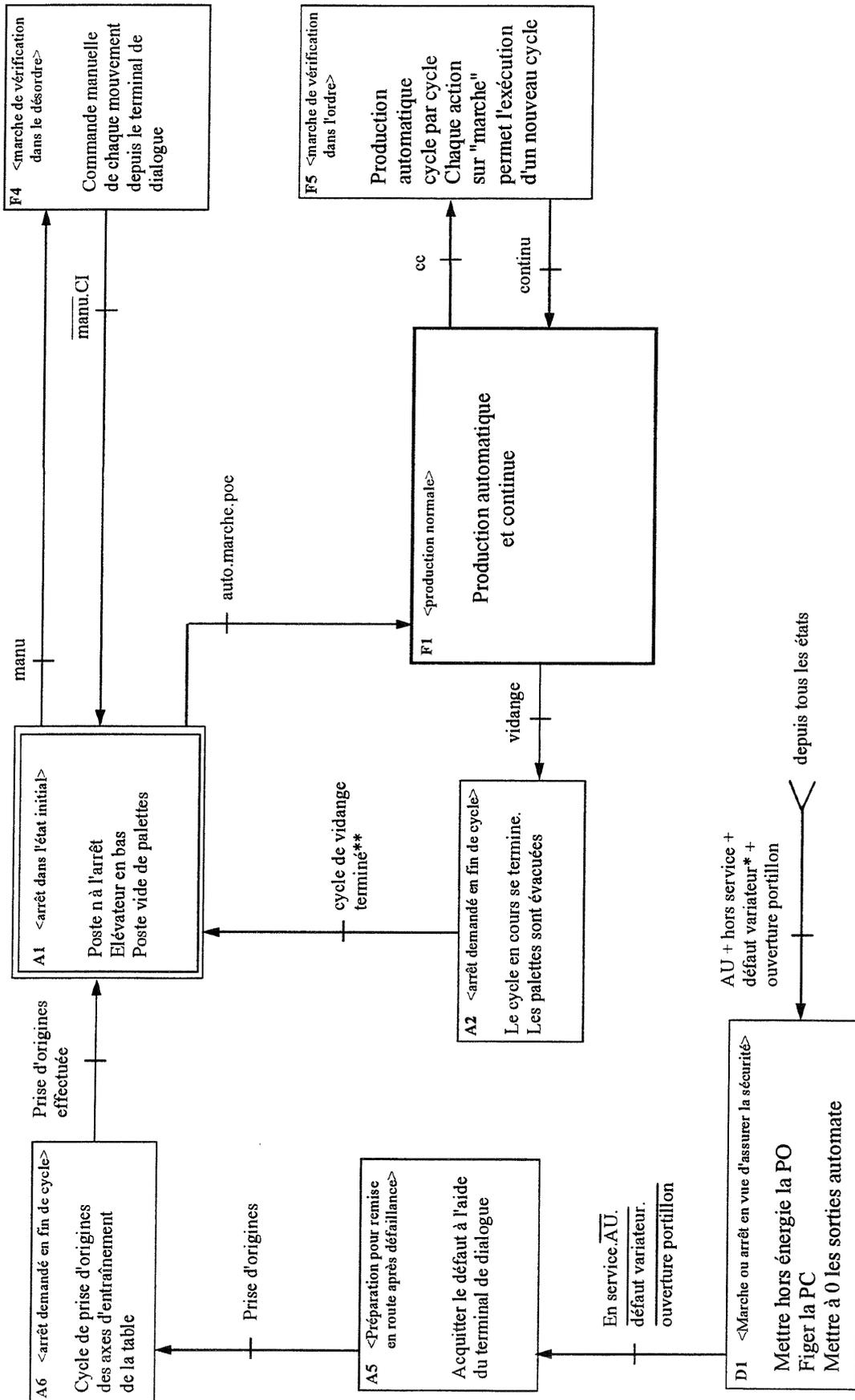
**BOÎTE FONCTIONNELLE DE CARACTÉRISATION DES E/S
DE LA COMMANDE LOGIQUE DE L'ENSEMBLE :
POSTE n (équipé d'un convoyeur), ZONE TAMPON ZT_n**



**BOÎTE FONCTIONNELLE DE CARACTÉRISATION DES E/S
DE LA COMMANDE LOGIQUE DU POSTE n
ÉQUIPÉ D'UN INJECTEUR LINÉAIRE**



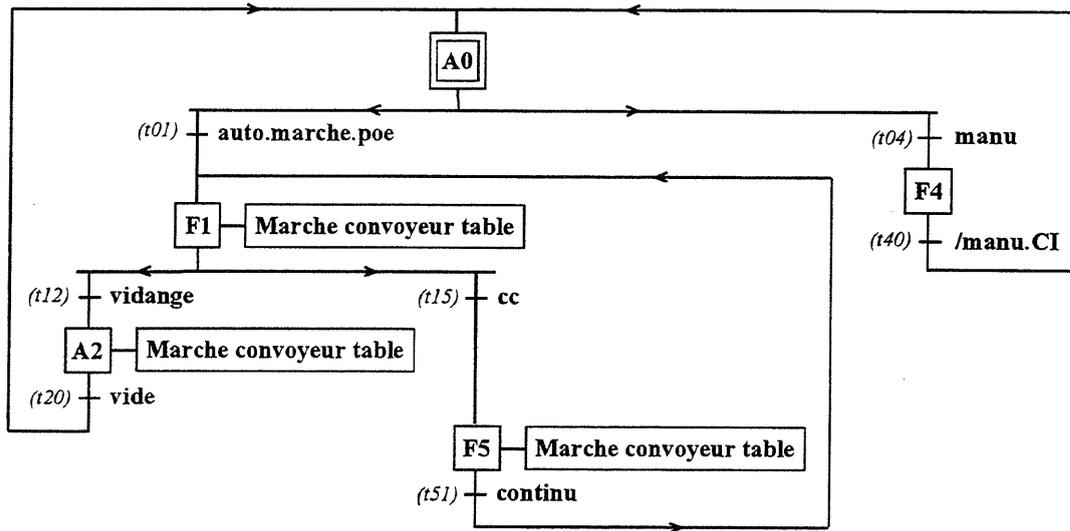
EXTRAIT DE GEMMA DU POSTE n EQUIPÉ D'UN INJECTEUR LINÉAIRE



EXTRAIT DE GEMMA DU POSTE n
EQUIPE D'UN INJECTEUR LINEAIRE

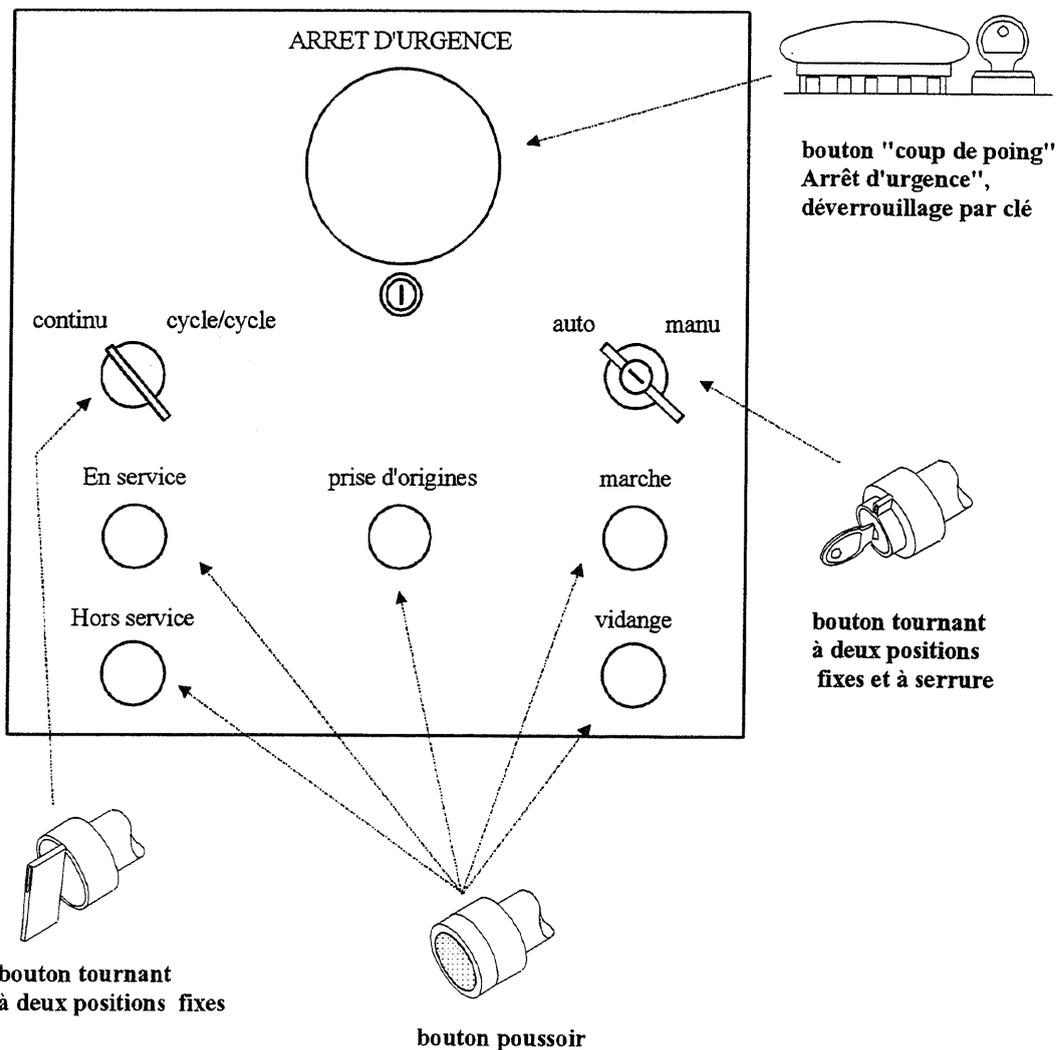
*défaut variateur = défaut variateur 1 + défaut variateur 2
**cycle de vidange terminé = vide

GRAFCET GMMA à vérifier



CI = conditions initiales caractérisant le retour en référence de la partie opérative
 cc = cycle/cycle

EXTRAIT du PUPITRE OPERATEUR



Document ressource DR6

Tournez la page S.V.P.

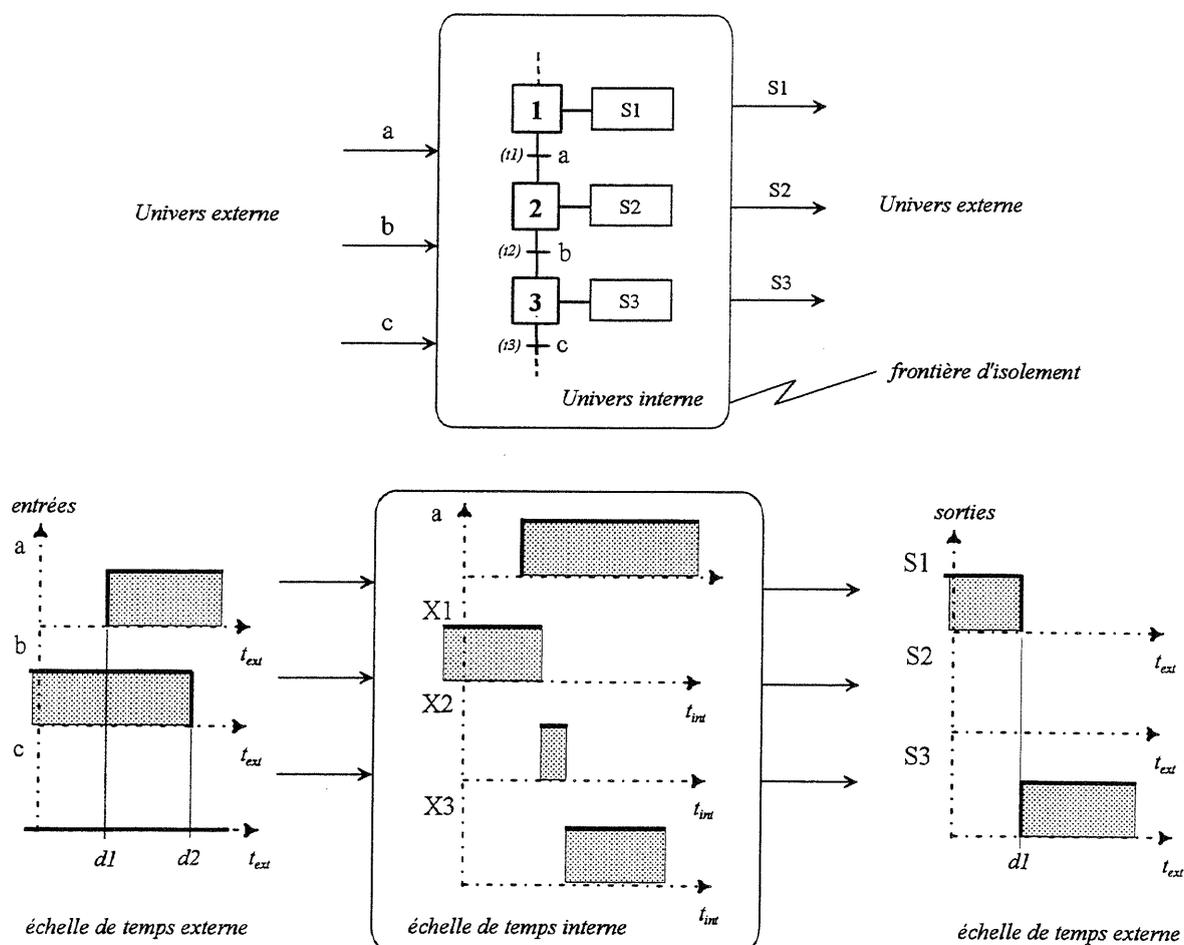
FRONTIÈRE D'ISOLEMENT ET FRONTIÈRE TEMPORELLE

(selon UTE C 03-191)

L'isolement d'un système décrit par Grafset établit une frontière de description qui définit une partition de l'univers en un interne et un externe au modèle. Cette frontière d'isolement correspond également à la frontière temporelle entre une échelle de temps interne et une échelle de temps externe au modèle. Ces deux échelles de temps sont sans commune mesure.

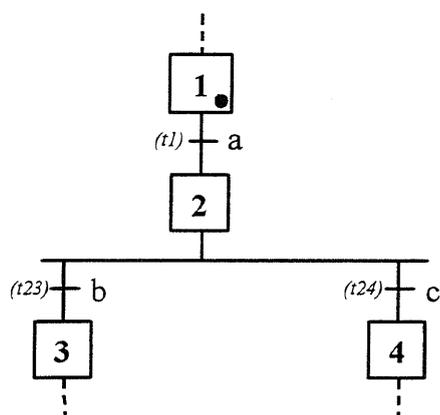
A l'échelle du temps externe, tout changement d'état des entrées est pris en compte par le modèle, dès son apparition. La totalité des conséquences de cet événement sur le modèle est déterminée à temps nul. Depuis l'extérieur du modèle, les événements d'entrée et les états des sorties qui en résultent sont vus à la même date.

A l'échelle de temps interne, la durée séparant l'instant où une transition est franchissable de l'instant où elle est franchie (appelée aussi durée d'évolution) est aussi petite qu'il est nécessaire, mais non nulle. En conséquence, la durée minimale de la durée d'une étape ne sera jamais nulle.



GRAPHE DES SITUATIONS ACCESSIBLES ET ÉVOLUTIONS DES ENTRÉES

Génération d'un arbre des situations accessibles à l'échelle de temps interne depuis une situation stable donnée :



Grafcet support de l'illustration

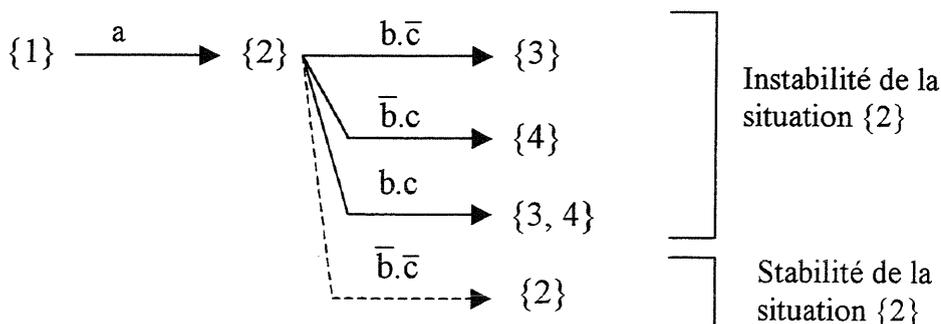
{a, b, c} sont les trois entrées de ce grafcet.
Les 24 changements de valeurs possibles de l'ensemble des entrées sont les suivantes :

$\uparrow a.\bar{b}.\bar{c}$	$\bar{a}.\uparrow b.\bar{c}$	$\bar{a}.b.\uparrow c$
$\uparrow a.b.\bar{c}$	$a.\uparrow b.\bar{c}$	$a.\bar{b}.\uparrow c$
$\uparrow a.b.c$	$a.\uparrow b.c$	$a.b.\uparrow c$
$\uparrow a.\bar{b}.c$	$\bar{a}.\uparrow b.c$	$\bar{a}.b.\uparrow c$
$\downarrow a.\bar{b}.\bar{c}$	$\bar{a}.\downarrow b.\bar{c}$	$\bar{a}.b.\downarrow c$
$\downarrow a.b.\bar{c}$	$a.\downarrow b.\bar{c}$	$a.\bar{b}.\downarrow c$
$\downarrow a.b.c$	$a.\downarrow b.c$	$a.b.\downarrow c$
$\downarrow a.\bar{b}.c$	$\bar{a}.\downarrow b.c$	$\bar{a}.b.\downarrow c$

Dans le cas de l'étude de la situation {2} du grafcet ci-dessus, l'étape stable 1 étant active :

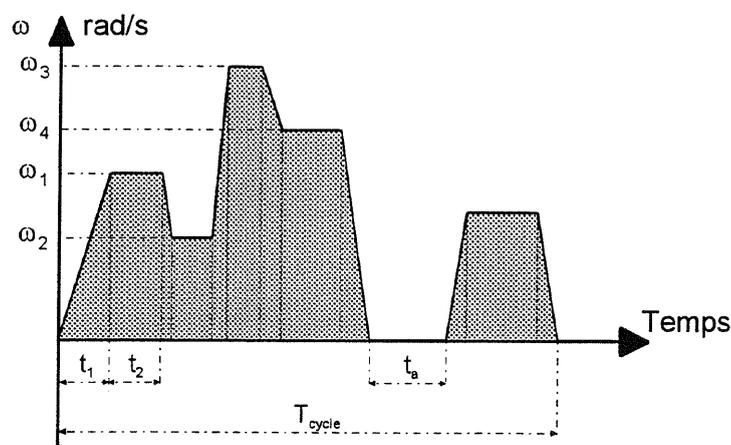
L'ensemble des variations des entrées permettant	
- d'atteindre la situation {2} depuis la situation stable {1} est	$\uparrow a$
- de franchir la transition t23 depuis la situation {2} est	$\uparrow a.b$ (nécessaire) $\uparrow a.b.\bar{c}$ (nécessaire et suffisant)
- de franchir la transition t24 depuis la situation {2} est	$\uparrow a.c$ (nécessaire) $\uparrow a.\bar{b}.c$ (nécessaire et suffisant)
- de franchir simultanément les transitions t23 et t24 depuis la situation {2} est	$\uparrow a.b.c$
- d'aboutir à une stabilité de la situation {2} est	$\uparrow a.\bar{b}.\bar{c}$

Arbre décrivant l'évolution à l'échelle de temps interne depuis la situation {1}



CHOIX D'UN MOTEUR EN FONCTION D'UN CYCLE RAPIDE ÉQUIVALENCE THERMIQUE

Les tâches effectuées par un actionneur dans un processus industriel le conduisent rarement à un fonctionnement de régime permanent au point nominal ; leur répétition liée aux cadences des cycles de production l'amène à des alternances de surcharge (mouvements rapides d'accélération et de décélération) et de charge réduite, voire même d'arrêt. Le courant d'induit peut alors être supérieur à sa valeur nominale pendant un temps de marche donné.



Exemple de cycle de fonctionnement

Le cycle de fonctionnement comporte des phases transitoires d'accélération et de décélération qui nécessitent un surcouple, des phases en régime permanent où l'actionneur doit juste vaincre les efforts résistants ainsi que des périodes de repos (vitesse nulle, courant nul) où l'actionneur peut refroidir. Pour prendre en compte les différentes phases du cycle, les constructeurs préconisent alors de calculer le couple équivalent thermique résultant ou couple efficace C_{eqth} . Ce dernier donne une image plus réaliste du couple que le moteur à réellement à fournir.

A chaque phase i correspond un couple C_i (couple nécessaire pendant le temps t_i pour chaque phase du cycle de fonctionnement), un temps t_i et une vitesse moyenne ω_i (vitesse moyenne pour chaque phase de fonctionnement). Le couple équivalent thermique et la vitesse moyenne au cours du cycle sont donnés par les formules suivantes :

$$C_{eqth} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n C_i^2 \cdot t_i}{T_{cycle}}} \quad \text{avec } T_{cycle} = \sum_{i=1}^n t_i \quad (1)$$

$$\omega_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n |\omega_i| \cdot t_i}{T_{cycle}} \quad (2)$$

Nota : La durée t_i des phases dont le couple C_i est important doit être faible devant la constante de temps thermique du moteur considéré. A défaut, cette méthode ne peut s'appliquer.

CHOIX DES MOTOVARIATEURS AUTOSYNCHRONES SMV UM + UMV 4301 (DOCUMENTATION LEROY SOMER)

Performances motovariateurs
Sélection pour fonctionnement en classe H (avec r ésolveur seulement)
 ΔT de 125 °C à 40 °C ambiant

Type moteur	Caractéristiques générales			Performances									
	Couple permanent calage N.m	Inertie standard Kg.m ² .10 ⁻⁴	Masse moteur kg	2000 min ⁻¹			3000 min ⁻¹			4000 min ⁻¹			
				Couple nominal N.m	UMV 4301 associé	Couple crête N.m	Couple nominal N.m	UMV 4301 associé	Couple crête N.m	Couple nominal N.m	UMV 4301 associé	Couple crête N.m	
SMV 75 UM	A	1,3	0,6	3	1,2	1,5T	3,9	1,2	1,5T	3,9	1,1	1,5T	3,9
SMV 75 UM	B	2,3	1	3,7	2,1	1,5T	6,9	2,1	1,5T 2T	5,9 6,9	2	1,5T 2,5T	4,4 6,9
SMV 75 UM	C	3,1	1,5	4,4	2,9	1,5T	9,3	2,8	1,5T 2,5T	5,9 9,3	2,4	2T 3,5T	5,9 9,3
SMV 75 UM	D	4	1,9	5,1	3,7	1,5T 2,5T	8,8 12,0	3,6	2T 3,5T	7,8 12,0	3	2,5T 5,5T	8 12
SMV 95 UM	A	2,6	1,4	5	2,3	1,5T	7,8	2,3	1,5T 2T	5,9 7,8	2	2T 2,5T	5,9 7,8
SMV 95 UM	B	4,4	2,5	6,1	4,1	1,5T 2,5T	8,8 13,2	4	2T 3,5T	7,8 13,2	3,1	2,5T 5,5T	8 13,2
SMV 95 UM	C	6,1	3,6	7,2	5,6	2T 3,5T	11,8 18,3	5,5	2,5T 5,5T	10,6 18,3	4,1	5,5T	18,3
SMV 95 UM	D	7,8	4,7	8,3	7,2	2,5T 3,5T	16,0 23,4	7	3,5T 5,5T	15,7 23,4	5	8T	23,4
SMV 95 UM	E	9,4	5,8	9,5	8,7	3,5T 5,5T	23,5 28,2	8,5	8T	33,6 28,2	5,9	8T 11T	25,2 28,2
SMV 115 UM	A	4,6	3,2	6,5	4,3	1,5T 2,5T	8,8 13,8	3,8	2,5T 3,5T	10,6 13,8	3,2	2,5T 5,5T	8 13,8
SMV 115 UM	B	7,6	5,5	8,2	7	2,5T 3,5T	16,0 22,8	6,3	3,5T 5,5T	15,7 22,8	5,1	8T	22,8
SMV 115 UM	C	10,8	7,8	9,9	9,9	3,5T 5,5T	18,9 32,4	8,9	8T	33,6 32,4	7	8T 11T	25,2 32,4
SMV 115 UM	D	13,7	10	11,6	12,5	5,5T 8T	39,8 41,1	11,2	8T 11T	33,6 41,1	8,1	8T 16T	25,2 41,1
SMV 115 UM	E	16,2	12,3	13,2	14,8	8T	39,8 48,6	13,2	8T 16T	33,6 48,6	8,9	11T 22T	33,6 48,6
SMV 142 UM	A	7,3	7,8	10,9	6,8	2,5T 3,5T	16,0 21,9	6,3	3,5T 5,5T	15,7 21,9	4,2	5,5T 8T	20,2 21,9
SMV 142 UM	B	12,5	14,1	13,2	12	3,5T 5,5T	23,5 37,5	10,5	5,5T 11T	26,6 37,5	8,2	8T 16T	25,2 37,5
SMV 142 UM	C	17,7	20,5	15,5	17	5,5T 11T	39,8 53,1	14,2	8T 16T	33,6 53,1	10,4	11T 22T	33,6 53,1
SMV 142 UM	D	22,9	28,8	17,8	21,4	8T 11T	50,4 67,2	18,4	11T 16T	44,8 68,7	12,5	16T 22T	52,8 68,7
SMV 142 UM	E	27	33,1	20,5	24,9	11T 16T	50,4 81,0	21	16T 22T	70,1 81,0	14,2	22T 27T	71,4 81
SMV 190 UM	A	21,8	44,8	25,9	16,5	5,5T 11T	39,9 59,1	-	-	-	-	-	-
SMV 190 UM	B	38,8	81,6	33,2	32	16T 22T	105,0 111,5	-	-	-	-	-	-
SMV 190 UM	C	51,9	118,4	40,1	39,8	16T 27T	105,0 153,2	-	-	-	-	-	-
SMV 190 UM	D	70,8	155,1	47,8	46,6	27T 40T	142,8 207,6	-	-	-	-	-	-

Conditions d'essais

Les caractéristiques électriques indiquées dans les tableaux précédents sont garanties à $\pm 10\%$ sous les conditions suivantes :

- Tension réseau 400 V, 3 phases.
- Fréquence de découpage : 12 kHz pour SMV UM 75 à 115,
6 kHz pour SMV UM 142,
3 kHz pour SMV UM 190.
- Retour par codeur incrémental (classe F) ou résolveur (classe H).
- Moteur monté horizontalement avec connecteur sur le dessus, sur plaque en aluminium : 250 mm x 250 mm x 15 mm pour SMV UM 75 et 95,
350 mm x 350 mm x 20 mm pour SMV UM 115 et 142,
500 mm x 500 mm x 20 mm pour SMV UM 190.
- Pour un moteur horizontal, connecteur sur le côté, appliquer un décalage de 5 %.
- Pour un moteur vertical, appliquer un décalage de 7 %.