

SESSION DE 1999**concours externe
de recrutement de professeurs agrégés****section : génie mécanique**

composition d'automatismes industriels

Durée : 6 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris programmable et alphanumérique - à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 86-228 du 28 juillet 1986.

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 :

- 1 page de formulaire au verso de cette page ;
- 4 pages de présentation du sujet (de 2 à 5) et 14 pages d'énoncé (de 6 à 19) comportant 3 parties ;
- 1 annexe de 7 pages aide-mémoire pour la programmation par réseaux à contacts ;
- 4 pages avec des grilles GEMMA pour les réponses.

Conseil préalable important pour les candidats :

Le présent sujet est volumineux car il recouvre la plupart des aspects de l'étude de la commande d'une machine industrielle. Aussi, le barème de correction tiendra compte du fait que toutes les questions ne pourront être traitées à l'intérieur du temps imparti que par des candidats particulièrement expérimentés.

Pour aider le candidat à montrer au mieux ses connaissances dans le domaine des automatismes industriels, les trois parties ont été rendues indépendantes, de même que la majorité des questions au sein de chacune d'entre elles. Elles peuvent donc être traitées dans un ordre quelconque, en commençant par celles qui sembleront les plus abordables par chacun des candidats, mais, bien entendu, après avoir lu la totalité du sujet.

Les candidats sont par ailleurs 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.

Les réponses sont à rendre sur des copies séparées pour chacune des parties.

Tournez la page S.V.P.

FORMULAIRE

Trigonométrie :

$$\cos(a+b) = \cos(a) \cos(b) - \sin(a) \sin(b)$$

$$\cos(a-b) = \cos(a) \cos(b) + \sin(a) \sin(b)$$

$$\sin(a+b) = \sin(a) \cos(b) + \cos(a) \sin(b)$$

$$\sin(a-b) = \sin(a) \cos(b) - \cos(a) \sin(b)$$

$$\sin(a+b) = \sin(a) \cos(b) + \cos(a) \sin(b)$$

$$\cos(a) \cos(b) = \frac{\cos(a+b) + \cos(a-b)}{2}$$

$$\sin(a) \sin(b) = \frac{\cos(a-b) - \cos(a+b)}{2}$$

$$\sin(a) \cos(b) = \frac{\sin(a+b) + \sin(a-b)}{2}$$

$$\sin^2(a) = \frac{1 - \cos(2a)}{2}$$

$$\cos^2(a) = \frac{1 + \cos(2a)}{2}$$

Loi de Laplace :

$$d\vec{F} = i d\vec{l} \wedge \vec{B}$$

Formule de Faraday :

$$de = \vec{B} \wedge d\vec{l} \cdot \vec{v}$$

Loi de Lenz :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Loi de Biot et Savard :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{id\vec{l} \wedge \vec{r}}{r^3}$$

Quelques transformées de Laplace des systèmes du second ordre :

$$\frac{p}{(p+a)^2} \leftrightarrow (1-at)e^{-at}$$

$$\frac{1}{(p+a)^2} \leftrightarrow te^{-at}$$

$$\frac{1}{p(p+a)^2} \leftrightarrow \frac{(e^{at} - 1 - at)e^{-at}}{a^2}$$

$$\frac{p}{(p+a)(p+b)} \leftrightarrow \frac{ae^{-at} - be^{-bt}}{a-b}$$

$$\frac{1}{(p+a)(p+b)} \leftrightarrow \frac{e^{-bt} - e^{-at}}{a-b}$$

$$\frac{1}{p(p+a)(p+b)} \leftrightarrow \frac{a(1-e^{-bt}) - b(1-e^{-at})}{ab(a-b)}$$

$$\frac{p\omega}{(p+a)^2 + \omega^2} \leftrightarrow (\omega \cos(\omega t) - a \sin(\omega t)) e^{-at}$$

$$\frac{\omega}{(p+a)^2 + \omega^2} \leftrightarrow \sin(\omega t) e^{-at}$$

$$\frac{\omega}{p((p+a)^2 + \omega^2)} \leftrightarrow \frac{\omega(e^{at} - \cos(\omega t)) - a \sin(\omega t)}{a^2 + \omega^2} e^{-at}$$

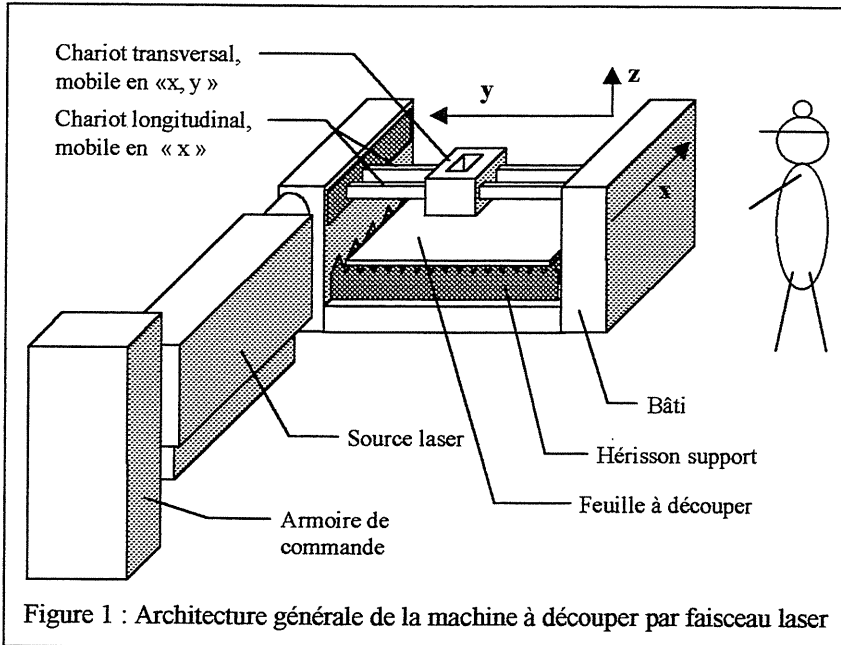
**Étude de la commande d'une machine
à découper à grande vitesse,
par faisceau laser**

Présentation du sujet

Cette machine est destinée à découper des tôles d'acier et des feuilles de tout autre matériau absorbant la lumière. Le flux lumineux émis par la source laser transporte une puissance élevée, de 1 à 2 kW. La cohérence de la lumière émise par le laser permet de concentrer cette puissance sur un faisceau de faible diamètre, de l'ordre de 0,2 mm. Ainsi, le procédé de découpe par laser est apte à réaliser des découpes très fines, avec des vitesses d'avance pouvant atteindre plusieurs mètres par seconde dans les matériaux minces.

A Description globale de la machine

L'architecture générale de la machine est schématisée en perspective cavalière sur la figure 1. La silhouette d'un opérateur donne une idée des dimensions des principaux constituants.



On distingue, en partant de la gauche :

- l'armoire de commande qui contient les alimentations et les cartes électroniques de commande, ainsi qu'un automate programmable et une commande numérique.
- L'armoire de protection de la source laser, raccordée au bâti par un tube de protection du faisceau. Elle contient outre le laser, la source d'excitation hyperfréquence, une réserve de gaz et une pompe à vide.
- Le bâti qui supporte des chariots à mouvements croisés « x, y » et un hérisson sur lequel repose la tôle que l'on veut découper.

Le hérisson soutient la tôle en des points suffisamment rapprochés pour qu'elle ne se déforme pas. Sa structure en dents de scie lui évite d'être endommagé trop rapidement par le faisceau laser, lorsque celui-ci traverse le matériau qu'il est en train de découper.

Sur cette figure, le dispositif de chargement et le déchargement manuel de la machine n'est pas représenté. C'est un chariot sur rail qui supporte le hérisson et se dégage par l'arrière du bâti. N'est pas non plus représentée la goulotte d'évacuation située sous la machine et qui récupère les pièces ou les chutes découpées de petite taille, lorsqu'elles tombent entre les dents du hérisson.

B La découpe laser en 2D (Matériaux en feuille)

La découpe laser des matériaux en feuille implique de déplacer relativement l'un à l'autre la surface du matériau et le point où est focalisé le faisceau laser. Pour tirer le meilleur parti des qualités implicites de la découpe par laser, le parcours de la trajectoire de découpe doit être effectué avec précision et à vitesse constante. Il faut aussi

que le faisceau incident arrive perpendiculairement à la surface du matériau car, s'il était oblique, la profondeur apparente à traverser ainsi que les pertes de rayonnement par réflexion augmenteraient. Pour les feuilles planes, le mouvement relatif s'effectue en 2 dimensions (x, y), parallèlement à la surface du matériau. La direction (z+) représente alors la normale extérieure à la surface à couper et le faisceau arrive dans la direction (z-).

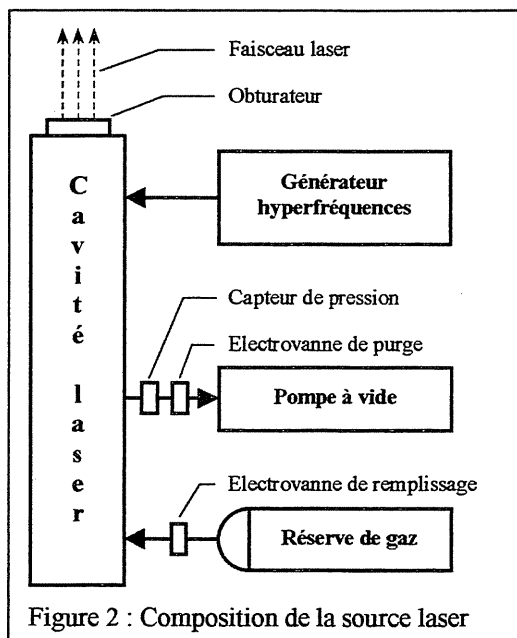
C Table de découpe à chariots croisés

La source laser est volumineuse, lourde et fragile. Les feuilles de matériaux sont de grandes dimensions et nécessitent d'être maintenues sur un support plan lourd et volumineux. Il serait donc difficile de déplacer rapidement l'un ou l'autre pour générer le mouvement relatif. Il est beaucoup plus facile de déplacer deux miroirs mobiles de faible dimension (\varnothing 60 mm), portés par des chariots à mouvements croisés x, y.

Le **chariot longitudinal**, mobile selon (x), enjambe la plate-forme sur laquelle repose la feuille de matériau à découper (Fig. 1). Il est constitué par deux poutres creuses parallèles et solidaires, assemblées à leurs extrémités sur des platines mobiles. Ces platines sont équipées de patins à billes, guidés sur des rails solidaires du bâti. Deux paires de patins placés sous les extrémités des platines assurent à la fois le guidage en translation selon (x) et le soutien du poids des chariots et de leurs équipements. L'entraînement en translation est assuré par deux moteurs linéaires, agissant simultanément sur les deux platines. Cette solution permet de répartir les efforts de part et d'autre des poutres, pour limiter les effets de mise en travers. La mesure des déplacements est assurée par une règle graduée et un capteur optique sans contact, placés au plus près d'un rail de guidage. La course disponible pour le mouvement longitudinal est de 2 m.

Le **chariot transversal**, mobile selon (x, y), se déplace le long des poutres, selon (y) et avec les poutres, selon (x). Il est maintenu par deux paires de patins à billes guidés par deux rails solidaires chacun de l'une des poutres. L'entraînement du mouvement transversal (y) est réalisé par un moteur linéaire situé entre les rails de guidage. La mesure des déplacements est assurée par une règle et un capteur optique sans contact. La course disponible pour le mouvement transversal est de 1,5 m.

D Générateur et dispositif d'acheminement du flux laser



D.1 Source laser (Fig. 2)

Le faisceau est fourni par un laser à gaz (CO_2 + additifs), à basse pression, enfermé dans un carter étanche et refroidi par circulation d'eau, de dimensions voisines de 0,3 x 0,3 x 1,7 m. La source est constituée par une cavité de 1,5 m de long et 5 cm de diamètre. Cette cavité est délimitée, aux extrémités, par deux miroirs placés vis à vis et se renvoyant mutuellement le faisceau. La cavité est entourée par des électrodes soumises à une tension électrique modulée en hyperfréquence. L'excitation par hyperfréquences place les molécules de gaz dans un état métastable de niveau d'énergie plus élevé que l'état de repos (phénomène de pompage optique). Lorsqu'une molécule retourne à son état de repos, elle émet un photon (grain de lumière ou train d'onde). Le passage d'un photon à proximité d'une molécule excitée déstabilise celle-ci et provoque son émission en synchronisme avec le photon incident. Ainsi, après un temps de pompage de quelques millièmes de seconde, un faisceau de lumière cohérente très intense se développe, par résonance entre les deux miroirs.

Le miroir frontal est en fait un obturateur à deux états, l'un réfléchissant et l'autre semi-réfléchissant. Dès que l'intensité du faisceau interne à la cavité atteint un niveau suffisant, l'obturateur est commuté dans l'état semi-réfléchissant et laisse sortir une part de l'intensité lumineuse.

Le flux laser ainsi délivré présente une caractéristique remarquable de cohérence, se traduisant notamment par un faisceau quasi rigoureusement parallèle. Il peut donc se propager sur une grande distance sans altération. Il peut également être facilement dévié par des miroirs plans et focalisé par un miroir parabolique, pour concentrer son énergie sur une surface très petite.

D.2 Conduite et focalisation du faisceau

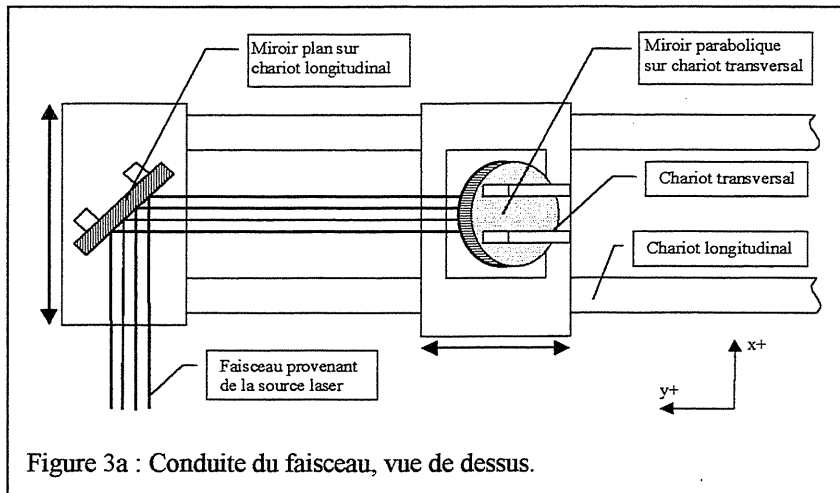


Figure 3a : Conduite du faisceau, vue de dessus.

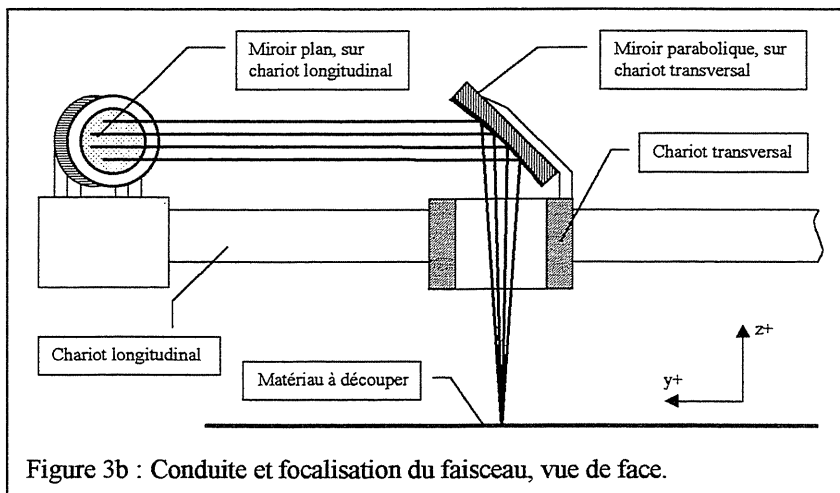


Figure 3b : Conduite et focalisation du faisceau, vue de face.

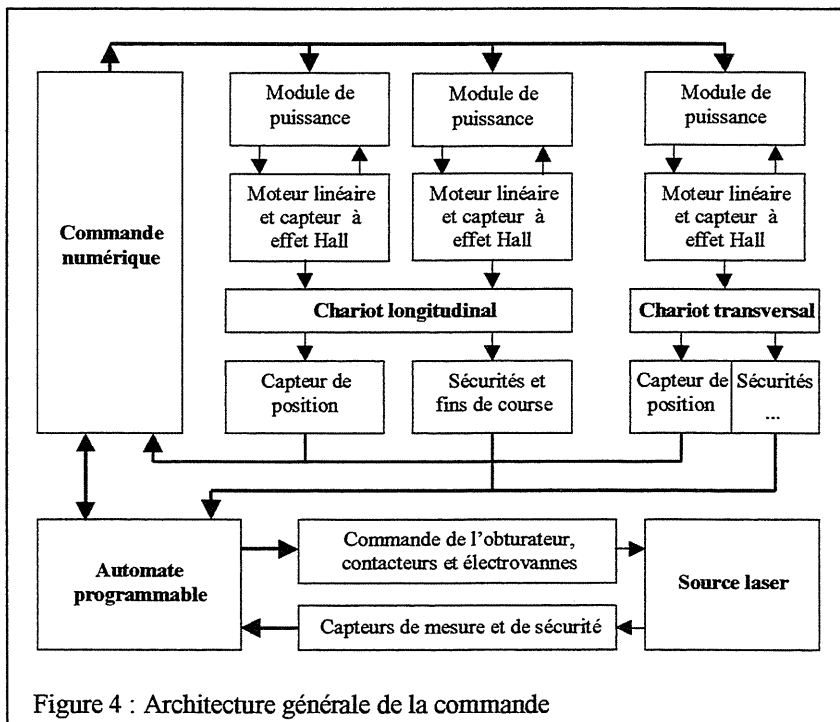


Figure 4 : Architecture générale de la commande

Le faisceau laser est émis par la source dans la direction (x+), il passe par un tube de protection partant de la source et rejoignant le bâti de la table à mouvements croisés (Fig. 1). La source est positionnée de telle manière que le faisceau arrive au dessus de la platine de guidage et motorisation située du côté (y+) du chariot longitudinal.

Le faisceau rencontre un miroir plan vertical, porté par la platine et orienté à 45 degrés vers le chariot longitudinal (Fig. 3a). Le faisceau est ainsi renvoyé dans la direction (y-), vers le chariot transversal. Lorsque le chariot longitudinal se déplace vers (x+) ou (x-), le miroir se déplace également et le faisceau est toujours renvoyé vers le chariot transversal.

Le faisceau rencontre ensuite un miroir parabolique porté par le chariot transversal et incliné à 45 degrés vers le bas (Fig. 3b) et dont le foyer est sur la surface du matériau à découper. Le faisceau est alors renvoyé vers le bas, à travers une ouverture aménagée dans le chariot transversal. Il est en même temps focalisé sur le point à découper. Lorsque le chariot transversal se déplace vers (y+) ou (y-), il déplace avec lui le miroir parabolique, en le maintenant dans l'axe du faisceau incident.

Ainsi, la conjugaison des mouvements des deux chariots permet de déplacer le point d'impact du faisceau laser sur toute la surface à découper.

E Gestion et coordination d'ensemble

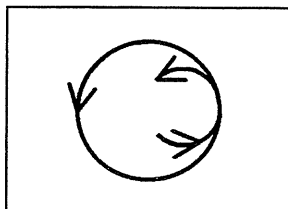
La gestion et la coordination d'ensemble de la machine sont assurées par un automate programmable associé à une commande numérique 2 axes à

haute performance et 3 modules électroniques de puissance spécifiques, commandant chacun un des moteurs

linéaires (Fig. 4). La commande numérique comprend le directeur de commande numérique et les cartes d'asservissement numérique des axes.

Pour obtenir de bons résultats, il est nécessaire de synchroniser très précisément la commande de la source laser, avec les mouvements de la tête de découpe. En particulier :

- Pour ne pas endommager les éléments situés en dessous de la machine, il ne faut jamais amorcer le faisceau laser alors que la tête est immobile, car celui-ci traverse très rapidement le matériau. Il faut de plus éviter d'amener le faisceau sur une zone déjà coupée ou sur une zone où il n'y a pas de matériau.
- Pendant l'amorçage et pendant la coupure du faisceau, la découpe n'est pas de bonne qualité, à la fois par le manque de puissance et par une défocalisation du faisceau qui se manifeste pendant les régimes transitoires.



Il faut donc réaliser des trajectoires de démarrage et d'arrêt coupant le matériau dans des zones qui seront des chutes et non des pièces utiles.

Par exemple, pour découper un trou circulaire, on réalisera la trajectoire ci-contre, comportant un arc d'attaque pour l'amorçage du faisceau et la montée en vitesse et un arc de dégagement, pour la coupure du faisceau et la décélération. Ces arcs entaillent tous deux l'intérieur de la surface de la pastille circulaire à enlever.

E.1 Asservissement de position – vitesse

Pendant la coupe, il est exclu de moduler la puissance du faisceau car cela influencerait sur la focalisation. Il faut donc progresser à vitesse constante le long de la trajectoire, quelles que soient ses variations de courbure. Ceci impose de maîtriser les erreurs de poursuite de trajectoire, en utilisant des techniques d'asservissement évoluées, prenant en compte simultanément les consignes de position et de vitesse. Ce type d'asservissement est mis en œuvre dans les directeurs de commande numérique apparus récemment sur le marché et conçus pour piloter des machines d'usinage à grande vitesse. Leur principe et leur application à la commande de la machine à découper seront étudiés dans la deuxième partie du problème.

E.2 Génération de trajectoire

La génération de trajectoire recouvre le fonctionnement de l'ensemble des éléments de la commande numérique, des actionneurs, des capteurs, et des organes mécaniques de guidage des mouvements croisés. La qualité du résultat obtenu, en termes de précision et rapidité d'exécution des découpes, dépend fortement du bon fonctionnement non seulement individuel, mais aussi collectif de ces éléments. Les fonctions impliquées dans la génération de trajectoire et exécutées en temps réel sont :

1. L'interprétation du programme de découpe pour enchaîner les éléments de trajectoire définis par des codes (code ISO) et des paramètres, tout en les synchronisant avec les commandes de la source laser.
2. Le calcul de la trajectoire, de la vitesse de parcours et de l'accélération, pour fournir des consignes de position et de vitesse coordonnées entre elles. Ce calcul se fait par interpolation polynomiale ou circulaire entre les points caractéristiques de la trajectoire définis par le programme de découpe.
3. L'acquisition et le traitement (filtrage) des informations délivrées par les capteurs de position, pour en tirer la mesure instantanée de la position et de la vitesse des chariots.
4. L'asservissement de position – vitesse des deux chariots, pour suivre au mieux la trajectoire, en calculant à cadence très élevée les efforts que doivent fournir les moteurs.
5. La répartition optimale des courants dans les bobines des moteurs, pour obtenir un effort indépendant de la position de travail des chariots et au prix d'un échauffement minimal des moteurs.

I Première partie : Etude d'un moteur linéaire et de son module de puissance

I.1 Composition d'un moteur linéaire

Les moteurs linéaires sont caractérisés par l'absence de transformation de mouvement et l'absence de contact mécanique. Il n'y a donc pas de frottement entre le secondaire (aimant : partie fixe) et le bloc moteur ou primaire (partie mobile). Les premiers moteurs linéaires, introduits dans les années 1950, étaient inadaptés à la commande des machines-outils car ils étaient encombrants et leur rendement était trop faible en régime transitoire ou à faible vitesse. Depuis quelques années, un nouveau type de moteur linéaire très compact et très efficace est apparu. Il est constitué d'un «barreau magnétique», contenant des aimants permanents alternés, qu'entoure un «bloc moteur » annulaire contenant des solénoïdes (Fig. 5). Deux capteurs à effet Hall sont placés dans un boîtier annulaire situé à l'extrémité du bloc moteur. Ils délivrent une information sur le positionnement relatif du bloc moteur par rapport aux aimants permanents. Cette information est utilisée par un module électronique de puissance, pour synchroniser les variations des courants délivrés aux solénoïdes avec le déplacement du bloc moteur.

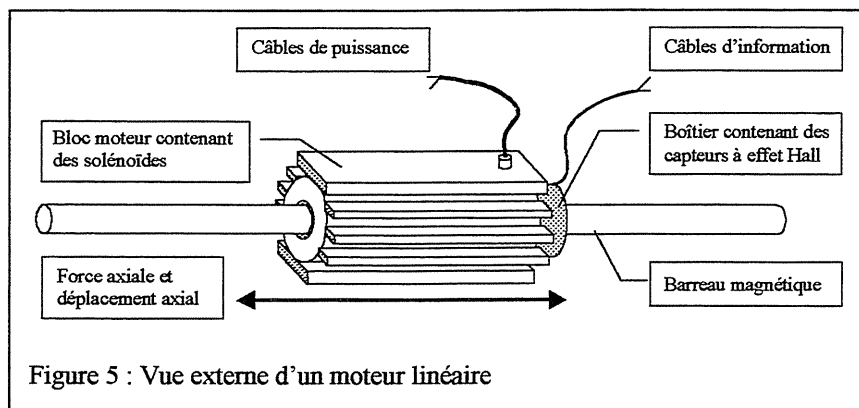


Figure 5 : Vue externe d'un moteur linéaire

Grâce à leur symétrie axiale, ces moteurs délivrent un effort purement axial, sans effort transversal ni couple parasite. Leurs dimensions dépendent de la course désirée et de la gamme d'efforts à développer.

Le barreau magnétique peut avoir un diamètre compris entre 2 et 5 cm. Sa longueur peut atteindre 2,5 m. Il doit être maintenu tendu par ses

deux extrémités, pour ne pas fléchir excessivement sous l'effet de son propre poids.

Le bloc moteur est entouré d'ailettes de refroidissement. Son diamètre intérieur laisse 1 à 2 mm de jeu autour du barreau magnétique. Il a une largeur et une hauteur comprises entre 5 et 12 cm. Sa longueur peut aller de 10 à 40 cm. Il doit être guidé en translation, pour se déplacer le long du barreau magnétique, sans le toucher, en demeurant coaxial avec celui-ci.

I.2 Description du barreau magnétique

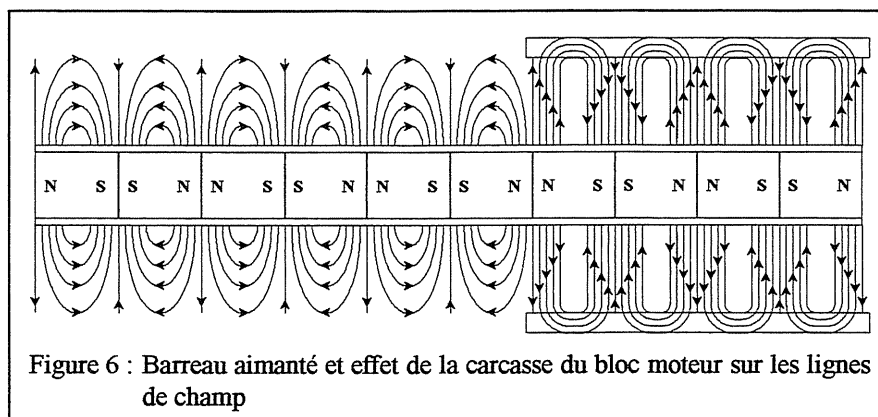


Figure 6 : Barreau aimanté et effet de la carcasse du bloc moteur sur les lignes de champ

Le barreau magnétique est constitué par un tube en acier inoxydable non magnétique, contenant des aimants cylindriques de polarité alternée, face nord contre face nord et face sud contre face sud. Les lignes de champ sont ainsi contraintes à sortir dans la direction radiale, au droit des pôles nord, pour entrer également dans la direction radiale, au droit des pôles

sud (Fig. 6). Sur la figure 6, on montre aussi l'effet de la carcasse magnétique qui entoure le bloc moteur sur les lignes de champ : elles se referment dans la carcasse magnétique, de telle sorte qu'elles sont pratiquement radiales dans tout l'espace situé entre le barreau et la carcasse.

1.3 Etude de la force engendrée par un solénoïde

Les solénoïdes sont placés entre le barreau et la carcasse. Ce sont des bobines de forme annulaire, comportant n_s spires jointives, enroulées sur plusieurs couches et plusieurs épaisseurs. Chaque spire peut être considérée comme quasiment plane. Les solénoïdes sont solidaires de la carcasse et d'axe commun avec la carcasse et le barreau. Une spire située à proximité d'un pôle nord voit un champ magnétique de forte intensité et dirigé vers l'extérieur, qui sera compté positivement. Lorsqu'elle est située à proximité d'un pôle sud, elle voit un champ de même intensité, mais dirigé vers le centre et compté négativement. Lorsque le bloc moteur se déplace le long de l'axe du barreau, la spire voit varier le champ de manière sensiblement sinusoïdale.

I.3.1 Force générée par une spire idéalisée

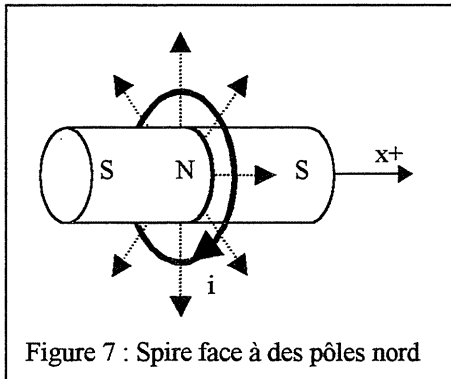


Figure 7 : Spire face à des pôles nord

La figure 7 représente une spire unique, placée en face d'une paire de pôles nord. Lorsqu'un élément de cette spire est parcouru par un courant, il développe une force perpendiculaire à la fois à la direction du courant et à celle du champ magnétique. Cette force est donc dirigée selon l'axe de la spire.

On note F , la force développée par la spire, comptée positivement dans le sens $(x+)$; r , le rayon de la spire; $B(r,x)$, le champ magnétique auquel est soumise la spire, qui dépend de son rayon et de sa position; i , le courant qui parcourt la spire, compté positivement dans le sens direct autour de l'axe $(x+)$.

Le champ induit par le courant est négligeable devant celui du barreau magnétique

Question 1 Montrer que la force axiale développée par la spire complète peut s'écrire :

$$(1) \quad F_{\text{spire}} = - 2 \pi r B(r,x) i$$

I.3.2 Force générée par un solénoïde complet.

Un solénoïde comporte n_s spires bobinées sur plusieurs couches, de telle sorte qu'elles se présentent toutes presque simultanément en face des pôles nord ou des pôles sud. Le champ magnétique coupé par chaque spire décroît en $1/r$ et varie de manière quasi sinusoïdale avec la position le long du barreau magnétique, avec une période spatiale « p ». Celle-ci est égale au pas des aimants, c'est-à-dire à la distance entre deux paires de pôles consécutives de même nature, soit encore à la somme des longueurs de deux aimants.

Question 2 Montrer que la force axiale développée par un solénoïde complet peut s'écrire :

$$(2) \quad F_{\text{soléno}} = - K_s i \cos(2 \pi x/p)$$

« K_s » étant une constante dont la valeur dépend des caractéristiques du solénoïde et du barreau magnétique.

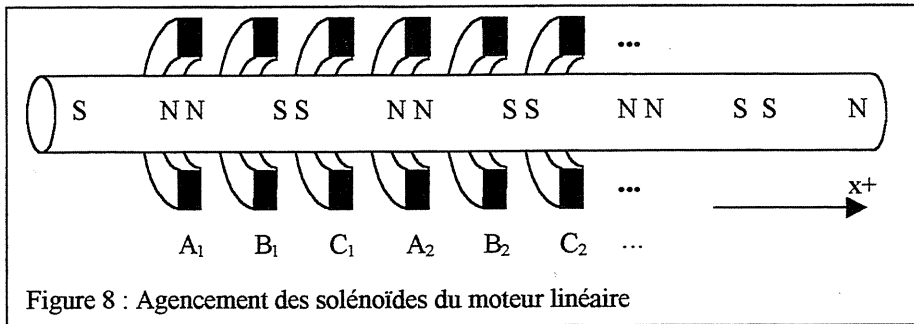
K_s est la « constante de force » d'un solénoïde se déplaçant le long du barreau magnétique. On admettra qu'elle ne dépend que de la construction du moteur, bien qu'en réalité, elle varie légèrement avec la température, ainsi que sous l'effet du champ induit par le courant circulant dans le solénoïde. Ces variations peuvent être négligées car elles sont aisément compensées par l'asservissement.

1.4 Introduction de trois séries de solénoïdes, pour générer des efforts élevés et indépendants de la position du bloc moteur sur le barreau

La force générée par un solénoïde unique s'annule lorsque celui-ci se trouve à mi-chemin entre les extrémités d'un aimant (cf. l'équation (2)). Afin de pouvoir générer malgré tout un effort quelle que soit la position du bloc moteur, il faut disposer de plusieurs solénoïdes décalés, coupant des champs qui ne s'annulent pas en même temps. La solution qui a été retenue, pour obtenir à la fois des efforts élevés et une bonne régularité de ces efforts, a été d'associer mécaniquement trois séries de n solénoïdes entrelacés et décalés d'un tiers de pas. La figure 8 montre la disposition des deux premiers solénoïdes de chaque série (les solénoïdes sont représentés en coupe et on n'en voit que la partie arrière).

A_1, A_2, \dots, A_n forment une première série de solénoïdes qui sont tous dans une situation similaire à celle du solénoïde A_1 , car ils sont espacés exactement d'un pas. Ils sont connectés en série. Ils sont donc parcourus par le même courant « i_A » et délivrent tous le même effort que A_1 . Il en est de même des séries de solénoïdes B et C.

Lorsque le bloc moteur est dans la position représentée figure 8, les solénoïdes A sont en situation favorable pour générer un effort, car ils sont en face d'une paire de pôles. Lorsque le bloc moteur se déplace vers la droite, ce sont successivement les solénoïdes B et C puis à nouveau A qui atteignent des situations favorables.



Question 3 Déterminer l'expression générale de la force totale générée par l'ensemble des trois familles de solénoïdes, en fonction de la position x et des trois courants i_A , i_B et i_C . Montrer que, si les courants sont tels que :

$$(3) \quad i_A = i \cos(\theta) ; \quad i_B = i \cos(\theta + 2\pi/3) ; \quad i_C = i \cos(\theta - 2\pi/3),$$

cette expression peut s'écrire :

$$(4) \quad F = -3/2 n K_s i \cos(2\pi x/p - \theta)$$

Montrer aussi que si la résistance électrique de chaque solénoïde est égale à R_s , la puissance totale dissipée par effet joule dans l'ensemble des solénoïdes est indépendante de x et θ et s'écrit :

$$(5) \quad P = 3/2 n R_s i^2$$

On remarquera que la somme algébrique des courants i_A , i_B et i_C , définis par les équations (3) est égale en permanence à 0, ce qui autorise à raccorder les solénoïdes en étoile et à les alimenter en triphasé.

La répartition du courant entre les solénoïdes, décrite par les équations (3), est définie par le paramètre θ . Les équations (4) et (5) montrent que pour produire un certain effort F , avec une dépense énergétique aussi faible que possible, il y a intérêt à choisir θ de telle sorte que $\cos(2\pi x/p - \theta)$ soit égal à +1 ou -1. Afin de compenser le signe négatif de l'équation (4), nous choisirons $\cos(2\pi x/p - \theta) = -1$.

Pour maintenir la condition de minimum de dépense énergétique lorsque le bloc moteur se déplace le long du barreau magnétique, on fait varier la répartition du courant (donc θ) en fonction des informations délivrées par les capteurs à effet Hall équipant le bloc moteur (Fig. 2). Le premier capteur fournit une mesure B_1 en phase avec le champ magnétique coupé par les solénoïdes A_1, A_2, \dots, A_n . Le deuxième capteur est décalé d'un quart de pas, de façon à fournir une mesure B_2 déphasée de 90° . Les capteurs sont appariés pour avoir la même sensibilité. Si B_0 est la mesure maximale obtenue lorsqu'un capteur est en face d'une paire de pôles nord, les mesures peuvent s'exprimer sous la forme suivante :

$$(6) \quad B_1 = B_0 \cos(2\pi x/p) ; \quad B_2 = B_0 \sin(2\pi x/p)$$

Question 4 Montrer que l'on satisfait bien les conditions introduites dans l'équation (3) si on commande les courants i_A , i_B et i_C conformément aux équations suivantes :

$$(7) \quad i_A = -i \frac{B_1}{B_0} ; \quad i_B = i \frac{B_1 + B_2\sqrt{3}}{2B_0} ; \quad i_C = i \frac{B_1 - B_2\sqrt{3}}{2B_0}$$

Montrer aussi que dans ces conditions, l'effort généré par le moteur linéaire devient indépendant de la position du bloc moteur et peut s'écrire :

$$(8) \quad F = 3/2 n K_s i$$

Pour la suite, de façon à simplifier les notations, en faisant abstraction de la structure interne du moteur linéaire, on posera « $3/2 n K_s = K_f$ » et « $3/2 n R_s = R$ », de telle sorte que :

$$(9) \quad F = K_f i$$

$$(10) \quad P = R i^2$$

« K_f » est la constante de force globale du moteur et « R », la résistance électrique équivalente du moteur.

1.5 Introduction du module de puissance

Un moteur linéaire est fourni avec son module électronique d'amplification de puissance. Un tel module est réalisé avec des composants électroniques fonctionnant par commutation, en modulation de largeur d'impulsion. Il est caractérisé par de faibles pertes énergétiques.

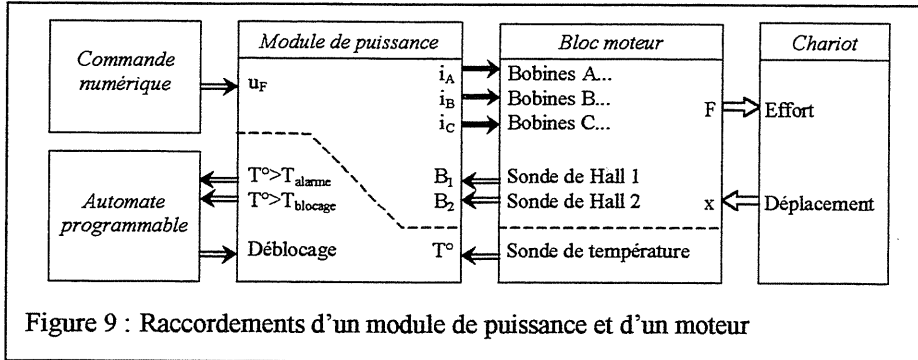


Figure 9 : Raccordements d'un module de puissance et d'un moteur

Les raccordements du module de puissance et du bloc moteur sont conformes au schéma de la figure 9. Les flèches à doubles traits fins symbolisent des liaisons bifilaires torsadées. Les flèches à traits épais simples symbolisent les câbles de puissance. Les flèches à contour large symbolisent les actions mécaniques.

Le module de puissance assure à la fois des fonctions de commande de puissance (partie représentée en dessus du trait tireté sur la figure 9) et de sécurité thermique (partie en dessous du trait tireté). La commande de puissance inclut l'amplification de puissance, la régulation du courant et sa répartition optimale entre les trois séries de solénoïdes du bloc mobile définie par les équations (7).

La grandeur « u_F » est transmise par la commande numérique sous la forme d'un signal analogique de tension représentant, à un coefficient près, la force demandée au moteur. Lorsque u_F varie de -10 V à $+10\text{ V}$, le courant dans le bloc moteur varie proportionnellement de $-i_{\max}$ à $+i_{\max}$, i_{\max} étant le courant de pointe maximal supporté par les solénoïdes, égal à 10 A .

Du point de vue de la commande de mouvement, l'ensemble « Module de puissance – Bloc moteur » est assimilable à un bloc fonctionnel unique fonctionnant en « Générateur d'effort », dont l'entrée est le signal u_F et la sortie, la force générée par le moteur. Le comportement dynamique de cet ensemble est assimilable à celui d'un système du premier ordre, de gain K_m et de constante de temps τ . La constante de temps représente le temps d'établissement du courant dans les solénoïdes, dû à l'inductance des solénoïdes.

Question 5 Déterminer K_m en fonction de la constante de force globale K_f du moteur, de son courant maximal admissible en pointe et des caractéristiques du module de puissance. *Ne pas oublier de préciser les unités.*

La constante de temps est donnée par le constructeur, pour chaque type de moteur. Il faudrait en théorie tenir compte du temps de réponse des composants électroniques du module de puissance, mais celui-ci est négligeable devant τ .

La sécurité thermique agit par blocage de la puissance et court-circuit des solénoïdes, afin de stopper rapidement le mouvement (freinage par courants de Foucault). Comme l'intervention de cette sécurité provoque un arrêt d'urgence, elle est précédée par un signal d'alerte, lors du franchissement d'un seuil de température légèrement inférieur au seuil de blocage. L'automate programmable et la commande numérique peuvent réagir à ce signal, en marquant une pause dès la fin du cycle en cours, afin de laisser refroidir le moteur et prévenir l'arrêt d'urgence.

Les informations échangées avec l'automate programmable sont binaires et représentées par des tensions voisines de 0 V ou 5 V . L'entrée « Déblocage » du module de puissance est aussi binaire. Elle permet débloquer ou de bloquer la puissance pour autoriser ou arrêter le mouvement. Elle intervient lorsqu'une cause externe l'exige, par exemple le blocage d'un autre moteur ou l'ouverture inopinée d'un capot de protection. Le blocage est effectif lorsque l'entrée déblocage est à 0 , ce qui est le cas notamment à la mise sous tension ou à la coupure inopinée de la tension d'alimentation.

II Deuxième partie : Commande des mouvements des chariots de la table de découpe

La commande des mouvements des chariots de la table de découpe est réalisée par un ensemble de matériels et de logiciels répartis entre les capteurs, les actionneurs et la commande numérique. Les performances de la

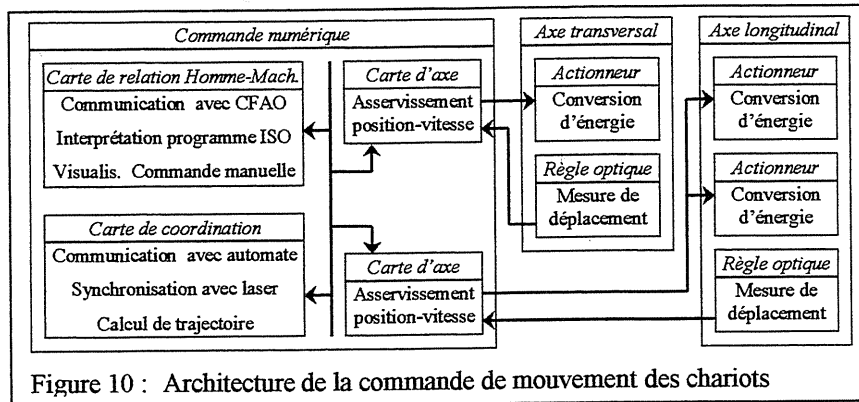


Figure 10 : Architecture de la commande de mouvement des chariots

commande doivent permettre de faire face aux besoins de grande vitesse et haute précision du procédé de découpe par laser, ce qui conduit à l'utilisation d'une commande performante. L'architecture générale de la commande de mouvement est représentée figure 10. Les titres en italique décrivent des éléments matériels et les autres textes, les fonctions assurées par ces éléments.

L'objectif de performances élevées impose tout d'abord de bien maîtriser le comportement individuel de chaque chariot, en les équipant des moteurs linéaires les plus appropriés pour répondre au cahier des charges et en appliquant des lois d'asservissement aptes à réduire à la fois les erreurs de position et de vitesse. Ensuite, il sera nécessaire de coordonner efficacement les mouvements des deux chariots, pour réaliser les cycles de découpe. Bien que les organes de commande soient de nature numérique, les démonstrations s'appuieront sur des représentations à temps continu (équations différentielles et transformées de Laplace).

II.1 Eléments de cahier des charges

1. La vitesse d'avance souhaitée doit être constante pendant les phases de découpe et peut aller de 5 mm/s pour la découpe de plaques épaisses à 500 mm/s pour la découpe de feuilles minces.
2. L'accélération de pointe disponible pour chaque axe doit atteindre 20 m/s², pour permettre de parcourir des arcs de cercle de rayon minimum égal à 0,5 mm, à la vitesse de 100 mm/s.
3. L'écart de suivi des trajectoires de découpe doit être inférieur à 0,01 mm en toutes circonstances.
4. La durée de parcours des trajectoires d'attaque et de dégagement doit être au moins égale au temps d'amorçage et d'extinction de la source laser, de valeur estimée à 15 ms.
5. Les mouvements d'approche du point de départ des cycles de découpe successifs doivent être effectués dans des temps aussi réduits que possible, mais sans à-coup, pour ne pas exciter les vibrations et sans dépasser la vitesse maximale de 2 m/s, pour ne pas endommager les glissières, les câbles électriques mobiles et les soufflets de protection.
6. La cadence de découpe doit permettre d'enchaîner en permanence, sans échauffement excessif, 4 découpes par seconde de trous circulaires de 2 cm de diamètre.

II.2 Choix des moteurs pour chacun des axes

Le tableau 1 donne des informations utiles au choix des moteurs les plus appropriés pour équiper le chariot transversal et le chariot longitudinal de la machine. Le choix doit s'opérer en fonction de l'espace disponible, des performances dynamiques désirées, de la masse des moteurs et de leurs caractéristiques thermiques.

II.2.1 Choix préliminaire, pour satisfaire les critères de vitesse et accélération

La masse du chariot transversal, hors bloc moteur, s'élève à 10 kg. Celle du chariot longitudinal s'élève à 45 kg, également hors bloc moteur, mais en incluant le barreau magnétique d'entraînement du chariot transversal.

On rappelle que deux blocs moteurs sont utilisés en tandem, un de chaque côté, pour entraîner le chariot longitudinal.

Le moteur de type LD3810 est exclu pour le chariot transversal, en raison de son encombrement excessif.

Paramètres moteurs	Unité	LD3810	LD3808	LD3806	LD3804
Force crête à 10 Ampères	(N)	1300	1000	750	550
Vitesse crête à 320 Volts	(m/s)	2,6	3,2	4,5	6,5
Constante de force K_f	(N/A)	130	105	75	55
Constante de FCEM K_v	(V/(m/s))	123	95	71	48
Résistance électrique globale R	(Ω)	12,5	10	7,5	5
Inductance globale L	(mH)	13	11	9	5,6
Courant permanent maximal	(A)	2,5	2,9	2,6	2,6
Constante de temps τ	(ms)	1	1,1	1,2	1,1
Masse du bloc moteur M	(kg)	6	5	4	3
Longueur du bloc moteur	(mm)	376	305	234	163

Tableau 1 : Extrait des spécifications techniques des moteurs linéaires de marque LINEAR DRIVE.

Question 6 Déterminer, pour chacun des deux chariots, quels sont les moteurs permettant d'atteindre les performances de vitesse et accélération définies par le cahier des charges.

II.2.2 Echauffement

L'échauffement est causé par les pertes par effet joule dans les solénoïdes (équation (10)). Le courant traversant les moteurs est proportionnel à l'effort. La pesanteur n'agit pas sur les mouvements qui sont horizontaux. Les frottements sont négligeables, grâce aux caractéristiques avantageuses des moteurs sans contact et des guidages par patins à bille. Le courant est donc aussi proportionnel à l'accélération.

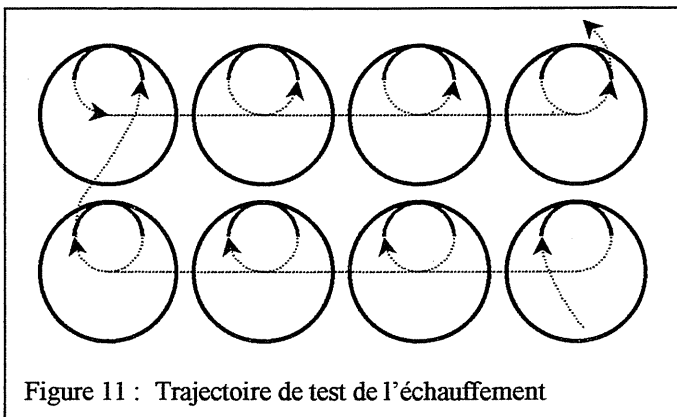


Figure 11 : Trajectoire de test de l'échauffement

L'échauffement dépendant du cycle de travail, on se contentera de l'évaluer dans le cas du cycle défini au point 6 du cahier des charges. Ce cycle test peut être effectué intelligemment, en parcourant la trajectoire représentée figure 11 à vitesse constante, de manière à minimiser l'échauffement. Le flux laser est commandé au vol : il est interrompu pendant les parcours de raccordement, représentés en pointillé. Il est amorcé pendant le parcours des arcs d'attaque (1/4 de petit cercle), maintenu pendant la découpe (grand cercle) et arrêté pendant les dégagements (1/4 de petit cercle).

II.2.3 Cycle de travail de test d'échauffement

Un cycle complet de découpe d'un trou est exécuté en 0,25 s. Il comporte le parcours à vitesse constante d'un segment de droite de 22 mm de long, d'un demi cercle de \varnothing 10 mm, d'un cercle de \varnothing 20 mm et enfin d'un demi-cercle de \varnothing 10 mm. Les raccordements entre les rangées de trous sont assimilés aux autres raccordements, car ils n'interviennent que rarement et ne contribuent que faiblement à l'échauffement des moteurs.

Question 7 Tracer sommairement l'allure des lois d'accélération en fonction du temps des deux chariots pendant le parcours du cycle de travail de test. Tracer également les carrés des accélérations et en déduire que la valeur efficace de l'accélération de chacun des deux chariots est voisine de 10 m/s^2 .

On rappelle que la valeur efficace d'une grandeur périodique $x(t)$, de période T_{cycle} est égale à sa valeur

quadratique moyenne, c'est à dire à :

$$\sqrt{\frac{1}{T_{\text{cycle}}} \int_{t=0}^{T_{\text{cycle}}} x(t)^2 dt}$$

II.2.4 Choix définitif des moteurs

Le constructeur de la machine a choisi d'utiliser 3 moteurs identiques, de type LD3808.

Question 8 Déterminer le courant efficace qu'absorbent ces moteurs pour réaliser le test. Comparer ces courants efficaces aux courants permanents maximaux tolérables par les moteurs. Proposer un meilleur choix de moteurs et vérifier s'il satisfait bien le test d'échauffement. Quelles sont les raisons qui ont pu conduire le constructeur à un choix qui n'est pas le meilleur du point de vue des performances dynamiques et thermiques ?

Par la suite, on conservera malgré tout le choix du constructeur. La masse totale incluant les moteurs sera donc égale à 15 kg, pour le chariot transversal et à 55 kg, pour le chariot longitudinal.

II.3 Asservissement du mouvement d'un chariot

II.3.1 Modèle dynamique d'un chariot équipé de ses capteurs et actionneurs

On étudie le chariot transversal, plus simple que le chariot longitudinal car il n'a qu'un moteur. Le chariot se déplace sous l'effet de la force motrice F de l'actionneur et subit une force perturbatrice F_{perturb} , inconnue mais variant entre +20 et -20 N. Celle-ci représente des efforts négligés en première approximation, qui sont engendrés par le déroulement des câbles électriques de liaison ainsi que par les frottements des patins à billes et des soufflets de protection recouvrant les rails de guidage et les capteurs de déplacement.

Question 9 Etablir l'équation différentielle du mouvement suivant l'axe y de ce chariot, en tenant compte de la perturbation. Déterminer la fonction de transfert correspondant aux contributions de F et F_{perturb} , donnant le déplacement en mètre, en fonction des forces en Newton. Montrer que le procédé de commande du chariot transversal peut se ramener au schéma bloc de la figure 12.

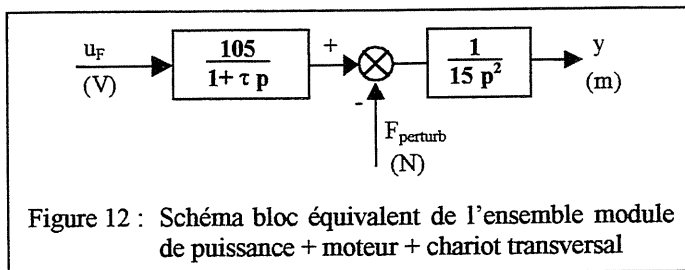


Figure 12 : Schéma bloc équivalent de l'ensemble module de puissance + moteur + chariot transversal

La constante de temps τ , qui représente le temps d'établissement du courant dans les solénoïdes du moteur, est égale à 1,1 ms. Cette valeur étant faible devant le temps de réponse de 15 ms que l'on attend du système, on pourra la négliger dans un premier temps, et assimiler le premier bloc fonctionnel à un gain pur, de 105 N/V. C'est pour la même raison que l'on peut, en première approche, faire abstraction de l'échantillonnage de période égale à 1 ms et assimiler le système à un système continu.

II.3.2 Etude théorique de l'asservissement de position par un correcteur PD (proportionnel et dérivé)

L'étude présente est qualifiée de théorique en ce sens que l'on fait abstraction du mode de réalisation du correcteur. L'action proportionnelle agit en fonction de l'écart de position et l'action dérivée, en fonction de l'écart de vitesse. Aussi appelle-t-on parfois l'asservissement par correcteur PD « asservissement de position - vitesse ». Le comportement du correcteur PD est en théorie tel que :

$$(11) \quad u_F(t) = K_p \varepsilon(t) + K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad \varepsilon(t) \text{ étant l'écart entre la consigne } y_d \text{ et la mesure } y.$$

La fonction de transfert de ce correcteur s'écrit donc :

$$(12) \quad \frac{u_F(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + K_d p$$

et le schéma bloc théorique de l'asservissement proportionnel et dérivé

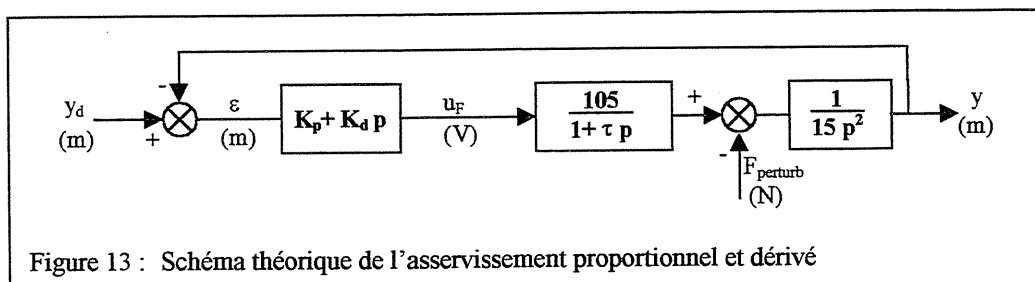


Figure 13 : Schéma théorique de l'asservissement proportionnel et dérivé

Question 10 Etablir les fonctions de transfert en boucle fermée $H_1(p) = \frac{y(p)}{y_d(p)}$, lorsque la perturbation est nulle et $H_2(p) = \frac{y(p)}{F_{\text{perturb}}(p)}$, lorsque la consigne est nulle. Montrer que lorsqu'on néglige le temps d'établissement du courant, en faisant l'approximation $\tau = 0$, ces deux fonctions de transfert sont égales à :

$$(13) \quad H_1(p) = \frac{7 K_d p + 7 K_p}{p^2 + 7 K_d p + 7 K_p} \quad \text{et} \quad H_2(p) = \frac{1/15}{p^2 + 7 K_d p + 7 K_p} \text{ m/N}$$

II.3.3 Performances de l'asservissement

Question 11 Discuter du choix des gains d'action proportionnelle K_p et dérivée K_d et de son influence sur la précision, la rapidité et l'amortissement du système bouclé dont le comportement est représenté par les deux fonctions de transfert (13).

On retient pour tout ce qui suit les valeurs suivantes : $K_p = 25200 \text{ V/m}$ et $K_d = 120 \text{ Vs/m}$.

Question 12 Tracer l'allure des diagrammes de Bode de la réponse en fréquence vis à vis des variations de consigne et vis à vis des variations de perturbation. En déduire les valeurs approximatives de la bande passante à -3 dB et de l'amortissement du système asservi.

Question 13 Déterminer l'erreur de position maximale que peut causer la perturbation, lorsqu'elle atteint sa valeur la plus élevée, égale à 20 N. Est-il nécessaire d'ajouter une action intégrale au correcteur, pour réduire cette erreur ? Quelles seraient les effets favorables et défavorables de l'action intégrale ?

Question 14 Déterminer l'écart de poursuite en régime établi, appelé aussi erreur de traînée ou écart permanent, lorsque la perturbation est nulle et que la consigne est un échelon d'accélération de 20 m/s^2 . Comparer le résultat avec les performances demandées par le cahier des charges. Pourquoi n'est il pas utile de calculer l'écart permanent pour des entrées en échelon et en rampe ?

Question 15 Déterminer et tracer sommairement l'allure de l'évolution de l'écart en régime transitoire, dans les mêmes conditions que la question 14.

Question 16 Afin de diminuer les écarts de poursuite, on ajoute une action d'anticipation d'accélération, conformément au schéma théorique de la figure 14. Déterminer la nouvelle expression de la fonction de transfert $H_1(p)$, sans négliger l'effet de la constante de temps τ . Montrer que si on choisit convenablement la valeur de K_a , l'écart de poursuite diminue fortement, même en tenant compte de la constante de temps τ .

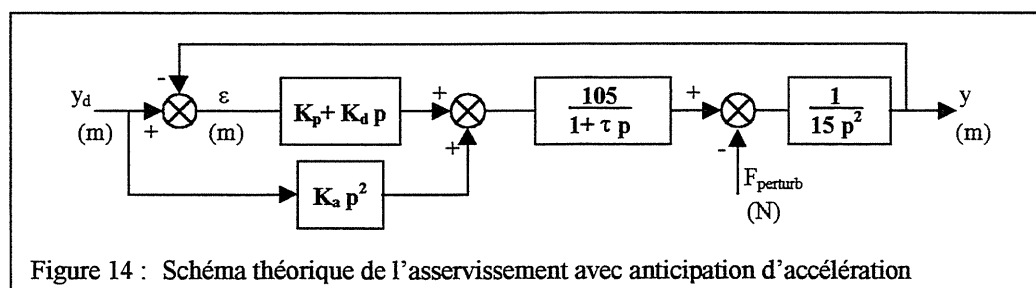


Figure 14 : Schéma théorique de l'asservissement avec anticipation d'accélération

II.3.4 Schéma fonctionnel et paramètres réels d'asservissement

Dans la pratique, plutôt que de dériver la consigne de position, il est plus commode d'utiliser directement comme consignes les valeurs de position, vitesse et accélération désirées, telles qu'elles sont déterminées par les interpolateurs calculant la trajectoire à parcourir. Ceci conduit à la structure de commande d'axe dénommée « Asservissement PVA » (Position - Vitesse - Accélération) schématisée figure 15. Ce schéma tient compte du comportement des organes de mesure et de conversion numérique analogique.

Les paramètres k_{mp} , k_{cv} , k_{na} sont des gains équivalents respectivement à la mesure de position, au calcul de la vitesse et à la conversion numérique - analogique. Les paramètres k_p , k_v , k_a sont respectivement les gains d'asservissement de position, de vitesse et d'accélération. La commande en position - vitesse - accélération nécessite de mesurer la position et la vitesse instantanée du chariot avec une précision au moins égale à la précision désirée du mouvement.

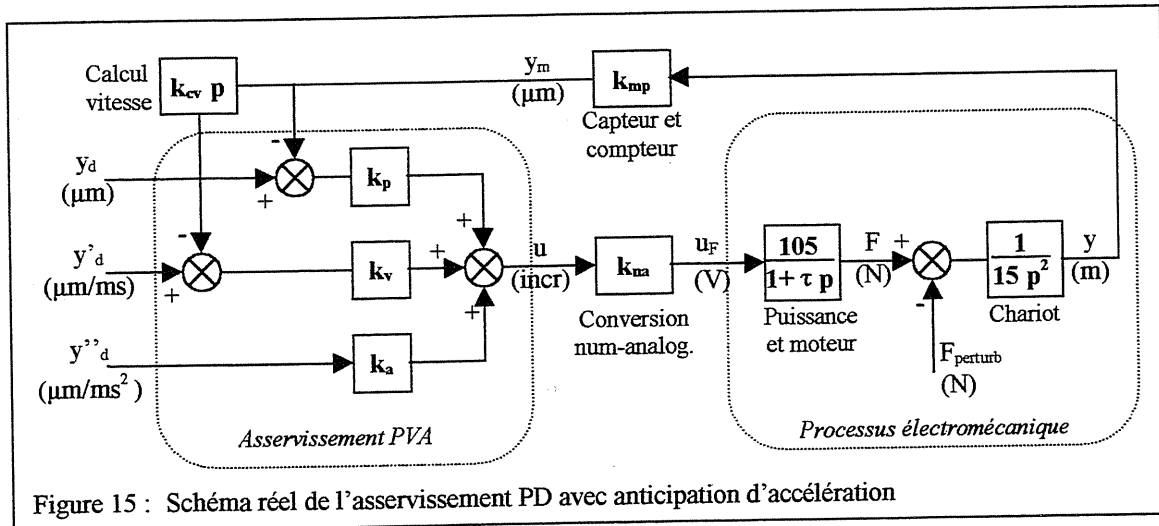


Figure 15 : Schéma réel de l'asservissement PD avec anticipation d'accélération

II.3.5 Mesure de la position

La mesure de position est réalisée par une règle graduée associée avec des capteurs optiques incluant une électronique de mise en forme. Ils délivrent deux signaux carrés « a » et « b » déphasés d'un quart de pas, de période spatiale égale à 4 µm. Ces signaux sont utilisés par un compteur qui est situé sur la carte d'axe de la commande numérique. Ce compteur s'incrémente ou se décrémente à chaque front de variation des signaux « a » et « b », en fonction du sens du mouvement. La résolution de la mesure est donc de 1 µm. La linéarité et la précision dépendent de la dilatation thermique subie par la règle qui est collée sur le bâti (axe x) ou l'une des poutres du chariot transversal (axe y). Il est important, pour la linéarité, que la température du bâti et des poutres soit homogène. Pour ce qui est de la précision, l'effet des dilatations se compense naturellement, si le matériau et la machine ont des coefficients de dilatation proches et des températures voisines.

Il n'y a pas de capteur de zéro pour la prise d'origine machine, mais deux capteurs fin de course situés un peu avant les butées d'extrémité. La prise d'origine machine s'effectue à vitesse très réduite, en allant en butée vers (x-) ou (y-), puis en repartant en direction opposée : le compteur est remis à zéro à l'instant où le signal de fin de course passe du niveau 1 au niveau 0.

II.3.6 Calcul de la vitesse

La vitesse instantanée n'est pas mesurée directement, mais obtenue par différence de position entre deux instants d'échantillonnage. La résolution de la mesure de position est d'une finesse superflue, relativement à la précision de découpe qui est de l'ordre de 1/100 de mm. Elle est par contre utile pour permettre un calcul précis de la vitesse instantanée.

Question 17 Calculer la résolution de la mesure de vitesse, en mm/s, pour une fréquence d'échantillonnage de 1000 Hz. Quelle est la précision relative de la mesure de vitesse aux deux extrêmes des vitesses de travail, soit 5 mm/s et 500 mm/s ? Que peut-on en conclure sur la résolution du capteur et sur le choix de la fréquence d'échantillonnage ? Quelle méthode ou moyen employer pour améliorer la mesure des faibles vitesses ?

II.3.7 Conversion numérique – analogique

La commande calculée au sein de la carte d'axe est appliquée au module de puissance grâce à un convertisseur numérique – analogique à 12 bits plus signe, c'est à dire 4096 points pour les valeurs négatives et autant pour les valeurs positives. On limite les valeurs appliquées au convertisseur à + ou - 4000. Pour une valeur numérique variant de -4000 à +4000, le convertisseur délivre au module de puissance un signal u_F variant proportionnellement, de -10 à +10 V. L'algorithme d'asservissement qui va être étudié dans les questions suivantes reçoit comme information d'entrée la valeur numérique de la position y , en µm, lue dans le compteur et fournit, au convertisseur numérique – analogique, une valeur numérique que nous noterons « u ». La valeur de u_F , transmise au module de puissance varie de 2,5 mV à chaque incrément de u.

II.3.8 Application de la commande

La carte d'axe effectue tous ses calculs en entier, l'unité interne étant équivalente à 1 µm pour la position, 1 µm/milliseconde pour la vitesse et 1 µm/milliseconde², pour l'accélération. Les gains d'asservissement k_p , k_v , k_a

seront eux-mêmes des entiers de valeur modérée, pour ne pas risquer les débordements des opérateurs arithmétiques.

Question 18 Donner les valeurs des gains équivalents à la mesure de position, au calcul de la vitesse et à la conversion numérique – analogique, sans oublier de préciser les unités. Déterminer ensuite les valeurs numériques des gains d'asservissement de l'axe transversal, tenant compte des caractéristiques des interfaces avec le processus physique et permettant d'obtenir le même comportement que celui défini dans l'approche théorique. *Les arrondis seront effectués dans le sens ne diminuant pas l'amortissement du système asservi.*

II.3.9 Mise en œuvre sur une carte d'axe

Le calcul de la vitesse et celui de la commande sont effectués tous les millièmes de seconde. Ils sont programmés dans le langage spécifique de la carte d'axe qui ne sera pas étudié dans le présent texte.

Question 19 Expliciter l'algorithme de calcul en pseudo langage algorithmique ou dans un langage informatique d'usage général, soit en Basic, soit en Pascal soit en C, au choix du candidat.

II.4 Coordination des mouvements des 2 chariots

II.4.1 Coordination des efforts des actionneurs du chariot longitudinal

Le chariot longitudinal a une répartition des masses sensiblement symétrique et son centre de gravité se situe à mi-chemin entre les deux actionneurs placés sur ses platines d'extrémité. Le chariot transversal est lui aussi sensiblement symétrique. Son centre de gravité coïncide avec celui du chariot longitudinal lorsqu'il est à mi-course, relativement à ce dernier. Pour qu'il n'y ait pas d'effet de mise en travers du chariot longitudinal, notamment lorsque le chariot transversal n'est pas à mi-course et pendant les fortes accélérations, il y a intérêt à équilibrer les efforts fournis par les 2 actionneurs avec les forces d'inerties influant sur chacune de ses deux extrémités.

Question 20 Déterminer la loi de répartition des courants entre l'actionneur situé à l'extrémité (y+) et celui situé à l'extrémité (y-) du chariot longitudinal, en fonction de la position du chariot transversal. *On fixera l'origine à mi-course, les actionneurs étant placés de part et d'autre, à 0,8 m de l'origine.*

II.4.2 Coordination des mouvements des chariots

La coordination des mouvements se ramène au calcul, en temps réel et simultanément pour chaque chariot, des consignes de position, vitesse et accélération décrivant le mouvement sur la trajectoire désirée. Pour simplifier, la trajectoire est décrite dans le système d'axes (x, y) des deux chariots. Le problème se ramène alors au calcul des valeurs de trois paires de fonctions interdépendantes $\{x_a(t), y_a(t)\}$, $\{x'_a(t), y'_a(t)\}$ et $\{x''_a(t), y''_a(t)\}$. Le calcul s'effectue, selon le cas, par interpolation linéaire, parabolique, cubique ou circulaire. On ne s'intéressera, dans ce problème, qu'au cycle de test de découpe de trous circulaires étudié en II.2.2 et II.2.3, celui-ci étant parcouru en 0,25 seconde, à vitesse aussi constante que possible et la fréquence d'échantillonnage étant fixée à 1 kHz.

Question 21 Déterminer complètement les fonctions d'interpolation et les algorithmes à appliquer pour chacun des éléments de trajectoire du cycle de test. *Pour simplifier les expressions, on pourra choisir une origine différente pour chaque segment de trajectoire.*

III Troisième partie : Coordination d'ensemble de la machine

Comme indiqué plus haut, la machine est composée de deux grands sous-ensembles : le système de déplacement en 2-D constitué par les deux chariots et le sous-ensemble de génération du flux laser. La commande du déplacement a fait l'objet des parties précédentes. On a vu qu'elle était réalisée par une carte d'axe et par un module de puissance pour chacun des axes x et y (Fig. 9), coordonnés par un directeur de commande numérique (Fig. 10).

Dans la présente partie sera étudiée, d'une part, la commande du sous-système de génération du flux laser et, d'autre part, la coordination des deux sous-ensembles et l'interface homme-machine. Ces commandes seront implantées dans un automate programmable industriel standard, programmable en langage normalisé à réseaux de contacts, dit "ladder diagram". En conséquence, cet automate d'une part gère les entrées/sorties du sous-ensemble laser pour le commander et d'autre part, communique avec le directeur de commande numérique, les organes d'alimentation et de dialogue homme-machine, pour assurer le pilotage de l'ensemble de la machine. L'analyse de cette commande et sa programmation nécessitent donc une approche structurée et multi-niveaux.

III.1 Commande du sous-ensemble de génération du flux laser

Le paragraphe D.1 et la figure 2 indiquent le principe de fonctionnement du générateur laser. On ajoute les informations suivantes, pertinentes du point de vue de la commande :

III.1.1 Les organes du sous-ensemble de génération du flux laser

Le générateur hyperfréquences, *GH*, est un organe autonome : il est alimenté en 220 V et consomme environ 2,5 kW. A sa mise sous tension, son boîtier de commande propre lui fait effectuer un cycle de pré-chauffage au terme duquel l'émission de micro-ondes est réputée obtenue. Ce boîtier contient de plus un système de détection de défaut. A l'occurrence d'un défaut, l'émission de micro-ondes est interrompue et l'affichage d'un mot d'état sur une barrette de diodes électroluminescentes solidaire du boîtier permet au technicien de maintenance de repérer l'origine du défaut. Après correction du défaut, le générateur ne peut repartir qu'à la remise sous tension. Le boîtier du générateur fournit deux informations sur son état, sous forme de contacts électriques ramenés sur son bornier de raccordement. Un contact *ok_gh* est ouvert pendant la phase de préchauffage et fermé dès que l'émission de micro-ondes est obtenue. Un contact *def_gh* est normalement ouvert et passe à l'état fermé lorsque le générateur détecte un défaut dans son fonctionnement. L'état de ces contacts est à exploiter par la commande du système laser.

Vu de la commande, le système de refroidissement est constitué d'une pompe, *P_circ*, de circulation du liquide de refroidissement, alimentée en 220 V monophasé et consommant environ 200 W, et d'un interrupteur thermostatique, *I_therm*, réglable localement par une molette graduée en °C. Lorsque le liquide est en dessous de la température affichée, l'interrupteur est ouvert et au dessus, l'interrupteur est fermé.

Le capteur de pression de la cavité, *vacu_cav*, mesure en fait la dépression (ou le "vide"). Il est analogique et fournit une tension de 0 à 10 V image de la pression absolue régnant dans la cavité laser (gamme 0 à 1,2 bar).

L'électrovanne de purge est de type 2/2 monostable. Elle met en relation la cavité avec l'orifice d'aspiration de la pompe à vide, *P_vide*, alimentée en 220 V monophasé et consommant environ 500 W.

L'électrovanne de remplissage, *EV_rempl*, est de type 2/2, monostable. Elle met en relation la cavité avec la réserve de gaz, constituée d'une bouteille équipée d'un robinet, d'un mano-détendeur et d'un manomètre.

Vu de la commande, l'obturateur est assimilable à une bobine, *obtur*. Lorsqu'elle est alimentée, le miroir frontal à l'extrémité de la cavité passe à l'état semi-réfléchissant et le rayonnement laser peut ainsi en sortir.

Dans un souci de simplification, on supposera que toutes les bobines (électrovannes, obturateur ...) sont de type 24 V continu. Dans la suite, le candidat pourra ajouter d'autres organes, si cela lui semble de nature à préciser ou à améliorer la commande du sous-ensemble de génération du flux laser.

Question 22 En se limitant à ce qui relève de la commande du sous-ensemble de génération du flux laser, on demande :

- Le schéma de principe de l'alimentation électrique de l'automate programmable et du générateur hyperfréquences GH et de la génération des tensions nécessaires au raccordement des entrées/sorties, à partir de l'arrivée en 220 V monophasé sur la machine. Cette partie du câblage est souvent désignée dans

l'industrie par le terme "tête de filerie" et joue un rôle important pour la sécurité et la protection de la machine. Le candidat précisera ses choix techniques en matière de mise sous tension et de coupure (y a t'il des niveaux ou une séquence de mise sous tension et de coupure ?) ainsi que pour la partie câblée du traitement de l'arrêt d'urgence.

- Le schéma de principe du raccordement des capteurs et des actionneurs aux cartes de l'automate programmable. L'automate programmable utilisé pouvant être équipé de cartes d'entrées/sorties de types très divers, on précisera celles dont il faut l'équiper pour pouvoir lui raccorder ces capteurs et actionneurs. Le cas échéant, on fera clairement apparaître les dispositions prises pour les sécurités dites de "premier niveau" (prise en compte câblée) et l'arrêt d'urgence.

On demande de respecter exactement les mnémoniques indiqués dans le texte (ils sont en italiques).

III.1.2 Formalisation des modes de marche du sous-ensemble de génération du flux laser.

L'étude des modes de marche d'une installation automatisée est souvent considérée comme un point de départ crucial de l'analyse d'un problème d'automatisation. Conformément à ce principe, on se propose de formaliser les modes de marche du sous-ensemble de génération du flux laser à partir des éléments suivants :

En mode de **fonctionnement normal** (F1), une tâche de surveillance de la cavité laser est active, tandis que l'obturateur est manœuvré directement par le directeur de commande numérique, en fonction des commandes placées dans les blocs ISO de programmation des déplacements. Les déplacements peuvent ainsi être exécutés avec ou sans émission du flux laser.

La tâche de surveillance de la cavité laser met l'état *ok_cavité* à *vrai*, si :

- un temps cumulé de fonctionnement du laser n'a pas été atteint. En effet, on considère qu'au terme d'un temps cumulé trop long le mélange de gaz finit par être pollué. Ce temps est paramétrable.
- la pression de la cavité est à l'intérieur d'une fourchette donnée, dont les bornes sont paramétrables.
- la pression de la cavité, tout en restant à l'intérieur de la fourchette, ne varie pas trop vite, ce qui ferait soupçonner des problèmes d'étanchéité.
- la température est inférieure à un seuil donné.

Ces conditions sont testées en permanence.

Une **marche de préparation** (F2) est lancée à l'appui sur un bouton *marche_laser*. Le générateur hyperfréquence effectue alors son préchauffage, tandis que *P_circ* se met en route et que la tâche de surveillance de la cavité est activée. Lorsque le générateur hyperfréquences a terminé son préchauffage, qu'un temps (paramétrable, de l'ordre de quelques minutes) d'homogénéisation de la température du liquide de refroidissement est écoulé et que la cavité est dans l'état *ok_cavité = vrai*, le sous-ensemble laser entre dans le mode de fonctionnement normal.

On peut quitter à tout moment le fonctionnement normal par appui sur un bouton *arrêt_laser* pour arriver dans un mode **d'arrêt à l'état initial** (A1). Le mode de fonctionnement normal peut aussi être quitté lorsque l'état *ok_cavité* devient *faux*, ou encore à l'occurrence de *def_gh*, ce qui indique qu'une **défaillance doit être traitée** (D2). Le générateur hyperfréquences est alors arrêté, tandis qu'une signalisation de défaut est effectuée. On ne peut que revenir en arrêt à l'état initial après traitement des causes du passage en défaillance (A5) et un acquittement du défaut *acq_def*, qui vérifie que, vu de la commande, le défaut a disparu. Un mode de **fonctionnement auxiliaire** peut être activé par l'opérateur, qui permet de renouveler le gaz dans la cavité, après purge du gaz pollué par la pompe à vide. C'est la bonne fin de ce mode qui permet de remettre à 0 le compteur de temps cumulé de fonctionnement.

Question 23 Les modes de marche peuvent être exprimés en langage naturel comme ci-dessus, ce qui est peu formel, ou bien de manière plus rigoureuse. Dans le cas présent, on désire utiliser la grille GEMMA pour formaliser les modes de marches de ce sous-ensemble. En effet, son aspect "guide" permet d'assurer une certaine exhaustivité dans le recensement des modes tandis que le caractère formel du GEMMA résultant permet de préciser les conditions d'évolution de passage d'un mode à l'autre.

A partir des indications données ci-dessus, on demande de remplir la grille GEMMA relative au sous-ensemble de génération du flux laser (on utilisera une des grilles GEMMA fournies avec ce texte). On fera apparaître dans les rectangles-états les modes retenus, avec leur nom, et les arcs figurant les possibilités de passage d'un mode à l'autre. Ces arcs seront étiquetés par la condition de passage d'un mode à l'autre.

Pour aider le candidat, dans certains modes décrits ci-dessus, le repère du rectangle-état correspondant est indiqué entre parenthèses.

III.2 Coordination d'ensemble

III.2.1 Définition des modes de marches du sous-ensemble de déplacement des chariots

La commande du sous-ensemble de déplacement des chariots est assurée, comme indiqué ci-dessus, dans la présentation, notamment figure 4 et dans la deuxième partie, par un directeur de commande numérique (DCN) approvisionné auprès de fournisseurs spécialisés. Ce système de commande est composé d'une part, d'un rack comprenant l'alimentation, les cartes de commande numérique définies figure 10 et, d'autre part, des modules de puissance, d'un clavier et d'un écran vidéo "durcis" pour pouvoir fonctionner en ambiance industrielle. L'ensemble de ces constituants de commande sont montés dans la baie de commande de la machine avec le câblage *ad hoc*, en plus de l'automate programmable et tous les organes évoqués ci-dessus.

Sans entrer dans les détails, et en simplifiant un peu la réalité industrielle, on supposera que le rack du calculateur du directeur de commande numérique comprend une carte d'entrées/sorties industrielles de type Tout Ou Rien (par exemple, 8 entrées repérées I00 à I07 et 8 sorties repérées O00 à O07). Les entrées peuvent être lues par des commandes disposés dans les blocs ISO de programmation des mouvements et provoquer des actions conditionnelles (par exemple, se brancher à un autre bloc du programme, selon la valeur vrai ou faux d'une des entrées I00 à I07). Ainsi, l'environnement logique extérieur peut "télécommander" le DCN en lui faisant générer, par exemple, une prise d'origine ou une trajectoire de repli. De même, des commandes placées dans des blocs ISO peuvent positionner à 0 ou à 1 les sorties O00 à O07. C'est ainsi que le bloc débutant une trajectoire d'amorçage comportera la mise à 1 du bit de sortie commandant l'obturateur du laser, tandis que le bloc débutant une trajectoire d'extinction du laser comportera la mise à 0 de ce bit de sortie. D'autre part, comme l'exécution des blocs peut être rendue conditionnelle selon les valeurs des paramètres internes (positions, vitesses...) ou externes (par exemple, les entrées I00 à I07) les sorties O00 à O07 peuvent être positionnées à des valeurs dépendant de celles de ces paramètres internes ou externes.

On rappelle (cf. fig 9 et §I.5) que chacun des deux modules de puissance émet deux sorties logiques qui prennent la valeur *vrai*, lorsque la température du bloc-moteur dépasse respectivement une température d'alarme et une température plus élevée, dite de blocage, car le moteur est alors immédiatement arrêté. Le mouvement ne pourra reprendre que si la température est redescendue au dessous de la température d'alarme et qu'une impulsion de durée minimale 100 ms est présentée sur l'entrée logique déblocage de ce module.

Question 24 On désire expérimenter l'utilisation du GEMMA pour analyser les modes de marches du DCN pilotant les chariots, formant ainsi un système un peu au delà des systèmes classiques pilotés par automate programmable. On demande d'indiquer ce que pourraient représenter pour un DCN les différents rectangles-états, répartis dans les trois familles de modes de marche de la grille d'analyse GEMMA. Son extension à un DCN paraît-elle pertinente ? Donner le GEMMA résultant de cette analyse (utiliser une des grilles fournies avec le sujet). En déduire la liste des relations entre le DCN et l'extérieur passant par sa carte d'entrées/sorties TOR.

III.2.2 Définition des modes de marches de l'ensemble de la machine

A ce stade de l'étude, on dispose de deux GEMMA représentant les modes de marche de chacun des deux sous-ensembles. L'objectif est d'arriver à un seul graphe décrivant les modes de marches de l'ensemble de la machine. Deux méthodes s'offrent alors : 1) construire un graphe unique de niveau supérieur qui "synchroniserait" les deux GEMMA qui deviennent alors de niveau inférieur ou 2) admettre que le graphe des modes de marche ne soit plus un graphe d'état (un seul mode actif, à tout moment) en autorisant du parallélisme. Ce graphe global pourrait être un GRAFCET.

Question 25 Donner le graphe des modes de marche de l'ensemble de la machine, sous la forme d'un ou plusieurs GRAFCET connexe(s) appliquant l'une ou l'autre des méthodes évoquées ci-dessus. Commenter la synchronisation entre les modes de chacun des sous-ensembles (laser et déplacement).

Question 26 A partir des différentes informations données dans ce texte et du (ou des) graphe(s) établi(s) à la question précédente, on demande de définir le pupitre de la machine qui sera à réaliser sur la porte de la baie de commande, à coté de l'écran-clavier du DCN. Ce pupitre pourra être composé de boutons-poussoirs, de voyants et de tout autre constituant de dialogue homme/machine jugé adapté à ce système. Il devra permettre notamment la bonne exécution des modes de réglage ou de paramétrage. Pour chacun des éléments de ce pupitre opérateur, on précisera s'ils sont gérés de manière câblée (indiquer le principe), ou bien par l'automate programmable (indiquer le type de raccordement et les éléments de base permettant sa gestion) ou encore par tout autre élément de la commande.

III.3 Étude de la programmation de l'automate programmable

Dans le cadre d'une épreuve en temps limité et sur papier, il est impossible d'élaborer des programmes réellement opérationnels. C'est pourquoi, dans cette partie, on se focalisera davantage sur des méthodes permettant l'élaboration rapide et sûre de programmes faciles à mettre au point et à faire évoluer.

Le principe général étudié ici est, très schématiquement, de considérer qu'à la fin de l'analyse fonctionnelle on dispose, d'une part, d'un **graphe d'état** découlant de l'analyse des modes de marches et d'autre part, d'un ensemble de **tâches** dont l'état ne peut être, pour simplifier, qu'**en cours** ou **dormant**. Toujours pour simplifier, ces tâches sont exprimées chacune par un seul GRAFCET connexe. Ils ont tous la même structure : une seule étape initiale, suivie par une seule transition dont la réceptivité est la condition de mise à l'état *en cours* de la tâche. Le retour à l'état *dormant*, matérialisé par l'activité de la seule étape initiale peut se faire soit lorsque la tâche est terminée, si cela a un sens pour l'application, soit sur forçage en situation initiale par le graphe d'état, qui est d'un niveau hiérarchique supérieur à tous les GRAFCET de tâches.

Question 27 Tracer la structure générale d'un GRAFCET de tâche pour mettre en évidence la synchronisation avec le graphe d'état, lui même exprimé par un GRAFCET, à tracer également, dans les cas suivants :

- La fin de la tâche provoque le passage à l'état suivant.
- La tâche peut être exécutée autant de fois que souhaité, tant que l'état est actif. Le cas échéant, le passage à un état suivant est retardé jusqu'à la fin de la tâche.
- La tâche est constamment en cours, le changement de l'état provoque son passage à l'état dormant. Prendre le cas particulier de la tâche de surveillance de la cavité, évoquée au § III.1.2.

Pour chacun de ces cas, faire toutes remarques pertinentes, notamment sur les risques encourus et les précautions à prendre.

L'ensemble de la spécification étant mis sous la forme d'un graphe d'état et de plusieurs GRAFCET connexes, il convient maintenant de générer les programmes de l'automate programmable. On supposera que son langage de programmation est le "ladder diagram", normalisé et le plus largement répandu. Ce langage est supposé connu du candidat. Néanmoins, on rappelle qu'un programme est constitué d'un ensemble de "réseaux". Chaque réseau matérialise une ou plusieurs fonctions booléennes. Une expression booléenne est représentée par un ensemble de "contacts" (lecture des variables, directes ou complémentées) reliés en série ou en parallèle (pour exprimer les opérateurs ET et OU) pour alimenter une (ou plusieurs) "bobine" (écriture d'une (ou plusieurs) variable). En conséquence, si la spécification est exprimée par des expressions booléennes, la traduction est immédiate. Pour les fonctions d'automatisme qui ne sont pas strictement booléennes (comptage, temporisation, monostable...), on utilise des "blocs fonctions" spécialisés. On trouvera en annexe le descriptif de quelques uns de ces blocs fonctions.

Question 28 On connaît la formulation algébrique du GRAFCET, qui permet d'obtenir un ensemble d'expressions booléennes équivalent à un GRAFCET donné. Chacune de ces expressions est celle d'une mémoire prioritaire à 1, dont le contenu représente l'état actif ou non de chacune des étapes du GRAFCET considéré. Les conditions de mise à 1 et de mise à 0 de ces mémoires dépendent des conditions de franchissement des transitions amont et aval de chacune des étapes modélisées par ces mémoires. On appellera cette formulation algébrique d'un GRAFCET.

Lorsque l'on a à formuler algébriquement un graphe d'état, on peut s'attendre à des expressions booléennes plus simples, donc plus aisées à programmer. On demande l'expression algébrique d'un graphe d'état, en considérant que chaque état i est matérialisé par un bit mémoire B_i positionné par les fonctions SET et RESET de ce bit : $S(B_i)$ et $R(B_i)$. Après une analyse littérale, on exprimera le résultat dans le langage de l'automate (réseaux de contacts dit aussi « ladder diagram »).

Question 29 La tâche de surveillance de la cavité laser, telle qu'elle est décrite au § III.1.2. est constituée de quatre conditions logiques évaluées en permanence. Lorsque toutes ces quatre conditions sont vérifiées, le bit interne $OK_{cavité}$ est mis à 1. Il est forcé à 0 dès que l'une au moins des conditions n'est pas vérifiée.

Pour chacune de ces conditions C_1 à C_4 , on demande le ou les réseaux qui positionnent un bit interne (B_1 à B_4) traduisant la valeur vérifiée ($B_i=1$) ou non ($B_i=0$) de la condition C_i . Ce ou ces réseaux seront commentés brièvement pour justifier la solution proposée.

ANNEXE

Aide-mémoire pour la programmation par réseaux à contacts (ladder-diagram)

D'après un document Schneider-Electric

B

1.1 Principe

Un programme écrit en langage à contacts se compose d'une suite de réseaux exécutés séquentiellement par l'automate.

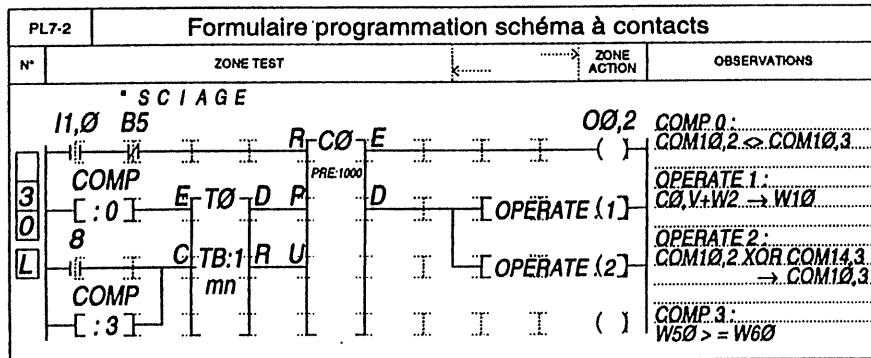
Dessiné entre deux barres de potentiel, un réseau est un ensemble d'éléments graphiques représentant :

- les entrées/sorties de l'automate (boutons-poussoirs, détecteurs, relais, voyants...),
- des fonctions d'automatismes (temporisateurs, compteurs...),
- des opérations arithmétiques et logiques et des opérations de transfert,
- les variables internes de l'automate (bits, mots, etc).

Ces éléments graphiques sont reliés entre eux par des connexions horizontales et verticales, définissant ainsi des "réseaux de contacts".










Chaque réseau ainsi constitué comporte au plus 4 lignes et 10 colonnes et s'organise en 2 zones :





- la zone test, dans laquelle figurent les conditions nécessaires à une action,
- la zone action, qui sanctionne le résultat consécutif à un enchaînement de test.



Demi-page
intentionnellement vide

2.1 Les éléments graphiques de base

Désignation	Graphe	Fonctions
Eléments de test	• Contact à fermeture (direct) 	Contact passant quand l'objet bit qui le pilote est à l'état 1.
	• Contact à ouverture (indirect) 	Contact passant quand l'objet bit qui le pilote est à l'état 0.
Eléments de liaison	• Connexion horizontale 	Permet de relier en série les éléments graphiques de test et d'action entre les deux barres de potentiel.
	• Connexion verticale 	Permet de relier en parallèle les éléments graphiques de test et d'action.
Eléments d'action	• Bobine directe 	L'objet bit associé prend la valeur du résultat logique de la zone test.
	• Bobine inverse 	L'objet bit associé prend la valeur inverse du résultat logique de la zone test.
	• Bobine d'enclenchement 	L'objet bit associé est mis à 1 et garde cet état, lorsque le résultat de la zone test est à 1. Il est remis à 0 par la bobine de déclenchement.
	• Bobine de déclenchement 	L'objet bit associé est mis à 0 et garde cet état, lorsque le résultat de la zone test est à 1. Il est remis à 1 par la bobine de d'enclenchement.
	• Bobine saut à un autre réseau (JUMP) maximum 42 	Permet un branchement à un réseau étiqueté, amont ou aval. Les sauts ne sont effectifs qu'au sein d'une même entité de programmation (programme principal, traitement préliminaire...) L'exécution d'un saut provoque : <ul style="list-style-type: none"> • l'arrêt de la scrutation du réseau en cours, • l'exécution du réseau étiqueté demandé, • la non scrutation de la partie du programme située entre l'action de saut et le réseau désigné. L'instruction de saut n'est pas permise en tâche rapide.

Désignation	Graphe	Fonctions
Eléments d'action (suite)	• Bobines sauvegardées 	Bobines sauvegardées en cas de coupure secteur. Les états des objets bits associés sont sauvegardés durant le premier tour de cycle.
		
		
		

Nota : les bobines non sauvegardées sont maintenues à 0 pendant le premier tour de cycle de reprise.

3.1-4 Réseau de contacts

Sa représentation est proche de celle d'un schéma électrique à relais.

Les éléments graphiques simples de test et d'action occupent chacun une ligne et une colonne au sein d'un réseau.

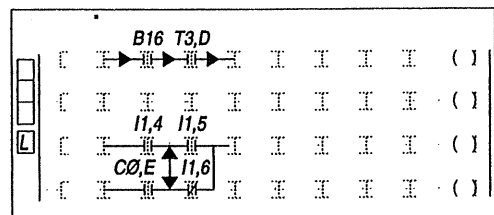
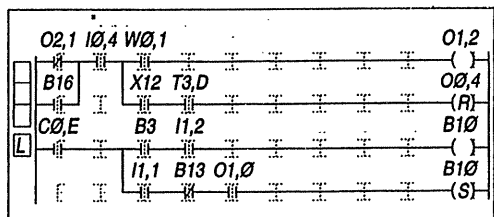
Toute ligne de contact commencée à gauche doit conduire à droite.

Les tests sont toujours situés sur les colonnes 1 à 9.

Les actions sont toujours situées sur la colonne 10.

Le sens de circulation du courant est le suivant :

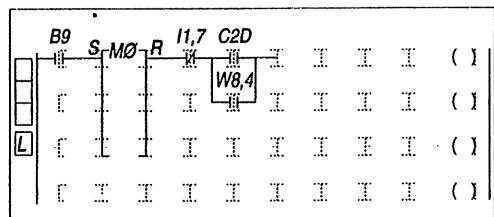
- pour les liaisons horizontales, de la gauche vers la droite,
- pour les liaisons verticales, dans les deux sens.



• Zone test

On y trouve :

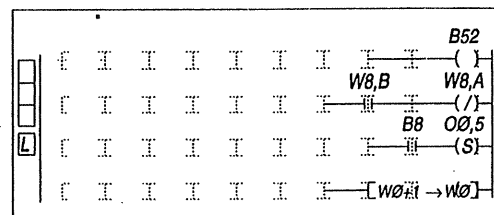
- les contacts, auxquels peuvent être affectés tous les objets bits définis précédemment,
- les blocs fonctions,
- les blocs comparaison.



• Zone action

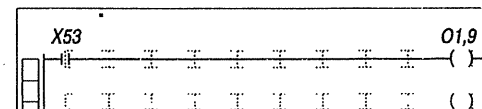
On y trouve :

- les bobines directes, inverses, d'enclenchement et de déclenchement, qui peuvent être affectées de tous les objets bits pouvant être écrits par l'utilisateur.
- les blocs opérations.

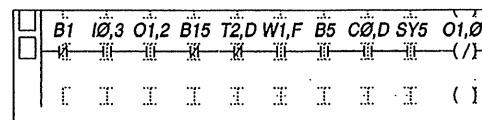


Réseau simple

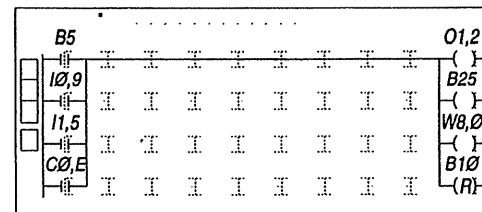
Pilotage d'une bobine conditionnée par un contact.



Utilisation de 9 contacts maximum en série sur une ligne.



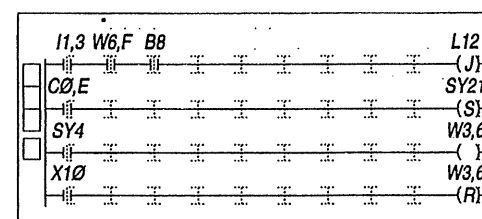
Possibilité de tester 4 contacts maximum en parallèle sur une colonne, de placer 4 bobines en parallèle.



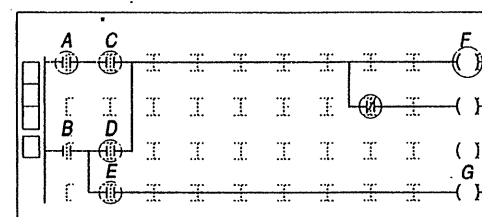
Réseau utilisant plusieurs chaînes de contacts

Un réseau peut être divisé en plusieurs chaînes de contacts indépendantes pilotant des bobines indépendantes

4 lignes indépendantes de 9 contacts.



Réseaux utilisant les différents principes énoncés. Les éléments à l'état logique 1 sont cerclés. Le courant peut passer des éléments A et C vers la bobine F, il ne peut pas passer de l'élément C vers les éléments D et E. La bobine G n'est pas activée.



B

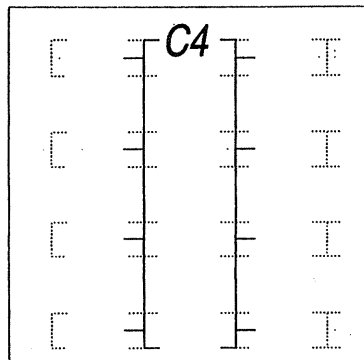
B

3.1-5 Réseau de contacts avec blocs fonctions et opérations

- Les blocs fonctions se positionnent dans la zone test et s'insèrent dans un réseau de contacts.

Il existe trois dimensions de graphisme pour représenter l'ensemble des autres blocs fonctions du langage PL7-2 :

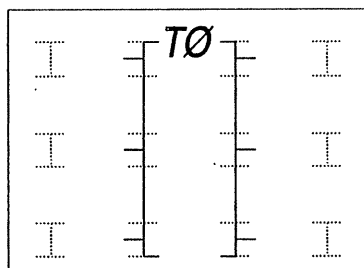
Compteur/Décompteur 2 colonnes
 Compteur/Temporisateur rapide 4 lignes
 Bloc texte



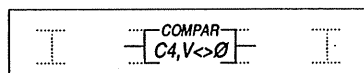
B

B

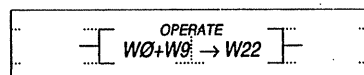
Temporisateur Monostable 2 colonnes
 Registre 3 lignes
 Programmateur cyclique
 Horodateur



Comparateur 2 colonnes
 1 ligne



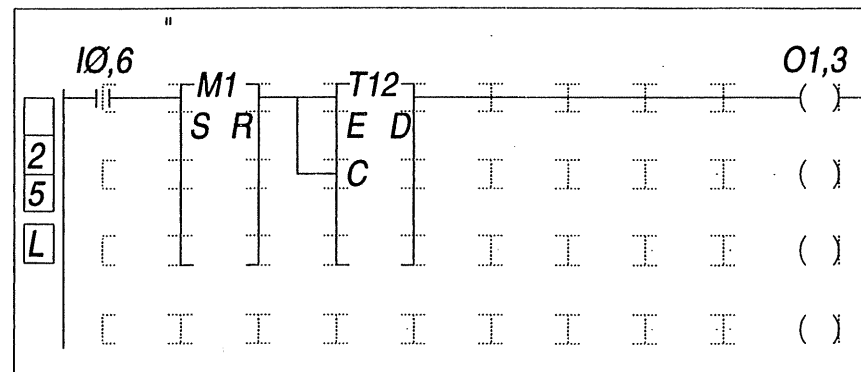
- Les blocs opérations se positionnent toujours en zone action. Ils utilisent 1 ligne et 3 colonnes et sont toujours directement reliés à la barre de potentiel droite.



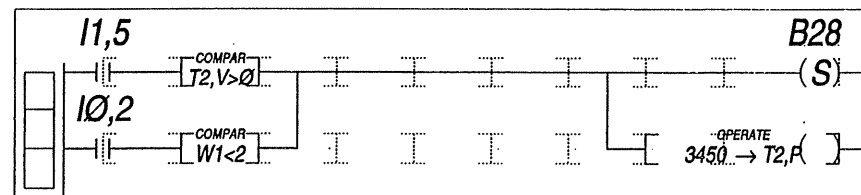
Les blocs fonctions sont "cascadables"

Comme pour les éléments graphiques du type contacts, il est possible de réaliser des combinaisons de blocs fonctions.

Mise en série de blocs fonctions :



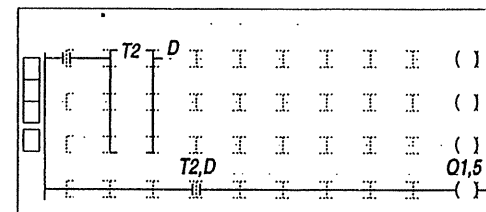
Les blocs fonctions et blocs opérations sont mixables



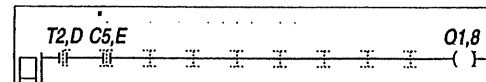
Autres possibilités des blocs fonctions

Quel que soit le type de bloc fonction utilisé, il doit obligatoirement être relié en entrée à la barre de potentiel gauche, en direct ou à travers d'autres éléments graphiques.

- sorties "en l'air" : il n'est pas nécessaire de relier à d'autres éléments graphiques les sorties des blocs fonctions.



- sorties testables : les sorties des blocs fonctions sont accessibles à l'utilisateur sous forme d'objet bit.

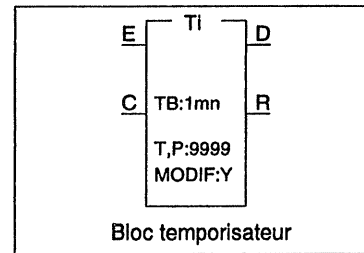


4.1 Bloc fonction : Temporisateur

4.1-1 Présentation

Le bloc fonction temporisateur permet de commander avec retard des actions spécifiques.

La valeur de ce retard est programmable et peut être modifiable ou non en mode REGLAGE.



4.1-2 Caractéristiques

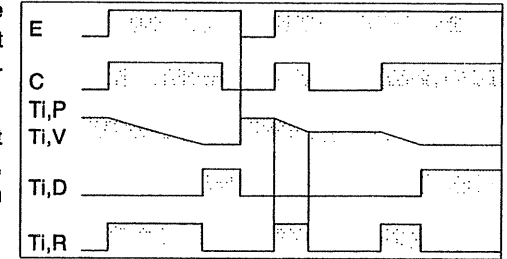
Numéro temporisateur	R (Running)	TSX 17-20	TSX 27/47
Nombre		32 (T0 à T31)	16 (T0 à T15)
Base de temps	TB	1mn, 1s, 100ms, 10ms (1mn par défaut) Plus la base de temps est faible, plus la précision du temporisateur sera grande.	
Valeur courante	Ti,V	Mot qui décroît de Ti,P vers 0 sur écoulement du temporisateur. Peut être lu, testé, mais non écrit ⁽¹⁾ .	
Valeur de présélection	Ti,P	0 < Ti,P < 9999. Mot qui peut être lu, testé, et écrit par programme. Est mis à la valeur 9999 par défaut	
Modification MODIF	YES/NO	YES : possibilité de modification de la valeur de présélection Ti,P en mode REGLAGE. NO : pas d'accès en mode réglage.	
Entrée "Armement"	E (Enable)	Sur état 0 réinitialise le temporisateur Ti,V = Ti,P	
Entrée "Contrôle"	C (Control)	Sur état 0 gèle la valeur courante Ti,V. Doit être à 1 durant l'écoulement.	
Sortie "Temporisateur écoulé"	D (Done)	Le bit associé Ti,D = 1, si temporisation écoulée Ti,V = 0	
Sortie "Temporisateur en cours"	R(Running)	Le bit associé Ti,R = 1 si temporisateur Ti,P > Ti,V > 0 et si entrée C est à l'état 1	
Dimension dans un réseau de contacts		2 colonnes de contacts sur 3 lignes	

⁽¹⁾ Ti,V peut être modifiée par terminal en mode REGLAGE.

4.1-3 Fonctionnement

Le temporisateur évolue lorsque ses 2 entrées (E et C) sont à l'état 1. Il se comporte comme un décompteur.

- la valeur courante Ti,V décroît de la présélection Ti,P vers 0, d'une unité à chaque impulsion de la base de temps TB.
- le bit de sortie Ti,R (Temporisateur en cours) associé à la sortie R est alors à l'état 1, le bit de sortie Ti,D (Temporisateur écoulé) associé à la sortie D est à l'état 0.
- lorsque la valeur courante Ti,V = 0, Ti,D passe à l'état 1 et Ti,R repasse à l'état 0.



E	0	0	1	1
C	0	1	0	1
Ti,P	Ti,V = Ti,P	Ti,V = Ti,P	Ti,V gelée	Ti,V décroît de Ti,P → 0
Ti,D	0	0	0	1 si Tempo écoulée
Ti,R	0	0	0	1 si Tempo en cours

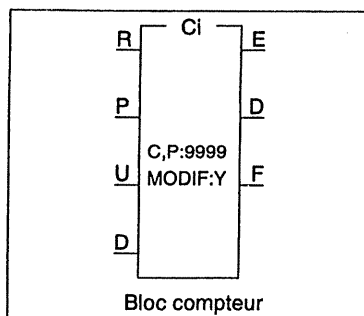
Cas spécifiques

- Incidence d'une reprise "à froid" :** (SY0=1) provoque le chargement de la valeur de présélection (définie en mode CONFIGURATION) dans la valeur courante et la mise à 0 de la sortie Ti,D, la valeur de présélection éventuellement modifiée par le terminal (mode REGLAGE ou DONNEES) étant perdue,
- Incidence d'une "reprise à chaud" :** (SY1) n'a pas d'incidence sur la valeur courante du temporisateur,
- Incidence d'un passage en stop :** le passage en stop de l'automate ne fige pas la valeur courante. Il en va de même lorsque la tâche en cours est désactivée (structure bitâche) ou lors de l'exécution d'un point d'arrêt,
- Incidence d'un saut de programme :** le fait de ne pas scruter le réseau où est programmé le bloc temporisateur ne fige pas la valeur courante Ti,V qui continue à décroître vers 0,
De même les bits Ti,D et Ti,R associés aux sorties D et R du bloc temporisateur conservent leur fonctionnement normal et peuvent être ainsi testés dans un autre réseau.
Par contre les bobines directement "raccordées" aux sorties du bloc ne seront pas activées puisque non scrutées par l'automate,
- Test des bits Ti,D et Ti,R :** ces bits peuvent changer d'état en cours de cycle (voir gestion des bases de temps intercalaire A, page 4/6).

4.2 Bloc fonction : Compteur

4.2-1 Présentation

Le bloc fonction compteur permet d'effectuer le comptage ou le décomptage d'évènements, ces deux opérations pouvant être simultanées ou non.



4.2-2 Caractéristiques

Numéro de compteur	Ci	TSX 17-20	TSX 27/47
Nombre		31 (C0 à C30)	16 (C0 à C15)
Valeur courante	Ci,V	Mot incrémenté ou décrémente en fonction des entrées U et D. Peut être lu, testé mais non écrit.	
Valeur de présélection	Ci,P	0 < Ci,P < 9999. Mot pouvant être lu, testé, écrit.	
Modification MODIF	YES/NO	YES: possibilité de modification de la valeur de présélection en mode REGLAGE. NO: pas d'accès en mode REGLAGE.	
Entrée remise à zéro	R (Reset)	Sur état 1: Ci,V = 0.	
Entrée présélection	P (Preset)	Sur état 1: Ci,V = Ci, P.	
Entrée comptage	U (Up)	Incrémente Ci,V sur front montant.	
Entrée décomptage	D (Down)	Décrémente Ci,V sur front montant.	
Sortie débordement	E (Empty)	Le bit associé Ci,E=1, lorsque décomptage Ci,V passe de 0 à 9999.	
Sortie présélection atteinte	D (Done)	Le bit associé Ci,D=1, lorsque Ci,V=Ci,P.	
Sortie débordement	F (Full)	Le bit associé Ci,F=1 lorsque Ci,V passe de 9999 à 0.	
Dimension à l'écran		2 colonnes de contacts sur 4 lignes	

4.2-3 Fonctionnement.

- **Présélection** : si l'entrée "présélection" est à l'état 1 et l'entrée "remise à zéro" à l'état 0, la valeur courante Ci,V prend la valeur Ci,P et la sortie Ci,D prend la valeur 1.
 - **Remise à zéro** : dès la mise à l'état 1 de cette entrée, la valeur courante Ci,V est forcée à 0, les sorties Ci,E, Ci,D et Ci,F sont à 0. L'entrée "remise à zéro" est prioritaire.
 - **Comptage** : à l'apparition d'un front montant sur l'entrée comptage U, la valeur courante est incrémentée d'une unité. lorsque cette valeur est égale à la valeur de présélection Ci,P, le bit de sortie Ci,D "présélection atteinte" associé à la sortie D passe à l'état 1. le bit de sortie Ci,F (débordement comptage) passe à l'état 1 pendant un tour de programme lorsque Ci,V passe de 0 à 9999.
 - **Décomptage** : à l'apparition d'un front montant sur l'entrée "décomptage" D, la valeur courante Ci,V est décrémente d'une unité. Le bit de sortie Ci,E (débordement décomptage) passe à l'état 1 pendant un tour de programme lorsque Ci,V passe de 0 à 9999.
 - **Comptage/Décomptage** : pour utiliser simultanément les fonctions comptage et décomptage, il est nécessaire de commander les deux entrées correspondantes U et D; ces deux entrées étant scrutées successivement. Si les deux entrées sont à 1 simultanément, la valeur courante reste inchangée.
- Cas spécifiques.**
- **Incidence d'une "reprise à froid"** : (SY0=1) provoque la mise à zéro de la valeur courante Ci,V. La valeur de présélection éventuellement modifiée par le terminal (mode REGLAGE ou DONNEES) étant perdue. Les bits de sorties Ci,E, Ci,D et Ci,F sont à 0.
 - **Incidence d'une reprise à chaud (SY1) ou d'un passage en STOP** : n'a pas d'incidence sur la valeur courante du compteur (Ci,V).

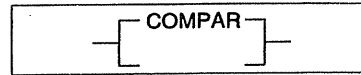
B

4.3 Bloc fonction : comparateur

4.3-1 Présentation

Le bloc "comparaison" permet d'effectuer les tests suivants :

- supérieur >
- inférieur <
- égal =
- supérieur ou égal >=
- inférieur ou égal <=
- différent <>

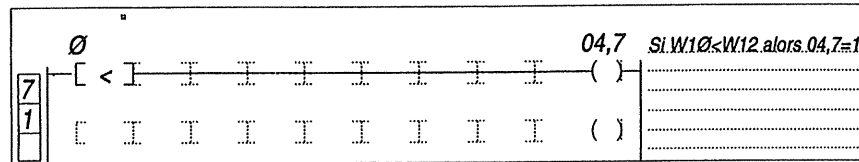


4.3-2 Caractéristiques

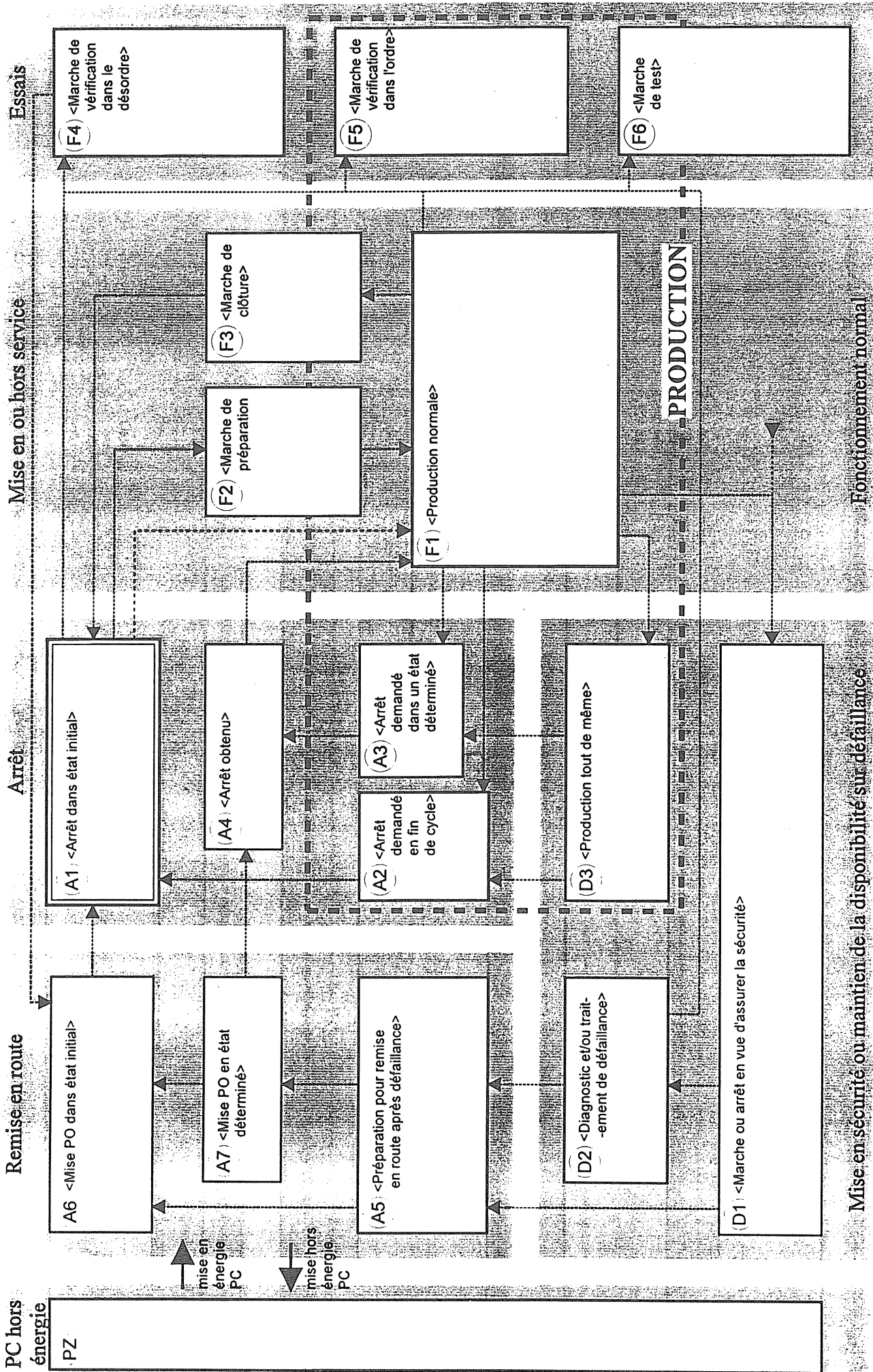
Nombre		TSX 17-20	TSX 27/47
		Non limités et programmables en zone test.	
Objet à comparer	OP1	Tout objet mot (opérande 1)	
Type de comparaison	SIGNE	>, <, >=, <=, <>.	
Valeur de comparaison	OP2	Tout objet mot ou valeur immédiate (opérande 2)	
Dimension à l'écran		2 colonnes de contacts sur 1 ligne.	

Exemple

L'exemple ci-dessous montre la comparaison entre deux mots



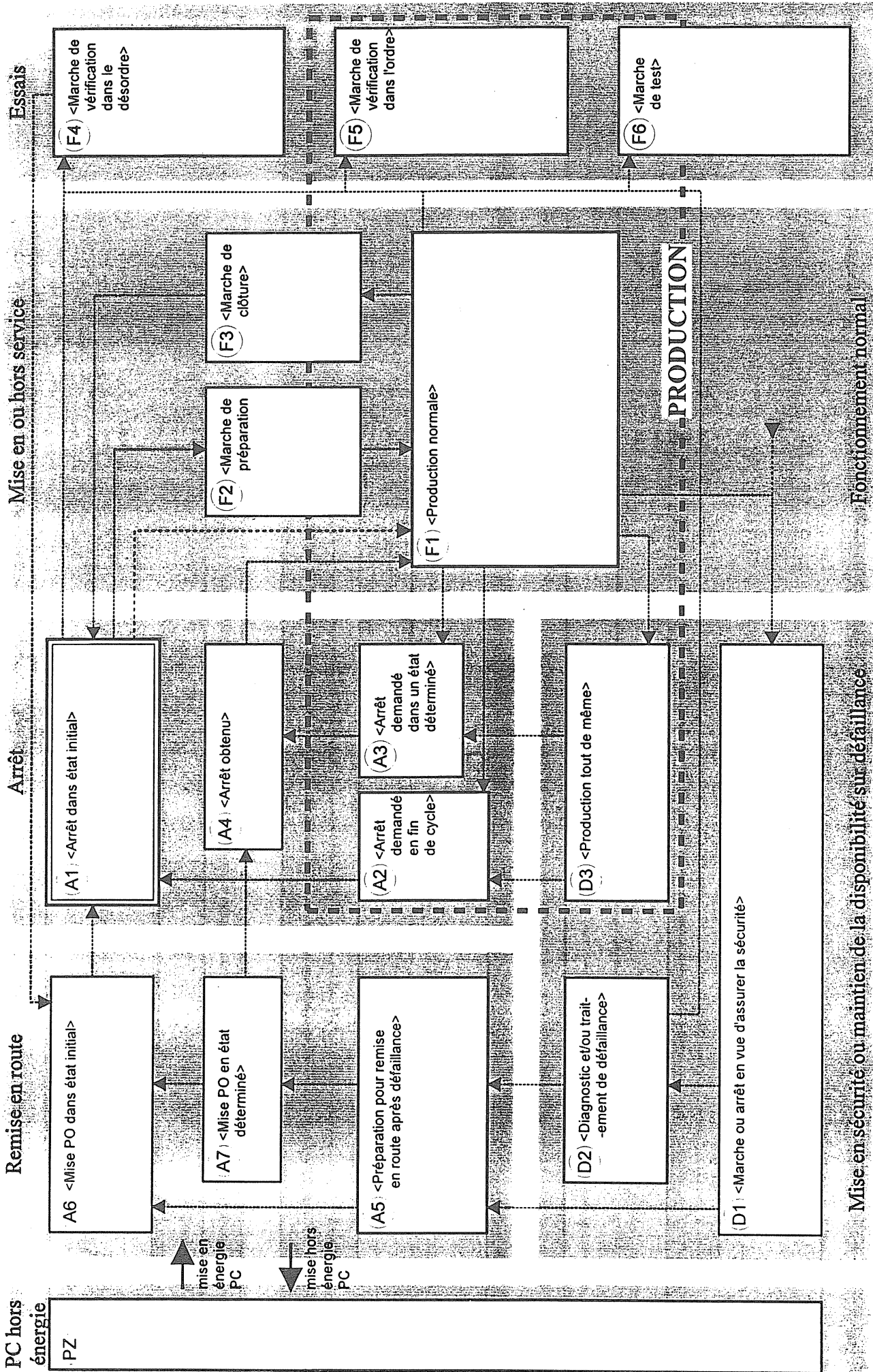
DOCUMENT-RÉPONSE



Mise en sécurité ou maintien de la disponibilité sur défaillance

Machine à découper à grande vitesse par faisceau laser : GEMMA global ou du sous-ensemble :

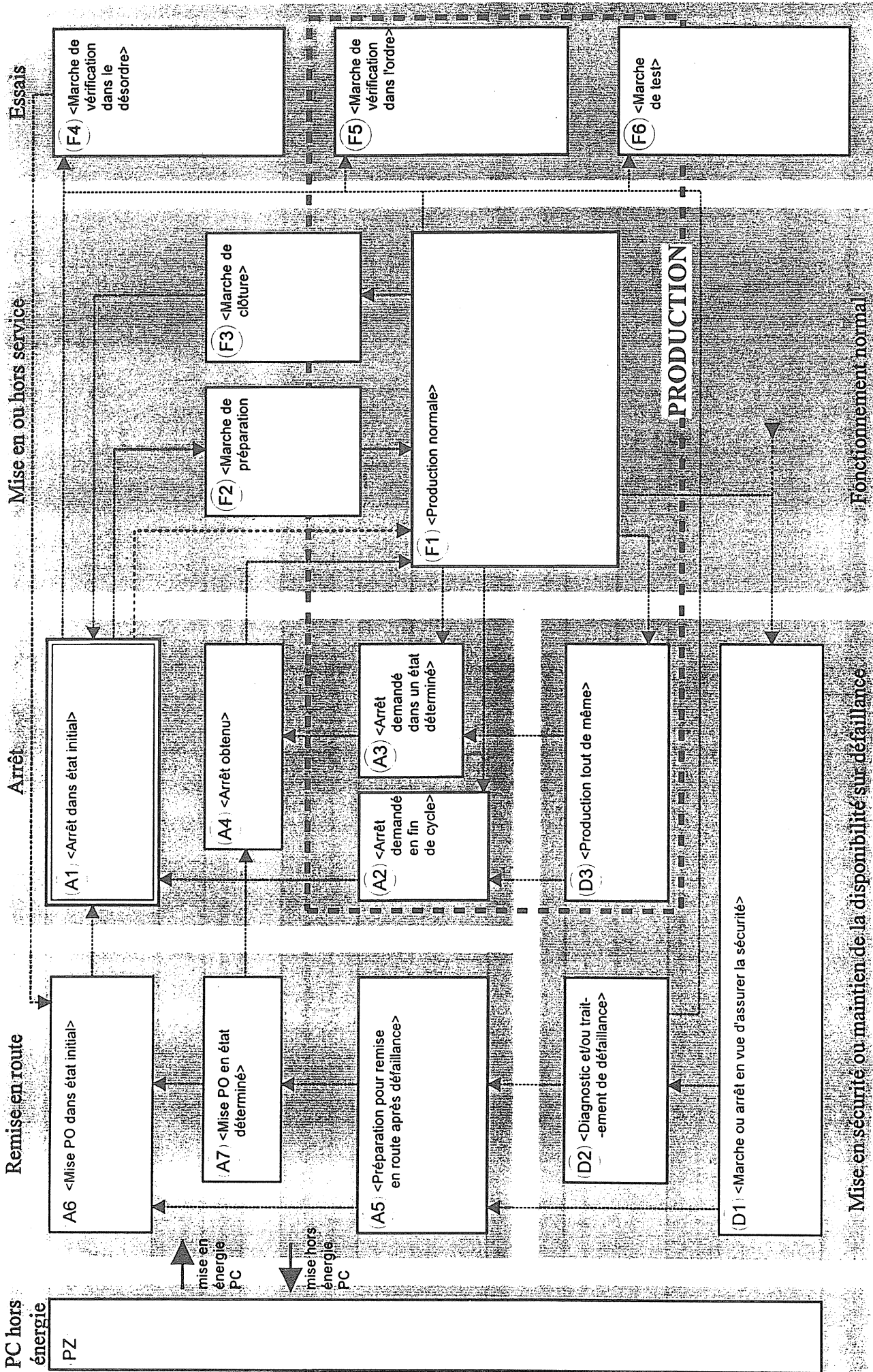
DOCUMENT-RÉPONSE



Mise en sécurité ou maintien de la disponibilité sur défaillance

Machine à découper à grande vitesse par faisceau laser : GEMMA global ou du sous-ensemble :

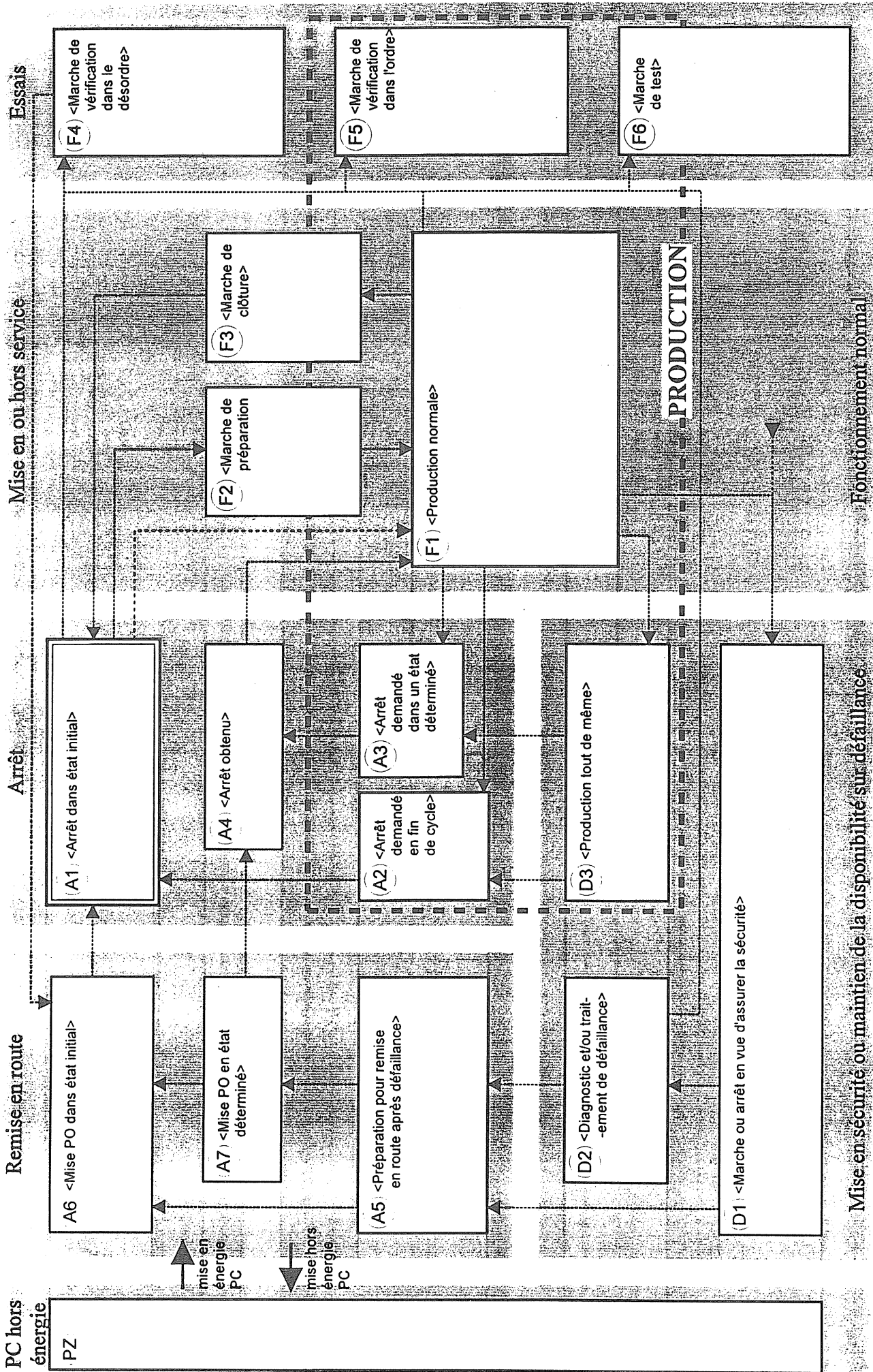
DOCUMENT-RÉPONSE



Mise en sécurité ou maintien de la disponibilité sur défaillance

Machine à découper à grande vitesse par faisceau laser : GEMMA global ou du sous-ensemble :

DOCUMENT-RÉPONSE



Mise en sécurité ou maintien de la disponibilité sur défaillance

Machine à découper à grande vitesse par faisceau laser : GEMMA global ou du sous-ensemble :