

● **Réalisation câblée d'une commande (électromécanique).**

D'une manière générale, il faut retenir que :

- la partie commande est construite progressivement par assemblage et interconnexions de composants ou constituants;
- les contacts autorisant la marche sont des contacts à établissement de circuit et sont montés en parallèle (fonction «OU»);
- les contacts provoquant l'arrêt sont des contacts à interruption de circuit et sont montés en série (fonction NI);
- l'effet mémoire est obtenu à partir de l'alimentation de la bobine par l'intermédiaire de l'un de ses propres contacts (KA1);
- la mémoire réalisée est une mémoire à désactivation prioritaire. En effet, en cas d'appuis simultanés sur les boutons (ou de coupure de la ligne), le relais (contacteur) n'est pas (ou plus) alimenté et la réactivation réclame une action volontaire de l'opérateur.

● **Réalisation programmée d'une commande (automate programmable industriel).**

La grande majorité des constructeurs d'API proposent aujourd'hui des ateliers logiciels conformes à la norme des langages de programmation CEI 61131-3.

Cette norme a permis de standardiser :

- la terminologie (reprise à chaud, à froid, instance, délimiteur, double mot,...);
- les types de données, les symboles utilisés, l'identification des variables (entrées, sorties, mémoire interne);
- les langages.

Les langages utilisés sont :

- le langage liste d'instructions IL;
- les langages graphiques LD et FBD;
- le langage littéral ST;
- et le langage SFC inspiré du GRAFCET.

Il est important de ne pas confondre le langage de spécification du comportement GRAFCET (CEI60848) et le SFC qui est un langage de programmation des API.

L'ampleur des programmes développés dans les API et la variété des tâches logicielles à assurer (gestion du cycle machine, sécurités, surveillance, supervision, commande d'axe, régulation, ...) nécessitent l'utilisation d'une approche structurée. Elle facilite l'écriture du programme de l'application, ses modifications et sa réutilisation par une organisation modulaire.

La norme met en œuvre ces principes par l'intermédiaire de la notion de module logiciel.

Il existe trois types de modules logiciels écrits dans les langages normalisés :

- la fonction;
- le bloc fonctionnel;
- et le programme.

Plusieurs langages différents peuvent être utilisés dans une même application.

# 9

# Communication

## I. Les réseaux industriels

Un réseau est un ensemble de systèmes informatiques interconnectés (ordinateurs, automates programmables, constituants informatisés, etc.) qui communiquent pour pouvoir partager des données, des applications logicielles et des équipements.

Les réseaux sont utilisés dans des domaines aussi variés que :

- la production de biens d'équipements industriels ou non ;
- les industries de transformation ;
- la santé ;
- les transports ;
- les loisirs ;
- la gestion technique de bâtiments ;
- le tertiaire (bureautique) ;
- les services techniques notamment ceux s'appuyant sur l'Internet.

La standardisation des matériels, les normes récentes et les efforts faits par les constructeurs pour simplifier les mises en œuvre des réseaux ont facilité leurs essors dans le secteur industriel où ils participent :

- au pilotage (par exemple : systèmes experts reliés aux commandes d'une installation pour optimiser un fonctionnement) ;
- à la surveillance (par exemple : supervision) ;
- et à la commande (A.P.I. reliés en réseau pour coordonner des fonctionnements, liaison d'interfaces homme - machine, bus de terrain permettant de relier des capteurs, des actionneurs, des variateurs de vitesses, ...), des systèmes automatiques.

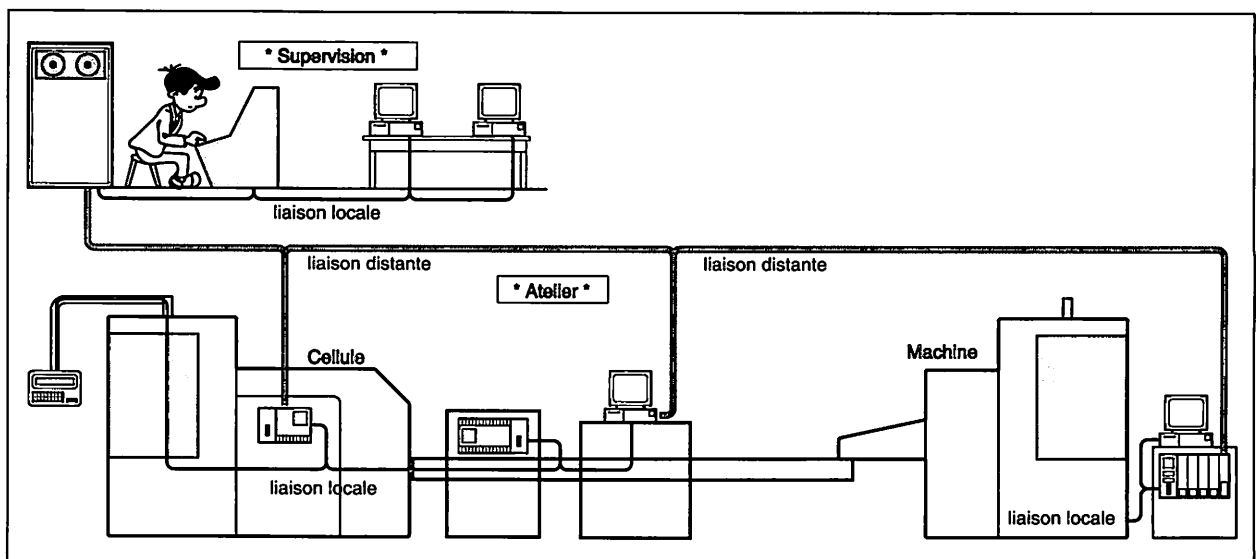


Figure 9.1. Dialogue entre divers systèmes de traitement de l'information dans le secteur industriel.

Les liaisons de la partie commande avec le pupitre ou la console d'exploitation, le terminal local de programmation ou de diagnostic sont appelées liaisons locales (Figure 9.1). Les liaisons entre parties commandées, entre parties commandées et terminaux déportés sont des liaisons distantes.

Les réseaux industriels permettent également de relier des constituants aussi divers que des variateurs de vitesse, des pupitres opérateurs, des écrans de supervision, des terminaux de dialogue, des modules d'entrées/sorties (Figure 9.2).

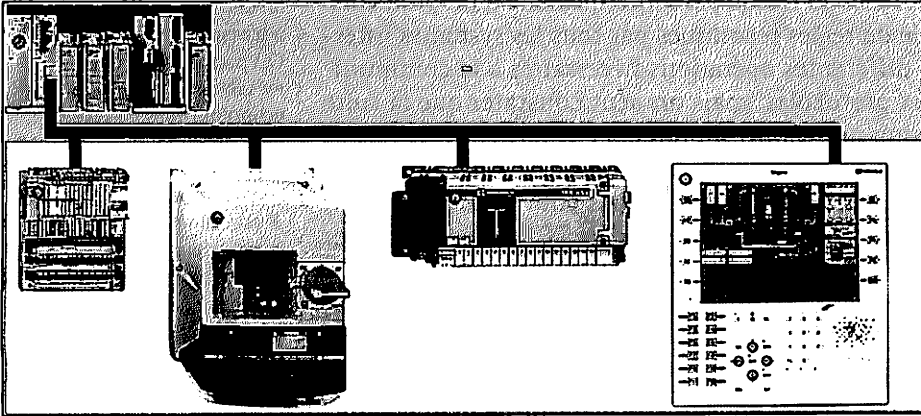


Figure 9.2. Dialogue entre divers constituants d'automatismes (doc. Schneider).

## 1. Les différents types de réseaux

### a) Architecture matérielle

L'architecture matérielle la plus couramment rencontrée est constituée de trois niveaux (Figure 9.3).

Le premier niveau est celui qui permet de gérer au plus près les entrées et les sorties du système automatique, on utilise alors un **bus de terrain** ou un **bus capteurs/actionneurs**. À ce niveau les exigences portent surtout sur les temps de réponses.

Le second niveau est destiné à faciliter l'échange de données entre des automates programmables industriels pour la coordination des fonctionnements de diverses parties de l'installation (**c'est un réseau inter-automates**). Des marches de replis sont souvent prévues dans le cas où le réseau inter-automates est défaillant.

Le troisième niveau (**réseau informatique**) permet de recueillir toutes les données utiles pour alimenter le système d'information de production de l'entreprise (surveillance des données de production, pannes, ...) et pour piloter les différentes commandes de manière à optimiser les fonctionnements (systèmes experts). Le débit d'informations à échanger peut être important et le réseau choisi doit pouvoir le permettre.

Le réseau Ethernet, qui s'appuie sur une norme tout en étant très répandu et aisé à mettre en œuvre, est de plus en plus utilisé à ces deux derniers niveaux pour assurer la communication entre les ordinateurs et entre les A.P.I... Le réseau Ethernet autorise des débits de 10 Mbps à 1Gbps (soit 10 à 1 000 mégabits par seconde).

Un accès via Internet est parfois requis pour pouvoir faire de la surveillance à distance, du pré-diagnostic de panne avant une intervention ou de l'aide à la maintenance.

Dans une architecture réseaux, chaque constituant connecté à un réseau doit pouvoir être repéré sans ambiguïté par le système de commande, pour cela on utilise une adresse. De même, il doit échanger des données avec des règles communes et partagées avec les autres constituants, c'est le protocole.

**b) Protocole**

Lorsqu'un système travaille en réseau, ses applications doivent dialoguer avec les applications d'autres systèmes reliés au réseau par l'intermédiaire d'un protocole. Ce protocole est un ensemble de règles reconnues par tous les systèmes interconnectés pour effectuer les différentes opérations nécessaires à la communication. Il existe de nombreux protocoles, mais on peut constater que la suite de protocoles TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) se généralise dans les applications classiques liées à l'informatique pour la communication ainsi que dans les applications industrielles pour la commande et le pilotage des procédés. Devenu un standard, le rôle de TCP/IP est d'assurer la compatibilité entre tous les logiciels supportant ces protocoles, quels que soient les fournisseurs, les logiciels ou les matériels (interopérabilité).

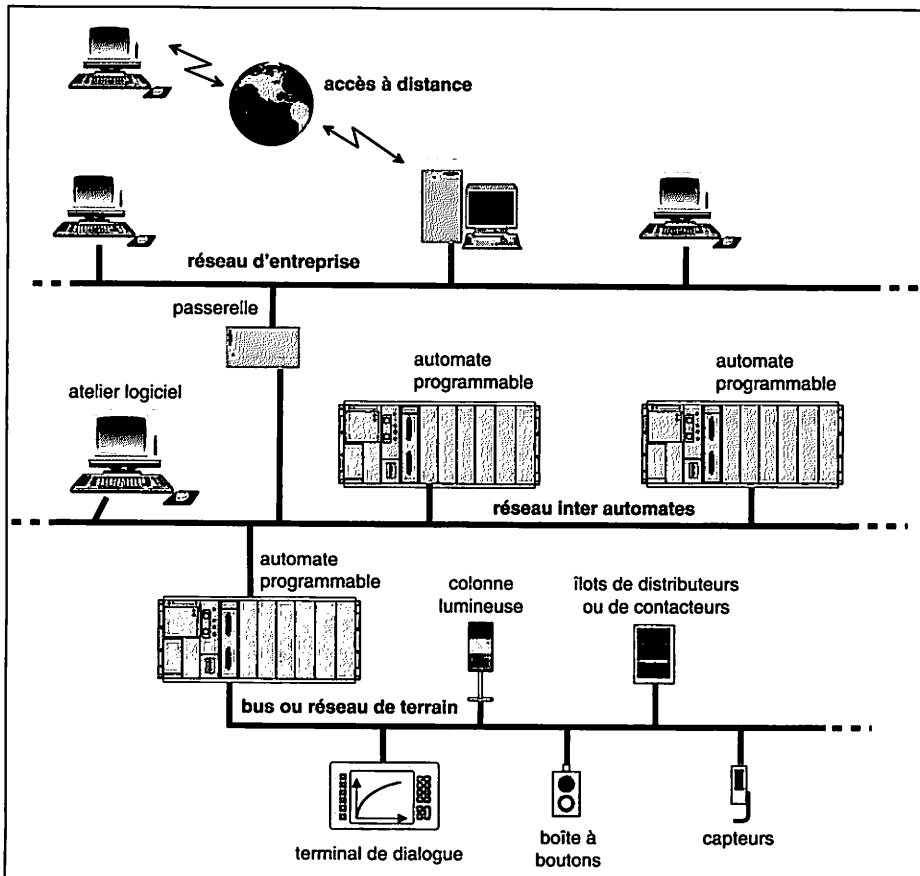
**c) Adresse**

Chaque constituant relié à un réseau doit pouvoir être identifié de manière univoque. Il est donc nécessaire de lui allouer une adresse logique qui peut être modifiée d'une application à une autre.

Par exemple dans le cas d'automates programmables industriels reliés par un réseau Ethernet utilisant le protocole TCP/IP, le coupleur Ethernet de chaque automate programmable devra être configuré avec une adresse IP (par exemple : 192.168.1.2, 192.168.1.3, etc.).

**REMARQUE**

Le protocole TCP/IP peut se caractériser par un découpage des données à transmettre en « paquets ». Ces paquets sont envoyés en suivant des parcours différents dans un réseau local ou sur l'Internet et sont regroupées à l'arrivée. Lorsqu'un paquet manque, il est redemandé par le récepteur et il suit automatiquement un autre chemin.



**REMARQUE**

Malgré la standardisation et la normalisation, de nombreux réseaux propriétaires (propres à un constructeur) sont encore utilisés. Ces réseaux constructeurs autorisent toutefois la connexion à d'autres réseaux.

Figure 9.3. Différents types de réseaux dans une installation industrielle.

## 2. Exemple de bus de terrain

En termes de conception, de réalisation (câblage) et de maintenance les solutions avec bus de terrain cumulent beaucoup d'avantages.

La figure 9.4 montre un exemple comparatif entre une réalisation traditionnelle et une version moderne. En l'occurrence, il s'agit de concevoir et de réaliser les circuits électriques et pneumatiques permettant le pilotage de :

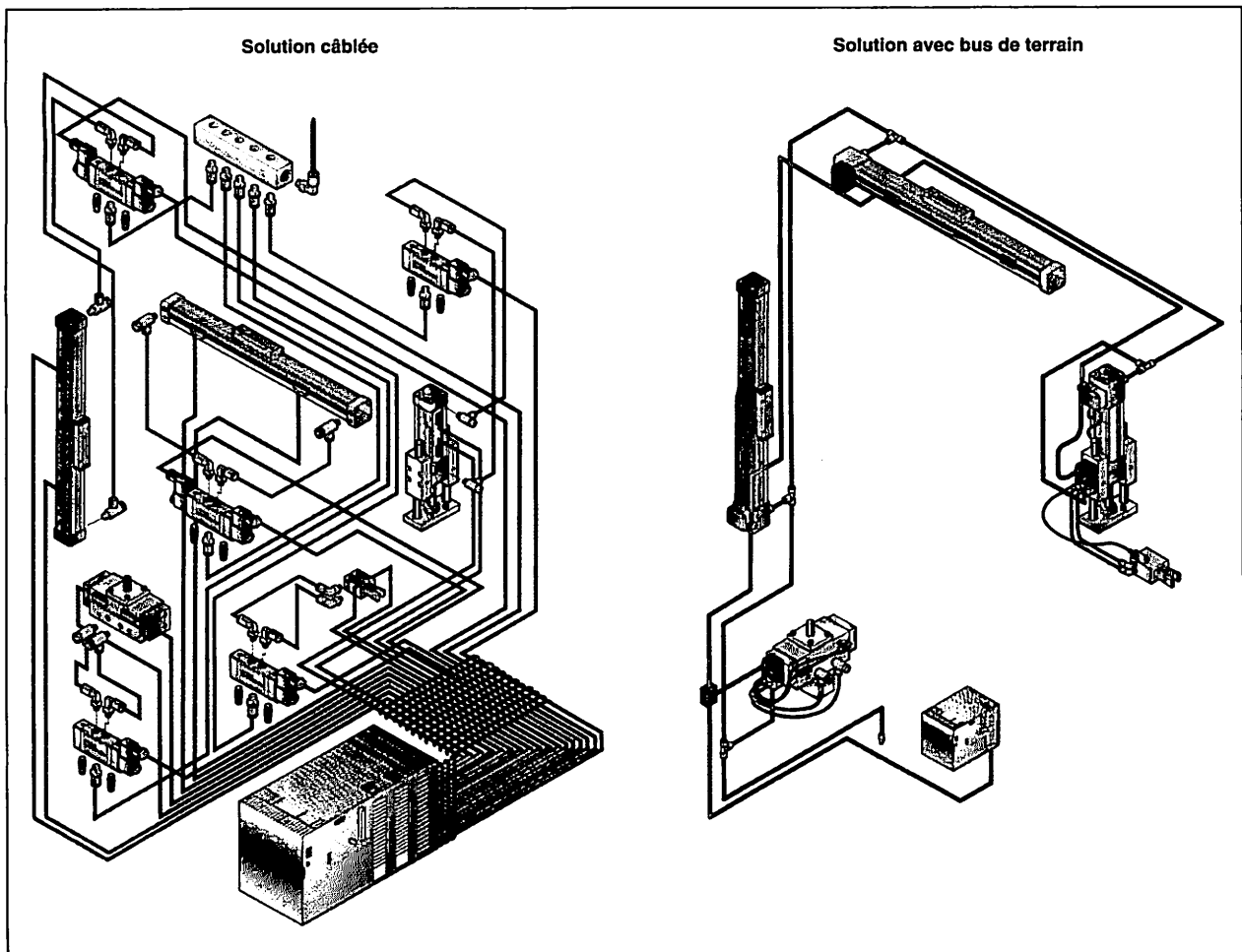
- deux vérins sans tige ;
- un vérin guidé ;
- une pince ;
- un vérin rotatif.

La version traditionnelle implique le câblage de :

- deux distributeurs bistables qui doivent chacun être connectés électriquement et pneumatiquement ;
- trois distributeurs monostables qui doivent chacun être connectés électriquement et pneumatiquement ;
- dix détecteurs.

Dans la version moderne, les actionneurs possèdent leurs distributeurs et leurs détecteurs intégrés avec prise réseau.

Il suffit de les alimenter en énergie pneumatique et de les relier au fil jaune du bus ASi (Actuator Sensor Interface).



**Figure 9.4.** Comparaison des câblages « traditionnel » en fil à fil et « moderne » en réseau ASi (doc. HOERBIGER).

Dans une solution avec bus de terrain, les distributeurs peuvent être regroupés en îlots. La figure 9.5 représente un terminal de distributeurs avec ses entrées sorties et une liaison réseau. Ce terminal peut également recevoir un mini automate programmable qui le rend totalement autonome.

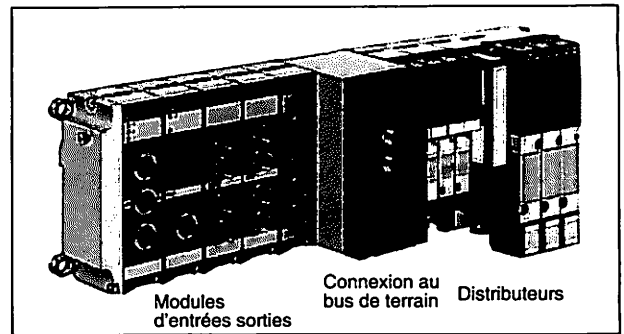


Figure 9.5. Terminal de distributeurs avec entrées sorties électriques et prise réseau (doc. FESTO).

## II Les modes de transmission

### 1. Mode parallèle (principe)

Le plus élémentaire est le mode « fil à fil » où les informations, portées par les signaux, sont transmises dans l'ordre de leur apparition. Cette disposition est celle couramment retenue pour les liaisons avec la partie commande des capteurs, pré-actionneurs, boutons et voyants, etc. Dans ce cas la quantité de conducteurs rend le câblage, le diagnostic et le dépannage très vite complexes. Le repérage des liaisons et des borniers est indispensable, à la fois sur le schéma et sur les composants (Figure 9.6).

Afin de rendre les liaisons parallèles plus universelles, il existe des dispositions matérielles et logicielles qui permettent de faire transiter des informations différentes sur le même ensemble de fils conducteurs qui sont en nombre réduit. Chaque « message » est validé par un ou plusieurs signaux de validation de données (comme « strobe » : validation, « acknowledge » : bien reçu, « busy » : occupé) ; il s'agit alors de transmissions « asynchrones ». Ce mode de transmission est adapté aux liaisons locales.

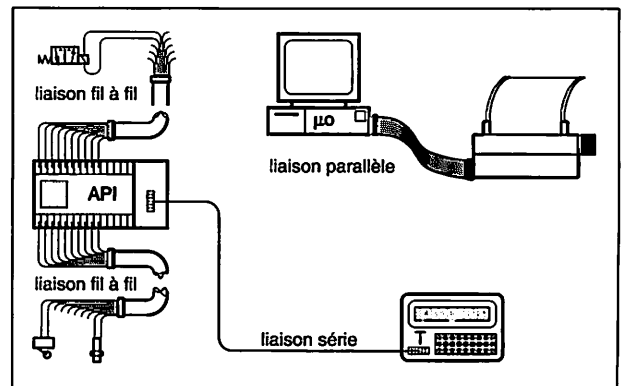


Figure 9.6. Différents types de liaisons.

### 2. Mode série (principe)

#### a) Principe général

L'information est transmise sous forme de « mots » binaires qui sont d'abord codés (par un codeur), puis émis (par un émetteur ou modem) sur une ligne de transmission (à deux fils) en direction d'un récepteur, lui-même suivi d'un décodeur qui restitue le « mot » original (Figure 9.7).

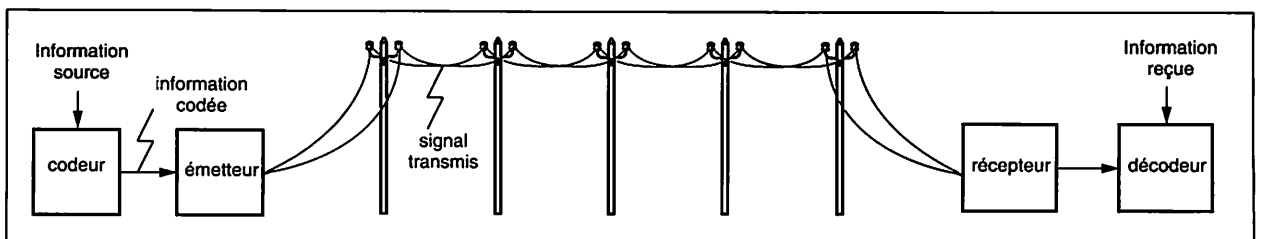


Figure 9.7. Structure générale d'une liaison série.

L'ensemble codeur-émetteur procède à plusieurs opérations :

- la transformation du « mot » binaire parallèle en « mot » binaire série ;
- la fabrication de la « trame » conformément à un « protocole » prédéterminé ;
- le « codage en bande de base » ;
- la transmission en « bande de base », si la distance de transmission est courte, ou en « modulation » d'un signal sinusoïdal pour les longues distances.

À la réception les opérations inverses sont effectuées.

Ce mode de transmission utilise un nombre réduit de liaisons physiques sur lesquelles les données sont transmises successivement.

Pour transmettre un mot binaire (de huit bits par exemple) on envoie successivement chaque bit pendant une durée constante (la base de temps  $\Delta t$ ). Selon le type de codage de base (bande de base), un bit est représenté par (Figure 9.8) :

- un niveau 0 ou 1 (0, 5, 12... volts) lorsque le codage est Tout Ou Rien ;
- un front montant (1) ou descendant (0) en codage biphase (« Manchester »).

De plus, et afin de transmettre l'information sans déformation excessive sur de longues distances, on utilise un signal modulé de type sinusoïdal, ou « porteuse ».

La validation des signaux entre l'émetteur et le récepteur est assurée par des « horloges » (signaux rectangulaires périodiques) de même fréquence à chaque extrémité. Ces deux horloges sont synchronisées afin de bien saisir chaque bit au bon moment. La méthode la plus courante met en œuvre deux horloges de même fréquence à chaque bout de la liaison et un ou plusieurs bits afin de synchroniser l'horloge réceptrice sur l'horloge émettrice.

Une transmission série nécessite donc un traitement électronique et logiciel. Tous ces traitements ajoutent des retards à la transmission des données utiles. Une transmission est ainsi caractérisée par :

- la vitesse de transmission des données utiles, exprimée en bits par seconde (bps) ;
- la vitesse de transmission du signal, en modulations de base par seconde (bauds).

## b) Codage et protocole de transmission

### ● Structure de l'envoi en mode asynchrone (trame)

Il faut indiquer le début du message, c'est le rôle du bit de « start » ; donner le mot à transmettre, donner une indication permettant de détecter les erreurs éventuelles à la réception, c'est le rôle du « bit de parité » ; indiquer la fin du message, c'est le rôle du bit de « stop » (Figures 9.9 et 9.10).

### ● Détection des erreurs (parité, imparité)

Un moyen simple de vérifier la validité d'un message est de lui adjoindre à l'émission un bit supplémentaire indiquant si le nombre de 1 qu'il comporte est pair ou impair : c'est le bit de parité. Si apparaît une discordance entre le nombre de 1 dénombré à la réception et le nombre indiqué par ce bit de parité, c'est qu'il y a eu erreur de transmission. Cette méthode n'est pas opérante si la probabilité d'erreurs est supérieure à 1 bit sur 8.

Il existe alors d'autres méthodes plus performantes, comme la redondance cyclique.

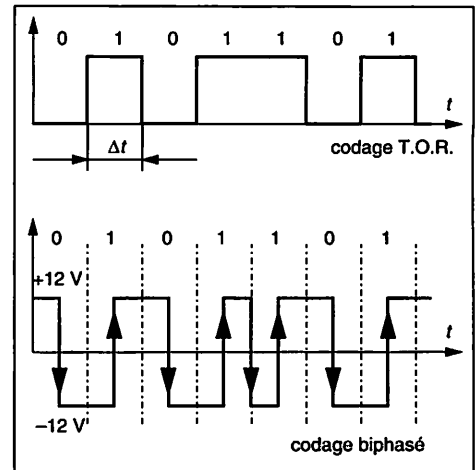


Figure 9.8. Codages de base (bande) pour transmission série.

EXEMPLE

Soit à transmettre le caractère ASCII « R » dont le code binaire est exprimé par un mot binaire de 7 bits : 101 0010. La méthode de parité consiste à ajouter un bit b8 tel que le nombre de « 1 » soit toujours pair. Le mot comportant trois « 1 » dans cet exemple, le bit de parité sera un « 1 ». Le message transmis sera donc : 1101 0010.

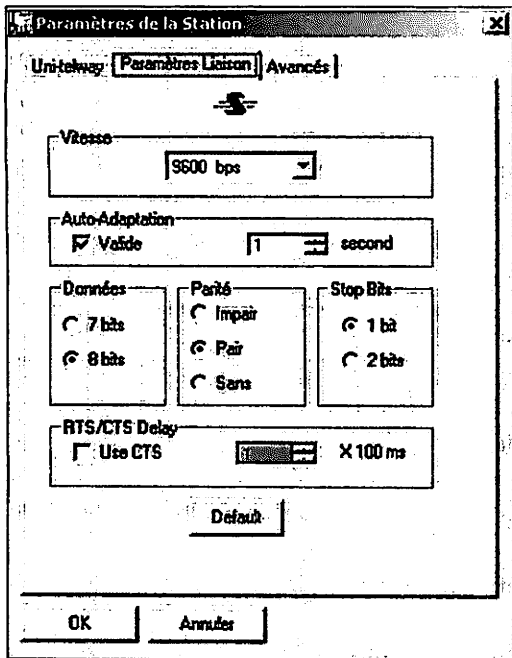


Figure 9.9. Exemple de paramétrage d'une liaison (Schneider).

● Définition de la bande de base

Il s'agit de définir comment se présentera le signal transmis en l'absence de modulation. Il existe principalement deux méthodes :

- le codage Tout Ou Rien, où les bits sont représentés par des niveaux de tension (par exemple NRZ, Figure 9.11 en haut, -V correspond au bit à 1) ;
- le codage biphasé (Manchester), où les bits sont représentés par des fronts (Figure 9.11 en bas).

c) Transmission

● Émission en bande de base

Il est possible de transmettre directement un signal correspondant à la bande de base si la liaison est courte (quelques mètres).

Toute ligne de transmission se comporte en fait comme un circuit RC, dont capacité et résistance dépendent de sa longueur. Le produit RC représente une constante de temps qui limite la fréquence maximale du signal transmissible (voir cours de physique).

● Émission modulée

Pour des liaisons plus longues (10 à 20 mètres) il est possible de moduler un signal porteur sinusoïdal par le signal de bande de base afin de le transmettre sans dégradation. Il existe plusieurs protocoles de modulation : la modulation d'amplitude (Figure 9.12), la modulation de phase et la modulation de fréquence.

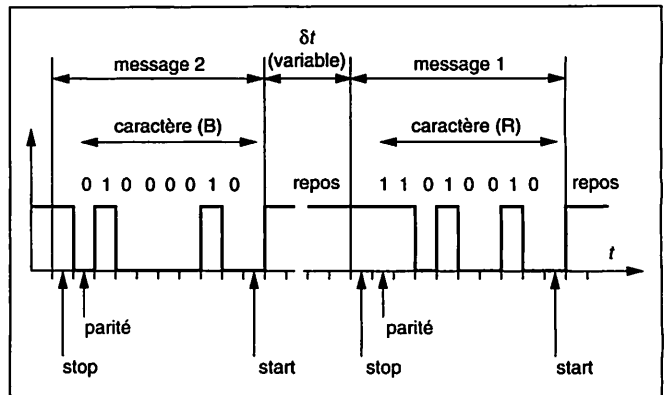


Figure 9.10. Trame d'un envoi.

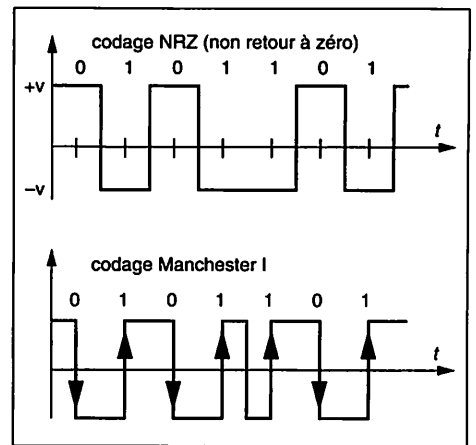


Figure 9.11. Codage NRZ (TOR) et biphasé.



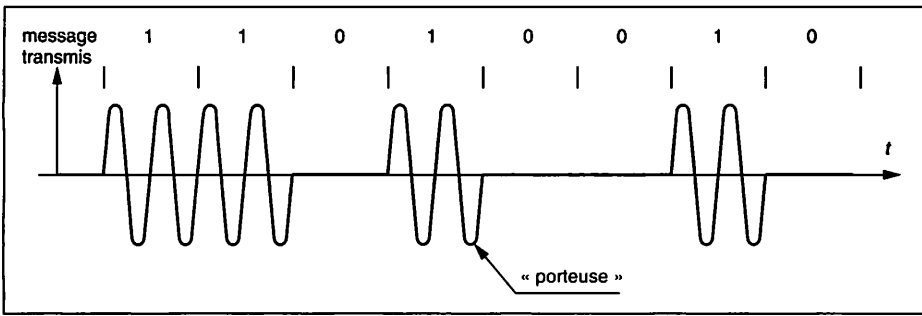


Figure 9.12. Modulation en amplitude du signal.

### ● Boucle de courant

Afin de s'affranchir davantage de la limitation de longueur de liaison il est possible de coder le message par une émission de courant et non plus de tension. On utilise alors un circuit bouclé dans lequel circule un courant de 4 mA (niveau logique 0) ou de 20 mA (niveau logique 1). La distance de transmission sans dégradation de l'information peut atteindre plusieurs centaines de mètres.

### ● Synchronisation

La transmission asynchrone décrite plus haut est limitée à une vitesse de transmission de 9 600 à 19 200 bauds. Le bit de start permet de synchroniser l'horloge du récepteur pour la durée du message (10 bits minimum). En transmission synchrone le délai est constant entre les messages. La synchronisation des horloges est assurée à intervalles réguliers par un caractère de synchronisation (SYN). La vitesse de transmission en mode synchrone varie de 2 400 à environ 115 200 bauds.

## Résumé

- Un **réseau** est un ensemble de systèmes informatiques interconnectés (ordinateurs, automates programmables, constituants informatisés, etc.) qui communiquent pour pouvoir partager des données, des applications logicielles et des équipements.
- Lorsqu'un système travaille en réseau, ses applications doivent dialoguer avec les applications d'autres systèmes reliés au réseau par l'intermédiaire d'un protocole. Ce protocole est un ensemble de règles reconnues par tous les systèmes interconnectés pour effectuer les différentes opérations nécessaires à la communication.
- Chaque constituant relié à un réseau doit pouvoir être identifié de manière univoque. Cette identification est réalisée grâce à une adresse logique.
- Les deux modes de transmission utilisés sont : le **mode parallèle** et le **mode série**.

### REMARQUE

En local, pour la communication entre systèmes de traitement de l'information et certains de leurs périphériques, jusqu'aux années 90, la liaison série ne pouvait convenir qu'aux liaisons à bas débit. Depuis, un groupement de constructeurs a défini un nouveau standard de bus série, l'USB (Universal Serial Bus), qui permet des débits bien plus importants (480 Mbps au total dans la version 2.0), mais aussi de véhiculer l'énergie nécessaire au fonctionnement du périphérique. Ce standard devrait s'affirmer comme le principal type de liaison série des années à venir.

# 10

# Chaîne d'action pneumatique

## I. La chaîne d'action pneumatique

### 1. La chaîne d'action pneumatique et ses constituants

La chaîne d'action est constituée des fonctions génériques :

Alimenter, Distribuer, Convertir, Transmettre qui contribuent à la réalisation d'une action (Figure 10.1).

L'action à réaliser impose un flux d'énergie pneumatique (sens et niveau) que le système doit transmettre et gérer par sa commande. Les performances dépendent des caractéristiques des divers constituants.

L'air comprimé est produit par un ou plusieurs compresseurs (compresseur simple à piston, compresseurs à vis, etc). Le type et la taille du compresseur dépendent du débit d'air à fournir, et notamment du nombre et des caractéristiques des chaînes d'énergie pneumatique susceptibles d'être utilisées simultanément dans un ou plusieurs systèmes automatiques.

L'air transite ensuite par les différents éléments constitutifs de la chaîne d'énergie pneumatique (Figure 10.1) :

- les modules de conditionnement, qui rendent l'air propre à l'utilisation ;
- les modules de mise en et hors énergie, essentiels pour assurer la sécurité des biens et des personnes (arrêt d'urgence, interventions de maintenance ou de réglage) ;
- les distributeurs qui sont les pré-actionneurs pneumatiques (voir **FICHE MÉTHODE 8**) ;
- enfin les actionneurs, éventuellement pourvus de composants auxiliaires (voir **FICHE TECHNIQUE 6**).

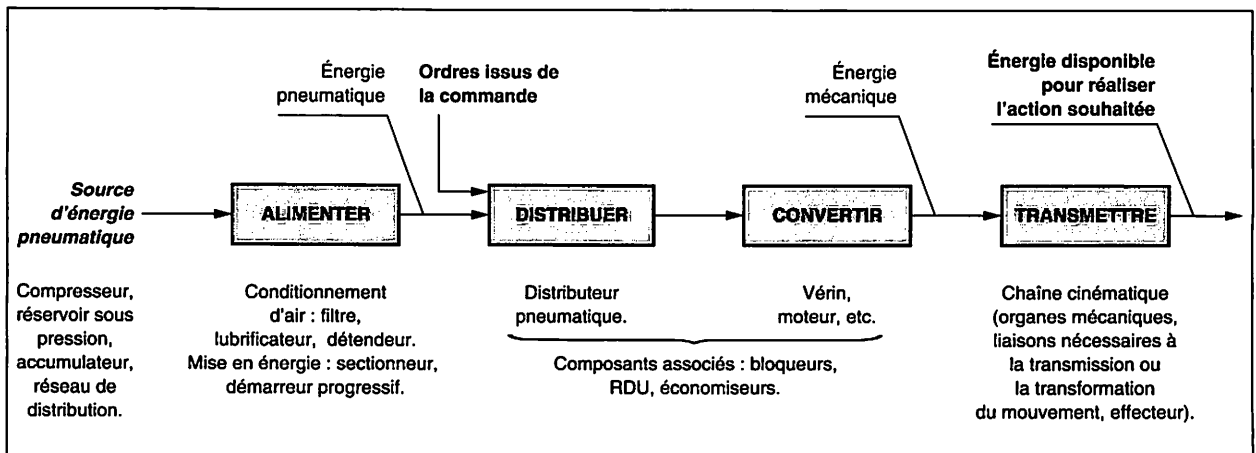


Figure 10.1. La chaîne d'action pneumatique et ses constituants principaux.

## 2. L'énergie pneumatique

### ● Le fluide pneumatique

L'air présente des caractéristiques physiques qui rendent difficile toute modélisation du comportement de la chaîne d'énergie pneumatique : d'une part il est très compressible, d'autre part il s'échauffe lorsqu'on le compresse (et inversement) et enfin sa masse volumique varie avec la température. En première approximation, il est courant d'admettre qu'il obéit à l'équation d'état des gaz parfaits (lois de Boyle-Mariotte et de Gay-Lussac) :  $\frac{PV}{T} = C^{te}$  avec  $P$ , pression,  $V$ , volume et  $T$ , température.

### ● Unité de pression (P)

L'air comprimé exerce sur toutes les parois qui l'entourent une force proportionnelle à sa pression, la relation s'écrivant  $F = PS$  pour une paroi plane de surface  $S$  et une pression uniforme  $P$ . L'unité de pression SI est le Pascal ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ) qui correspond à une pression exerçant un effort de 1 N sur une surface de  $1 \text{ m}^2$ . Cette valeur étant très faible, on utilise généralement d'autres unités en pneumatique industrielle :

- le Méga Pascal,  $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 10 \text{ bars}$ ; certains constructeurs, encore rares (SMC), proposent des indicateurs de pression gradués en MPa;
- le Bar,  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ; l'immense majorité des appareillages pneumatiques emploient cette unité;
- le PSI (pound per square inch),  $1 \text{ Psi} = 6890 \text{ Pa}$ ; le PSI est couramment utilisé dans les pays anglo-saxons.

### ● Pression atmosphérique

L'atmosphère terrestre exerce sur les corps qui y sont plongés une pression moyenne de 101 325 Pa ou 1 013 hPa (correspondant à 1 013 millibars). Cette pression, que nous ne pouvons pas percevoir puisque nous y sommes soumis «de tous les côtés», est loin d'être négligeable. L'expérience de Magdebourg, réalisée au XVIII<sup>e</sup> siècle, montre que deux hémisphères de petite taille (10 cm de rayon) mis en contact et au sein desquels on réalise le vide ne peuvent être décollés qu'au moyen d'un attelage de chevaux (un effort de 300 daN environ est nécessaire pour les décoller). Ainsi, les ventouses «n'aspirent» pas les pièces avec lesquelles elles sont en contact, mais elles utilisent la force générée par la pression atmosphérique en créant un vide relatif entre la pièce à manipuler et elles-mêmes.

### ● Mesure de la pression (P)

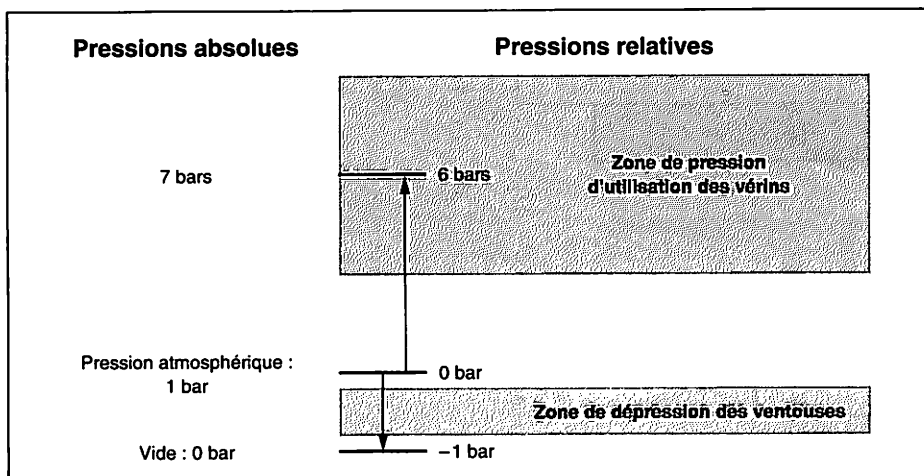


Figure 10.2. Pressions pneumatiques industrielles.

Les appareils de mesure de pression d'air, qui affichent usuellement des valeurs exprimées en bars, indiquent généralement une pression relative qui est mesurée par rapport à la pression de référence atmosphérique. La relation s'écrit : pression absolue = pression relative + pression atmosphérique, 0 bar relatif correspondant à la pression atmosphérique. Cette dernière variant légèrement autour de 1,013 bars, on arrondit sa valeur à 1 bar pour simplifier, et la relation devient : pression absolue  $\approx$  pression relative + 1 bar.

● Débit (Q)

En pneumatique industrielle, on s'intéresse principalement aux débits volumiques, généralement exprimés en L/min (l'unité SI est le m<sup>3</sup>/s). Les mesures et les calculs de débits sont complexes puisque le volume de l'air varie avec la pression et avec la température.

## II. Vérins pneumatiques, principes de fonctionnement

Un vérin est un actionneur utilisant de l'énergie pneumatique pour produire une énergie mécanique lors d'un déplacement linéaire ou rotatif limité à sa course. La figure 10.3 met en évidence les grandeurs physiques intéressantes, à savoir le débit Q et la pression P fournis en entrée et l'effort F et la vitesse V produits par le vérin. Dans les deux cas le produit des deux valeurs donne une puissance, la puissance P.Q pneumatique étant convertie en puissance F.V mécanique. Il est à noter que le rendement de ces actionneurs est mauvais ( $\eta = 0,5$  environ) : une grande partie de l'énergie pneumatique est perdue sous forme d'énergie calorifique et lors de la mise à l'échappement de l'air comprimé. En prenant en compte le rendement du compresseur ( $\eta = 0,4$  environ), on obtient un rendement global très faible pour la chaîne d'action pneumatique ( $\eta = 0,2$ ).

a) Fonctionnement d'un vérin

Considérons le vérin représenté figure 10.4, piloté par un distributeur à deux positions. On note  $P_a$ , la pression dans la chambre coté admission,  $P_e$ , la pression dans la chambre coté échappement (parfois appelée « contre pression d'échappement ») et  $P_u$ , la pression d'utilisation fournie par le secteur pneumatique.

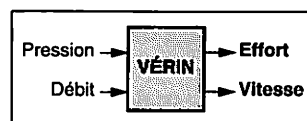


Figure 10.3. Grandeurs physiques associées à un vérin.

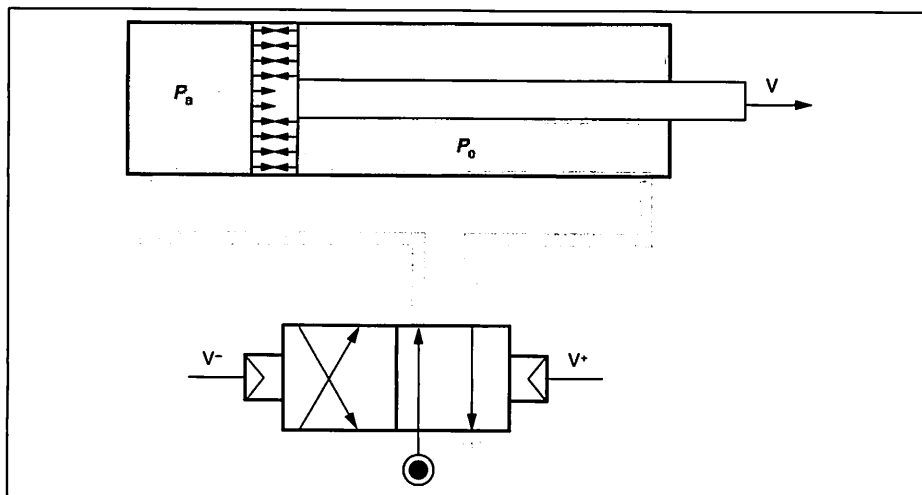


Figure 10.4. Pressions dans un vérin en cours de déplacement (phase 2).

Au moment précis où le distributeur vient de commuter sous l'action de la commande  $v+$ , la chambre arrière est brusquement reliée à la pression d'utilisation et simultanément la chambre avant est mise à la pression atmosphérique.

Le déplacement de l'ensemble tige + piston s'effectue en trois phases :

● **Phase 1, de démarrage (de  $t = 0$  à  $t_1$ )** : la pression  $P_a$  augmente progressivement pendant que la pression  $P_e$  diminue. Pendant cette phase, de courte durée, le piston est immobile.

● **Phase 2, de déplacement (de  $t_1$  à  $t_2$ )** : dès que la différence des pressions  $P_a - P_e$  est suffisante pour vaincre les efforts résistants, le piston se déplace. Pendant cette phase, la pression diminue dans la chambre à l'admission, car le débit d'air ne peut pas compenser l'augmentation du volume de la chambre, et dans la chambre à l'échappement pour les raisons inverses. La vitesse du vérin augmente.

● **Phase 3, d'arrêt ( $t_2$  et après)** : lorsque le piston arrive en butée avant du vérin il se produit un arrêt brutal, la vitesse chute quasi instantanément. Les pressions s'équilibrent rapidement pour atteindre la pression d'utilisation dans la chambre à l'admission et la pression atmosphérique dans la chambre à l'échappement.

La figure 10.5 montre la simulation informatique du déplacement d'un vérin standard FESTO non chargé, alimenté sous 6 bars, de diamètre 16 mm, de course 200 mm, et à amortissement bague élastique. Les pressions indiquées sont relatives.

**REMARQUE**

Le vérin peut parfois se déplacer avec  $P_e > P_a$  : C'est le cas dans certaines configurations de charges verticales pour lesquelles il se comporte naturellement comme un frein, les surfaces utiles étant différentes.

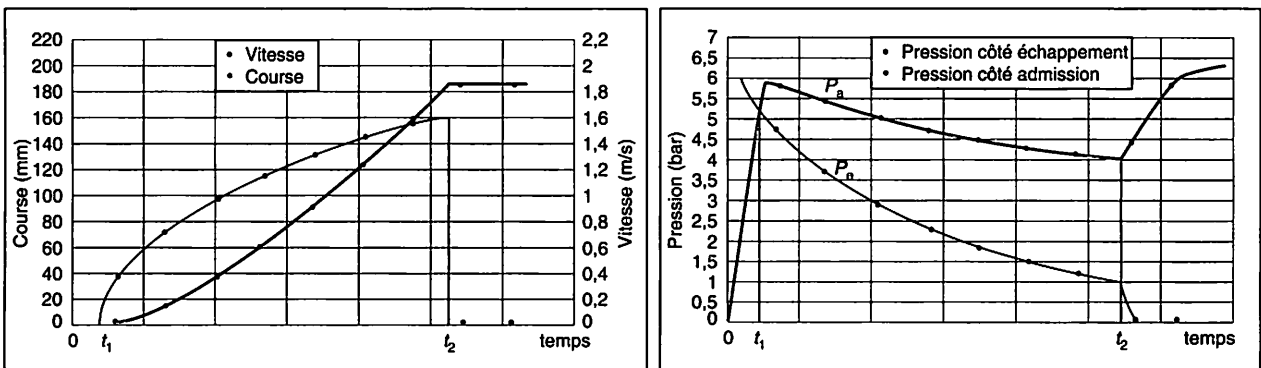


Figure 10.5. Évolution des pressions et de la vitesse. Sortie d'un vérin DSNU-16-200P-A non chargé (Propneu FESTO).

**b) Système d'amortissement intégré**

Ce qui précède permet de constater que, dans le cas où le vérin travaille sur la totalité de sa course, un choc important a lieu en fin de course. En utilisation dynamique, un vérin doit être en mesure de dissiper l'énergie cinétique de l'ensemble des éléments mobiles liés à sa tige. Pour ce faire, les vérins sont dotés de dispositifs d'amortissement de deux types :

- amortissement élastique intégré, il s'agit de bagues élastomères qui ne peuvent absorber qu'une énergie faible ;
- amortissement pneumatique intégré, ces derniers, plus efficaces, sont réglables par vis.

Le principe d'un amortisseur pneumatique intégré (Figure 10.6) est le suivant : tant que le piston est éloigné de la zone d'amortissement, l'échappement s'effectue normalement. Dès que le piston rentre dans la zone d'amortissement, il vient obturer le cylindre d'échappement : l'air doit alors passer par la restriction réglable, ce qui augmente la contre pression  $P_e$  et diminue la vitesse.

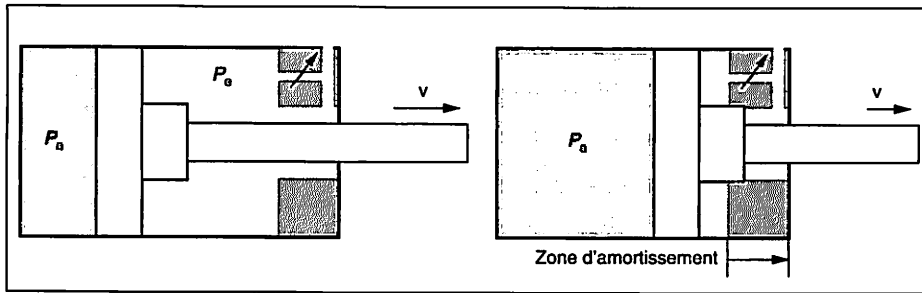


Figure 10.6. Principe de l'amortissement pneumatique intégré.

La figure 10.7 décrit l'évolution simulée des pressions pour un vérin de même diamètre que celui de la figure 10.5, mais possédant un amortissement pneumatique intégré. Les phases de démarrage et de déplacement sont identiques à celle du cas précédent.

- **Phase 1, de démarrage (de  $t = 0$  à  $t_1$ )** : identique au vérin précédent.
- **Phase 2, de déplacement (de  $t_1$  à  $t_2$ )** : identique au vérin précédent.
- **Phase 3, de ralentissement (de  $t_2$  à  $t_3$ )** : dès que le piston atteint la zone d'amortissement, la contre pression  $P_e$  augmente de manière importante à cause du laminage de l'air dans la restriction réglable. Le ralentissement est moins brutal que dans le cas précédent. La contre pression d'échappement  $P_e$  peut parfois dépasser la valeur de  $P_a$ , provoquant un léger phénomène de rebond.
- **Phase 4, d'arrêt ( $t_2$  et après)** : lorsque le piston arrive en butée avant du vérin, il a perdu la majeure partie de sa vitesse, l'arrêt est moins brutal. La contre pression est plus longue à s'équilibrer que dans le cas précédent.

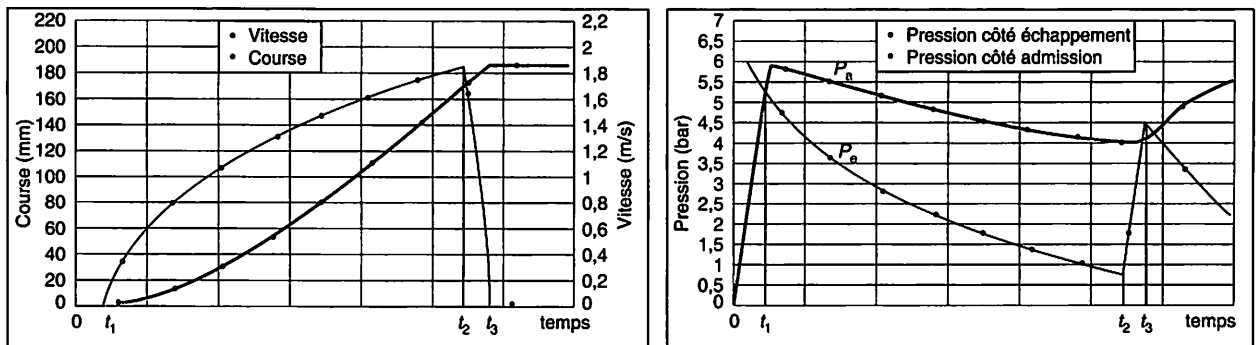


Figure 10.7. Évolution des pressions en fin de course avec amortissement pneumatique intégré (Propneu FESTO).

### c) Efforts développés par un vérin

Pour les raisons déjà évoquées de complexité de modélisation du comportement de l'air, les constructeurs ne fournissent pas de courbes caractéristiques de fonctionnement pour ce type d'actionneur, contrairement aux moteurs électriques ou aux vérins hydrauliques. Afin de pouvoir mener des calculs, on introduit les hypothèses simplificatrices suivantes :

- **Effort statique (ou théorique)** : il correspond à l'effort développé par le vérin en butée. En considérant que la liaison entre cylindre et piston + tige est parfaite, que la pression motrice  $P_a$  est constante et égale à la pression d'utilisation  $P_a = P_u = P$  et que la contre pression d'échappement  $P_e$  est nulle, l'effort statique développé par un vérin est  $F_s = P \cdot S_u$  avec  $P$ , pression d'utilisation,  $S_u$ , surface utile du piston. Dans le cas des vérins à tige, l'effort statique en rentrée  $F_{sr}$  est différent de celui en sortie  $F_{ss}$ , les surfaces utiles étant différentes.

En posant  $D$ , diamètre du piston et  $d$ , diamètre de la tige, on obtient :

$$F_{ss} = P \frac{\pi D^2}{4} \text{ et } F_{sr} = P \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4}.$$

● **Effort dynamique** : c'est l'effort développé par le vérin seul en cours de déplacement. L'ensemble tige + piston est soumis aux efforts suivants :

- efforts moteurs dus à la pression motrice;
- efforts résistants dus à la contre pression d'échappement;
- efforts résistants induits par les frottements entre cylindre et piston;
- efforts résistants induits par les frottements entre corps et tige.

La détermination des divers efforts est particulièrement difficile, aussi pour simplifier cette problématique, on fait l'hypothèse que le rendement du vérin est constant lors de ses déplacements et que globalement, les frottements ainsi que le laminage de l'air dans l'orifice d'échappement consomment une partie de la puissance. On peut alors introduire un coefficient appelé taux de charge  $t_c$  qui est le rapport entre l'effort dynamique  $F_d$  et l'effort statique (ou théorique)  $F_s$ ,

que peut fournir le vérin :  $t_c = \frac{F_d}{F_s}$

On choisit une valeur du taux de charge comprise entre 0,4 et 0,6, généralement 0,5. L'expression des efforts fournis en sortie et en rentrée de tige devient alors :

$$F_{dr} = t_c \times F_{sr} = \frac{t_c p \pi (D^2 - d^2)}{4} \quad \text{et} \quad F_{ds} = t_c \times F_{ss} = \frac{t_c \times p \pi D^2}{4}.$$

### III. Pré-actionneurs pneumatiques : distributeurs

La fonction des distributeurs pneumatiques est de commuter le débit d'air d'un circuit pneumatique à la réception d'un signal de commande qui peut être électrique ou pneumatique. Cette commutation peut :

- permettre le passage de l'air comprimé d'un circuit (voie) à un autre ;
- interdire le passage de l'air comprimé (blocage).

Les distributeurs sont caractérisés par (Figure 10.8) :

- le nombre de voies commutées et le nombre de positions de commutation possibles : de 2 voies et 2 positions (2/2), jusqu'à 5 voies 3 positions (5/3) ;
- leur mode de fonctionnement qui peut être monostable ou bistable ;
- leur type de pilotage qui peut être électrique, pneumatique, manuel ou une combinaison des précédents.

La plupart des distributeurs modernes à tiroir sont dotés d'éléments mobiles en céramique qui fonctionnent avec de l'air sec (non lubrifié). Les distributeurs à clapet sont bien adaptés aux fonctions 2/2 ou 3/2 et aux faibles ou très gros débits.

Les distributeurs, qui sont généralement utilisés comme préactionneurs des vérins, se caractérisent par :

- leur facteur de débit  $K_v$ ;
- leur diamètre de raccordement (1/8", 1/4", 3/8", 1/2") ;
- leur diamètre de passage.

Ces caractéristiques permettent de choisir la taille du distributeur adapté à l'application prévue. Généralement le choix est simplement appuyé sur la concordance de taille des raccords du vérin et du distributeur (voir FICHE MÉTHODE B - Choix d'un actionneur pneumatique).

TYPE		SCHÉMA	UTILISATION
2/2	Monostable		Pré-actionneur pour : - commander un actionneur à jet d'air (soufflette, pulvérisateur); - commander un moteur à un sens de marche; - bloquer une circulation d'air en absence de signal de commande.
3/2	Monostable NF		Pré-actionneur pour : - piloter un vérin simple effet; - alimenter un venturi associé généralement à une ventouse.
	Bistable		
4/2	Monostable		Pré-actionneur pour : - piloter un vérin double effet; - piloter tout actionneur à deux sens de marche.
	Bistable		
5/2	Monostable		Pré-actionneur pour : - piloter un vérin double effet; - piloter tout actionneur à deux sens de marche.
	Bistable		
5/3	Monostable Centre ouvert		Ce type de distributeur permet la mise à l'atmosphère des deux chambres du vérin en l'absence de commande : - les masses en mouvement du vérin s'arrêtent dès que toutes les inerties sont vaincues; - les masses mobiles du vérin sont déplaçables à la main.
	Monostable Centre fermé		

Figure 10.8. Typologie des principaux distributeurs pneumatiques.

## IV. Composants auxiliaires

### 1. Régulation de la vitesse des vérins pneumatiques

Les vérins, grâce à la faible inertie des masses en mouvement, sont des actionneurs capables d'une grande dynamique. En l'absence d'efforts résistants significatifs (guidages à circulation de billes par exemple), ils peuvent atteindre des vitesses élevées induisant des chocs importants lors des arrivées en fin de course, avec des conséquences dommageables pour le vérin et la mécanique associée.



Le principe généralement retenu afin de réguler la vitesse des vérins consiste à augmenter la contre pression  $P_e$  au moyen d'une restriction réglable installée sur l'orifice d'échappement du vérin, un système de clapet anti-retour permettant le plein passage à l'admission. Le composant réalisant cette fonction s'appelle un réducteur de débit unidirectionnel (RDU, Figure 10.9).

Le système de clapet est symbolisé par une bille venant en appui à l'intérieur d'un cône dans le cas où le flux est dirigé vers le haut (échappement du vérin), contraignant l'air à emprunter la restriction réglable.

● Montage classique (Figure 10.10)

Lorsque le vérin sort, le RDU avant agit (passage restreint), alors que le RDU arrière est passif (plein passage), les rôles s'inversant lorsque le vérin rentre.

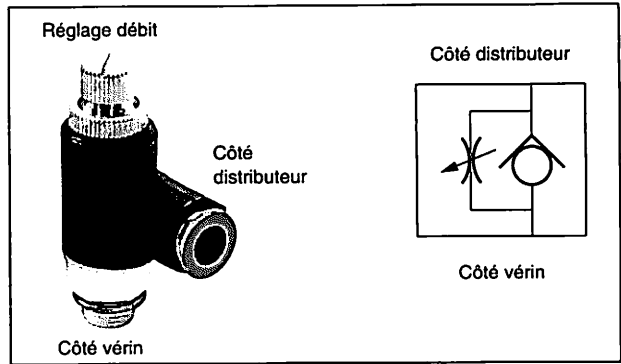


Figure 10.9. Régulateur de vitesse unidirectionnel à l'échappement, implantable directement sur vérin (doc. FESTO).

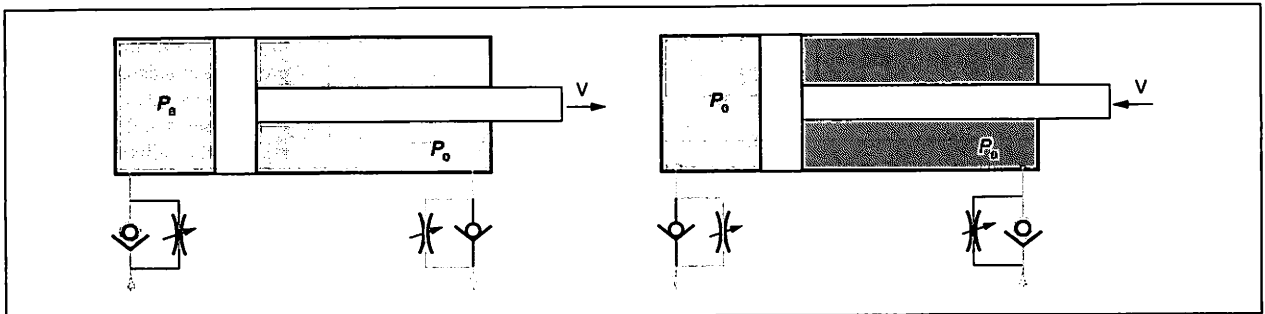


Figure 10.10. Principe de la régulation de vitesse à l'échappement dans les deux sens par deux RDU.

La simulation figure 10.11 met en évidence les effets induits par la présence d'un RDU à l'échappement réglé à 50% de restriction monté sur le même vérin que celui de la figure 10.5. On observe une nette augmentation de la contre pression  $P_e$  et une diminution de la vitesse obtenue. Une augmentation de la vitesse de déplacement (sous l'influence d'une cause extérieure) va provoquer une augmentation de la contre pression d'échappement  $P_e$ , laquelle va entraîner une diminution de la vitesse. Le RDU réalise une régulation sommaire de la vitesse de déplacement.

REMARQUE

Il est parfois nécessaire ou préférable de réguler la vitesse d'un vérin à l'admission : c'est le cas des vérins simple effet qui ne possèdent pas d'orifice d'échappement fileté et des très gros vérins lorsque l'on désire économiser l'air.

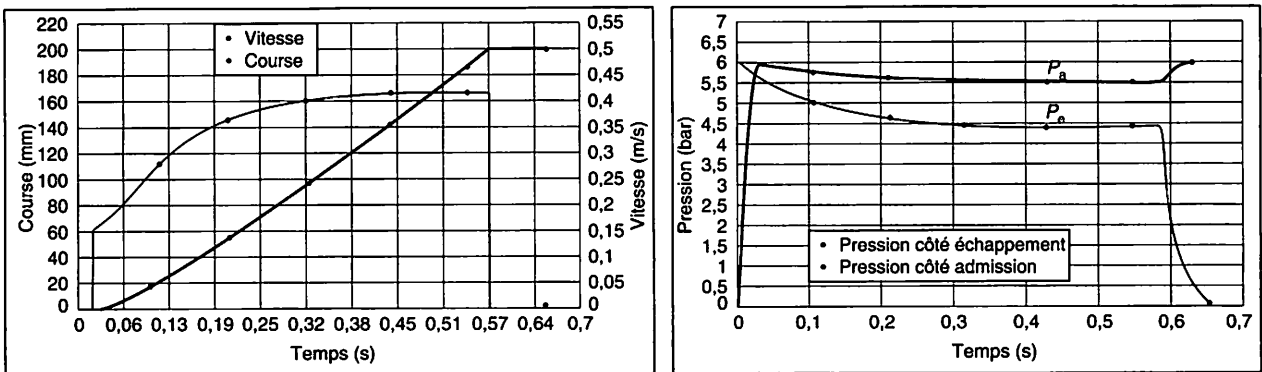


Figure 10.11. Évolution des pressions avec régulation de vitesse à l'échappement par RDU (Propneu FESTO).

2. Bloqueur 2/2

Ce composant permet d'immobiliser un vérin (ou un autre actionneur) en cas de nécessité. En effet, le circuit est coupé en l'absence de commande d'autorisation. On l'utilise par paires pour effectuer le blocage d'un vérin en position quelconque. Il est conçu pour s'implanter directement sur les orifices de sorties des vérins (filetage BSP).

En revanche les bloqueurs sont mal adaptés pour l'arrêt précis d'un vérin dans une position intermédiaire. Les pressions sont différentes dans les deux chambres ( $P_e$  et  $P_a$ , voir figure 10.5) au moment du blocage et les surfaces sont différentes de part et d'autre du piston (excepté pour les vérins sans tige). Le rééquilibrage des pressions provoque un léger déplacement du piston après l'arrêt.

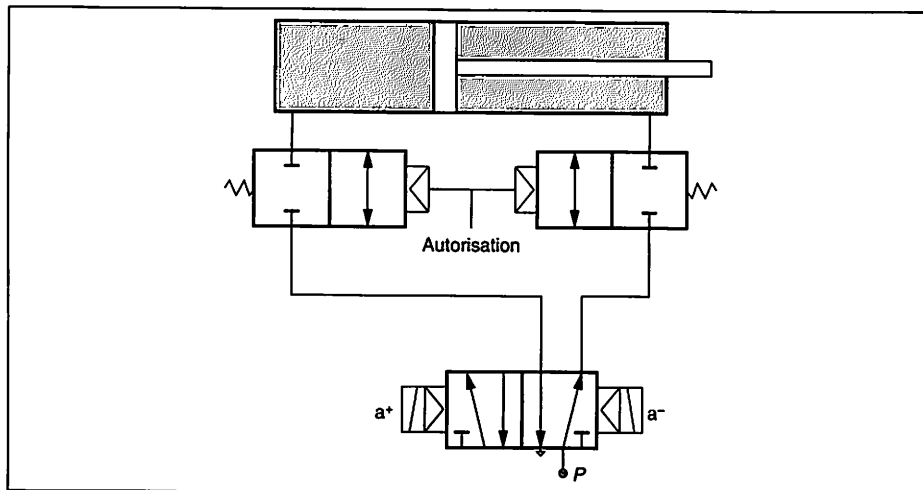


Figure 10.12. Blocage d'un vérin par bloqueurs 2/2 monostables.

Il existe d'autres composants auxiliaires moins souvent utilisés :

- les sectionneurs purgeurs installés sur l'actionneur pour supprimer l'effort moteur en cas d'urgence (sécurité) et augmenter la vitesse de la chute de pression dans la chambre à l'échappement ;
- l'économiseur d'air pour réduire la consommation d'air.

#### REMARQUE

Lorsque le risque est important, l'utilisation de bloqueurs 2/2 est insuffisante. D'une part, ils ne permettent pas un blocage immédiat, et d'autre part, il peut exister un déplacement résiduel par équilibrage des pressions. Enfin, le vérin reste potentiellement en énergie. On utilise généralement un système de freinage mécanique normalement serré (intégré sur le vérin ou externe) utilisé dans la procédure de mise hors énergie.

## V. Conditionnement de l'air et mise en énergie

### 1. Éléments de conditionnement de l'air

Au niveau de l'utilisation, un groupe de conditionnement d'air assure :

- le filtrage, afin d'arrêter les particules solides nuisibles au bon fonctionnement des appareils ;
- l'élimination de l'eau ;
- le réglage et la régulation de la pression ;
- la lubrification (si nécessaire) en chargeant l'air de fines particules d'huile.

Les constituants matériels d'un système de conditionnement d'air sont couramment les suivants.

● **Le filtre** assure les deux fonctions suivantes (Figure 10.13) :

- la centrifugation des particules lourdes par création d'un tourbillon entraînant l'eau et les poussières à la périphérie d'un récipient muni d'un dispositif de purge manuelle ou automatique. Le résidu obtenu est appelé condensat ;
- la filtration par passage à travers un élément filtrant en bronze fritté qui retient les particules de taille supérieure à 50  $\mu\text{m}$  (microns) en général.

● **Le détendeur** de pression est chargé de limiter la pression délivrée afin d'amortir les variations du réseau de distribution. Il est généralement associé à un manomètre qui permet de garantir un réglage précis et une surveillance de la pression par l'opérateur.

● Le **lubrificateur** (Figure 10.13), lorsqu'il est nécessaire, est un vaporisateur basé sur le même principe que le tube de Venturi des carburateurs automobiles. Certains composants fonctionnent à sec (comme les ventouses) et il faut prévoir dans ce cas une prise d'air avant le lubrificateur.

## 2. Sectionneur pneumatique

Ce composant de sécurité s'installe sur la ligne d'alimentation pneumatique, en amont d'une ligne de distributeurs. Il permet la mise à l'échappement de tout ou partie du circuit d'utilisation en l'absence de commande, sur arrêt d'urgence ou lors de la mise hors énergie. Un tel constituant a un rôle de sécurité semblable à celui du sectionneur électrique (commandé manuellement) ou à celui du relais de sécurité (commandé par l'arrêt d'urgence et les différentes sécurités). Ses caractéristiques de débit (facteur  $K_v$ , diamètre de passage) doivent prendre en compte l'ensemble des débits nécessaires aux actionneurs pouvant fonctionner simultanément, afin de ne pas altérer les performances du système (Figure 10.14).

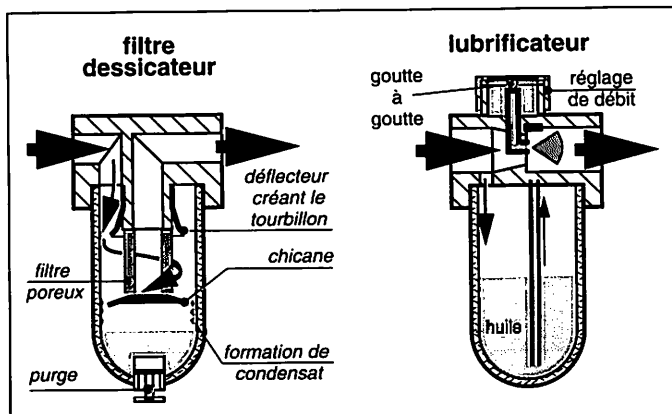


Figure 10.13. Conditionnement de l'air : filtrage et lubrification.

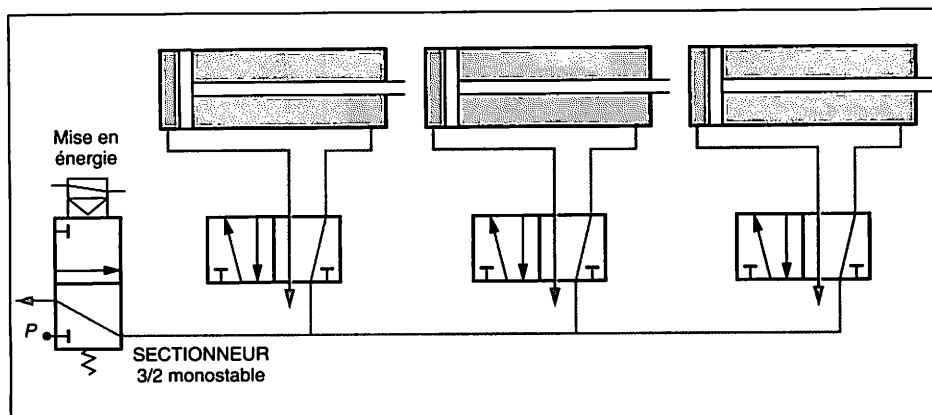


Figure 10.14. Mise à l'atmosphère d'un circuit au moyen d'un sectionneur 3/2 monostable.

## 3. Démarreur progressif

Dans certains cas, la mise en pression progressive des actionneurs peut être nécessaire pour assurer la sécurité des biens et des personnes. La remise sous pression de l'une des chambres d'un vérin provoque généralement un mouvement brutal, car la contre pression au niveau du piston est faible à ce moment.

Ceci est particulièrement vrai pour les gros vérins ou avec de grandes courses. Dans ce cas, un démarreur progressif doit être placé dans la chaîne d'alimentation. Un tel constituant assure la mise en pression progressive du circuit au travers d'un réducteur de débit jusqu'à ce que la pression atteigne une valeur proche de sa valeur nominale. Cette pression pilote le démarreur progressif qui commute le circuit à pleine ouverture et se maintient ainsi tant que la pression reste supérieure ou égale à la pression de fonctionnement (Figure 10.15). Les constructeurs proposent des ensembles intégrés sectionneur + démarreur qui simplifient l'implantation.

### REMARQUE

Les deux chambres des vérins étant à l'atmosphère, il est éventuellement possible de les déplacer manuellement.

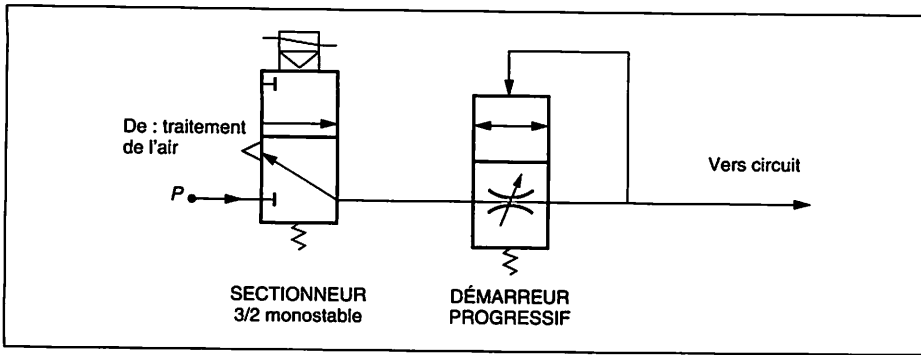


Figure 10.15. Association typique d'un sectionneur et d'un démarreur progressif.

## 4. Tendances actuelles

On assiste depuis quelques années à une intégration poussée des divers composants pneumatiques et, surtout, de la connectique associée. Les modules de traitement de l'air assurent toutes les fonctions : filtrage, détente, lubrification, sectionnement et démarrage progressif (Figure 10.16).

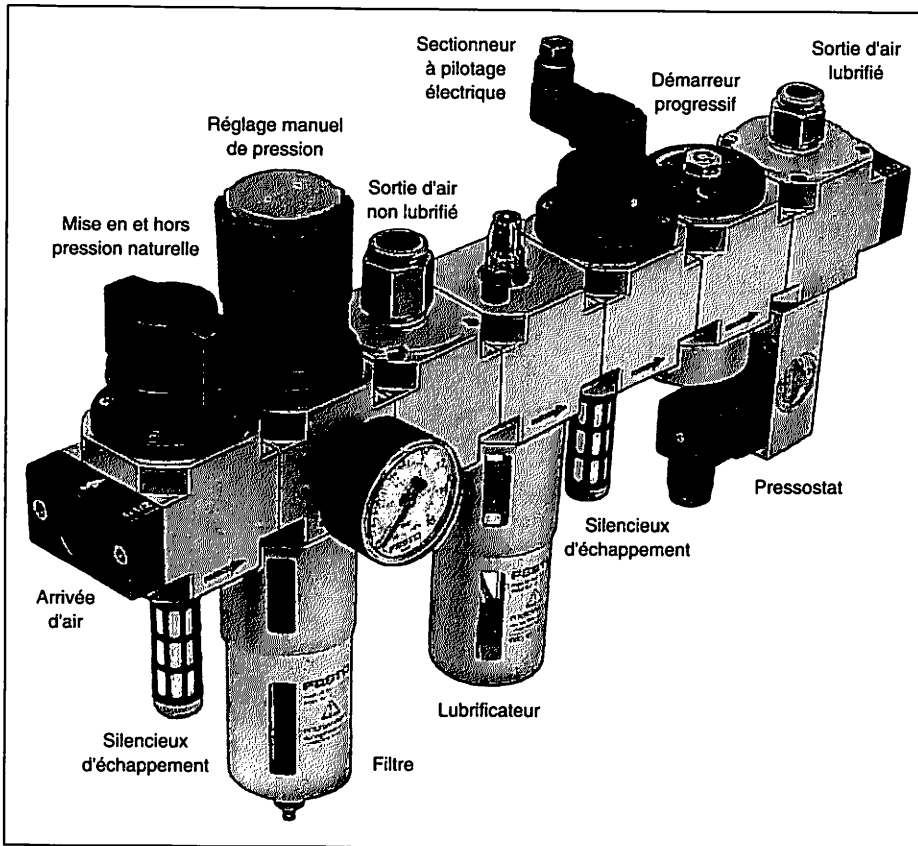


Figure 10.16. Module intégré de traitement de l'air et de mise en pression (doc. FESTO).

### Résumé

● La chaîne d'action (ou chaîne d'énergie) pneumatique est constituée des fonctions génériques : Alimenter, Distribuer, Convertir, Transmettre qui contribuent à la réalisation d'une action. L'action à réaliser impose un flux d'énergie pneumatique (sens et niveau) que le système doit transmettre et gérer par sa commande.

● **L'énergie pneumatique** est fournie sous forme d'air comprimé à une pression comprise entre 0,4 MPa (4 bars) et 1 MPa (10 bars), le plus souvent 0,6 MPa (6 bars). L'unité de pression normalisée est le Pascal ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ), mais les constructeurs et les utilisateurs utilisent le bar ( $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} \approx 1 \text{ atm}$ ). Les valeurs de pression indiquées sont généralement relatives, sachant que « pression relative » + 1 bar = « pression absolue » : ainsi, une pression relative de 0,6 MPa (6 bars) indiquée par un manomètre correspond à une pression absolue de 0,7 MPa (7 bars).

L'air comprimé doit impérativement être conditionné, c'est-à-dire filtré, régulé et réglé à la pression d'utilisation et éventuellement lubrifié.

● **L'actionneur pneumatique** le plus utilisé est le vérin. Il transforme l'énergie pneumatique en déplacement linéaire ou rotatif. Un vérin se déplace sous l'action des forces générées par la différence de pression entre ses deux chambres. Certains vérins possèdent un dispositif d'amortissement en fin de course, pneumatique ou à bagues souples, qui est particulièrement utile lorsque le vérin travaille sur la totalité de sa course. On peut réguler la vitesse de déplacement d'un vérin en utilisant des réducteurs de débits unidirectionnels (RDU) qui travaillent à l'échappement.

Le pré-actionneur associé à un vérin pneumatique s'appelle **distributeur**. Il peut être monostable (un seul pilotage, avec retour en position de repos en l'absence de pilotage) ou bistable (deux pilotages, avec conservation de la position en l'absence de pilotage). Les distributeurs possèdent 2 ou 3 positions et 2, 3, 4 ou 5 orifices. Un distributeur monostable à 2 positions et 5 orifices est repéré « distributeur 5/2 monostable ».

Afin d'assurer la mise en énergie et la sécurité, on utilise des distributeurs spéciaux :

- les sectionneurs 3/2 monostables permettent la mise en et hors énergie pneumatique ;
- les démarreurs progressifs 2/2 monostables permettent la mise en pression progressive du circuit afin d'éviter les déplacements brutaux de vérins.

Enfin, il existe des distributeurs spécialisés comme les bloqueurs 2/2 monostables permettant la coupure immédiate d'un circuit. Les développements technologiques récents conduisent à une intégration poussée de ces divers composants.

## Exercices

**EXERCICE 1.** Un venturi pour ventouse pneumatique permet d'obtenir une dépression relative de  $-0,06 \text{ MPa}$  ( $-0,6 \text{ bars}$ ). Quelle est la pression absolue correspondante ?

**EXERCICE 2.** Par quel mécanisme un réducteur de débit unidirectionnel (RDU) permet-il de réguler la vitesse de déplacement d'un vérin ?

**EXERCICE 3.** Dans la FICHE MÉTHODE 8, il est dit que l'effort  $F$  induit par une pression  $P$  sur un piston de diamètre  $D$  s'obtient en DaN si la pression est exprimée en bars et le diamètre en cm. Justifier.

**EXERCICE 4.** Quel est le distributeur adapté pour un vérin simple effet : 3/2 mono, 4/2 mono, 5/2 mono ? Pourquoi ?

**EXERCICE 5.** Peut-on piloter un vérin double effet avec un distributeur 3/2 ? avec deux distributeurs 3/2 ?

**EXERCICE 6.** Refaire les schémas pneumatiques des figures FM5.8 et FM5.10 (extraits de la documentation constructeur) pour les rendre conformes à la règle de la case repos des distributeurs 2 positions et la place des pilotes (voir FICHE MÉTHODE 5).

# 11

# Commande de la puissance électrique

## I. La chaîne d'action électrique

### 1. La chaîne d'action électrique et ses constituants

La *chaîne d'action* (chapitre 1, paragraphe 3) encore appelée *chaîne d'énergie*, est constituée des fonctions génériques : Alimenter, Commuter et Moduler, Convertir, Transmettre qui contribuent à la réalisation d'une action (Figure 11.1). L'action à réaliser impose un flux d'énergie électrique que le système doit transmettre, moduler et gérer par sa commande. Les performances dépendent des caractéristiques des divers constituants.

Quel que soit l'actionneur électrique utilisé, il est toujours nécessaire d'avoir une source d'énergie adaptée dont on peut disposer en toute sécurité, un pré-actionneur permettant de commuter ou de moduler l'énergie à partir d'un ordre issu de la partie commande, un ensemble de dispositifs de protection de l'actionneur et enfin l'actionneur proprement dit pour exercer l'action souhaitée sur l'effecteur. La chaîne d'action électrique se présente donc fonctionnellement comme indiquée sur la figure 11.1 ci-dessous. On notera la place des protections qui suit les principes suivants :

- protéger l'installation en amont contre des défauts de l'actionneur ;
- protéger l'actionneur contre un dépassement de ses capacités. En effet le moteur est un convertisseur qui, pour répondre à un accroissement de couple résistant absorbera davantage de courant et pourra dépasser ses limites d'utilisation.

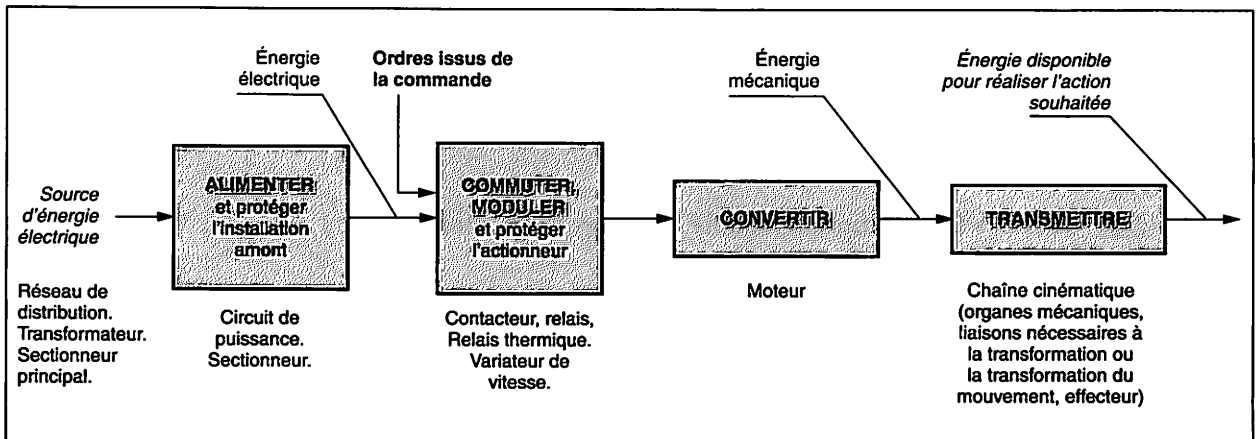


Figure 11.1. La chaîne d'action électrique et ses constituants principaux.

## 2. L'énergie électrique

● Bien que connue depuis longtemps (dès l'antiquité avec l'électrostatique), l'électricité n'a connu son véritable développement qu'avec la découverte de la pile au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. La pile est un générateur chimique permettant la production de courant durant un temps significatif.

L'énergie électrique est due à un déplacement de charges (électrons dans les matériaux solides, ions dans les milieux liquides,...) : le courant électrique. La mobilité des charges dans les matériaux est très variable : les matériaux conducteurs présentent une résistance très faible, par opposition aux matériaux isolants qui présentent une résistance très élevée.

Ce déplacement est caractérisé par son intensité  $i$ , exprimée en ampères (A), qui est le rapport entre la variation de charges par unité de temps. Ces charges sont fournies par des sources caractérisées par la différence de potentiel entre bornes (d.d.p.)  $u$ , exprimée en volts (V). La puissance  $p$  d'un courant électrique s'exprime par la relation  $p = u.i$ .

Le développement des systèmes a été rendu possible par l'émergence de formes d'énergie aisément transportables par des moyens souples comme des fils conducteurs pour l'électricité, ou des tuyaux pour l'air comprimé ou les fluides hydrauliques. L'énergie électrique, par les nombreuses possibilités qu'elle offre, s'est imposée comme un vecteur incontournable de l'automatisation et accroît son influence même dans le domaine de l'actionneur à déplacement linéaire ou l'air comprimé présente des solutions attractives.

### ● Formes du courant électrique

Le courant électrique se rencontre sous deux formes :

- le courant continu, où le mouvement des charges s'effectue toujours dans le même sens, c'est essentiellement un courant produit par des générateurs chimiques (piles, accumulateurs...);
- le courant alternatif, où le mouvement des charges s'effectue alternativement dans un sens, puis dans l'autre avec une fréquence  $f$  caractéristique du nombre de changement par seconde.

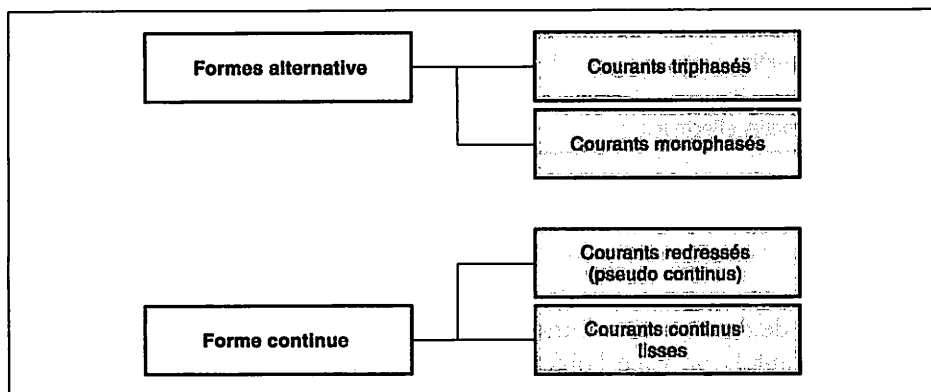


Figure 11.2. Diverses formes du courant électrique industriel.

● La production est généralement délivrée sous la forme alternative triphasée à partir d'alternateurs via un réseau de transport et des transformateurs. Les tensions usuelles mises à disposition de l'utilisateur sont généralement le 400 volts triphasé à partir duquel il est possible d'obtenir des tensions monophasées ou redressées (pseudo-continu).

Les formes continues sont obtenues principalement à partir des sources chimiques (accumulateurs rechargeables ou piles) et sont utilisées surtout pour les équipements autonomes et les alimentations secourues.

## II. Alimentations des systèmes automatiques

L'énergie source est obtenue à partir d'un fournisseur (fréquemment EDF, mais d'autres fournisseurs existent ou vont exister avec l'ouverture à la concurrence) sous la forme triphasée (3\* 400 V : L1, L2, L3).

Selon les besoins, l'utilisateur pourvoira à partir du réseau général à obtenir les tensions et natures de courant nécessaires

La figure ci-contre illustre une des possibilités rencontrées sur un équipement automatisé.

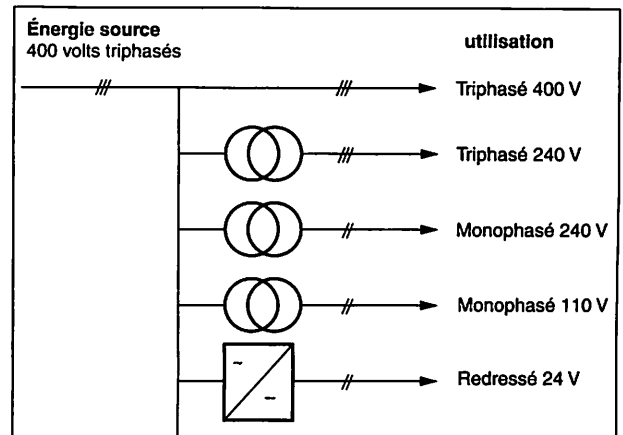


Figure 11.3. Diverses formes d'alimentation d'un système.

## III. Actionneurs électriques

### 1. Principes de fonctionnement

Parmi les effets de l'électricité intéressant l'automaticien, il faut noter les effets thermiques permettant le chauffage, l'éclairage et le soudage mais également les effets électromagnétiques qui sont à la base du fonctionnement des moteurs.

Selon la nature de l'action sur l'effecteur ou la matière d'œuvre elle-même, il existe plusieurs types d'actionneurs électriques :

Actionneur	Conversion d'énergie
Les moteurs rotatifs	Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique de rotation
Les moteurs linéaires ou les électro-aimants	Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique de translation
Les résistances chauffantes	Conversion d'énergie électrique en énergie calorifique (actionneurs-effecteurs)

Ce sont essentiellement les moteurs qui feront l'objet de développements dans ce chapitre.

#### a) Moteurs, principe général

Les moteurs électriques sont constitués de deux parties, l'une fixe, le stator ou inducteur et l'autre mobile, le rotor ou induit. Le principe d'obtention d'un couple, issu des lois de l'induction, repose sur l'interaction existant entre deux champs magnétiques :

- le champ statorique, lié à la partie fixe du moteur ( $B_s$ ) ;
- le champ rotorique lié à la partie mobile du moteur ( $B_r$ ).

Si les deux champs sont décalés d'un angle  $\theta$ , il apparaît alors un effort (ou un couple) qui tend à les aligner. L'effort (ou le couple) est maximum lorsque les deux champs sont perpendiculaires ( $\theta = \pi / 2$  : Figure 11.4). Pour créer un moteur il suffit, par un procédé technique, de faire tourner, ou déplacer, un de ces champs par rapport à l'autre pour que l'autre suive, entraînant ainsi le mouvement relatif du rotor par rapport au stator.

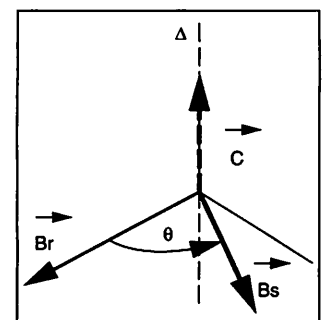


Figure 11.4. Deux champs, un couple.

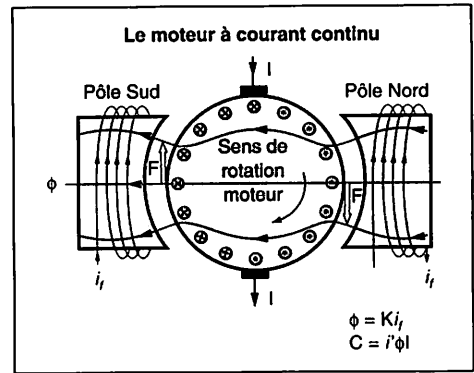


**b) Moteurs à courant continu**

Le champ statorique fixe  $B_s$  est créé par un élément appelé inducteur qui est soit un aimant permanent, soit un électro-aimant alimenté en courant continu.

Le champ rotorique est créé par une armature mobile constituée de conducteurs bobinés axialement et alimentés en courant continu. Le maintien des conducteurs actifs dans le champ inducteur fixe, placé dans le champ fixe de l'inducteur, est réalisé par une commutation mécanique à l'aide d'un collecteur et des balais qui provoquent une inversion de champ rotorique à chaque demi-tour (Figure 11.5). L'inversion du sens de rotation est obtenue par inversion de la tension sur les balais (ou par inversion du sens d'alimentation du bobinage inducteur).

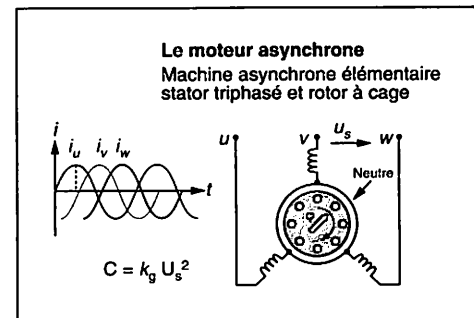
Ces moteurs sont bien adaptés aux applications nécessitant des vitesses fortement variables, des démarrages fréquents ou un freinage de la charge. De plus, étant réversibles, ils peuvent se comporter en génératrice lorsque la charge est entraînée, ce qui permet la récupération d'énergie.



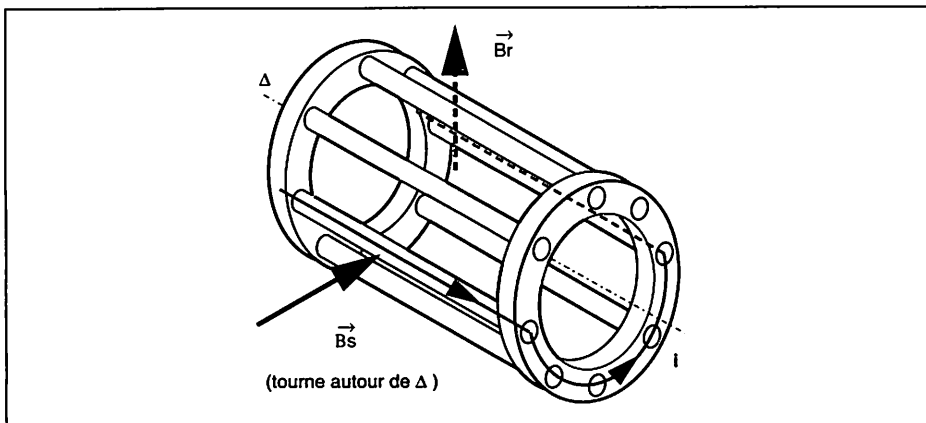
**Figure 11.5.** Principe d'un moteur à courant continu avec enroulements inducteurs (d'après un document InterSections Schneider Electric).

**c) Moteurs à courant alternatif (asynchrones, triphasés)**

C'est le moteur le plus répandu dans l'industrie. Il est robuste, fiable, disponible et peu encombrant. Le champ statorique est produit par trois bobines d'induction de  $2p$  pôles (Figure 11.6), chacune alimentée par une phase du courant électrique triphasé à la fréquence  $f$ . Le courant alternatif triphasé qui traverse les trois bobines du stator crée un champ tournant à fréquence fixe dite de synchronisme  $f_s = f/p$  ( $f_s$  en France = 50 Hz). Ce champ étant variable, en raison de la nature périodique et triphasée des courants, il induit des courants dans le rotor constitué de conducteurs métalliques disposés parallèlement à l'axe de rotation du moteur et reliés électriquement entre eux aux extrémités (rotor en court-circuit, ou « cage d'écureuil » : Figure 11.7). Ces courants induits créent à leur tour un champ magnétique rotorique. On se retrouve donc dans la situation décrite au-dessus : le champ induit (champ rotorique) va donc tourner aussi pour s'opposer à la cause qui le produit (loi de Lenz). Dans ce moteur, le rotor tourne à une vitesse  $N$  inférieure à  $N_s$  (vitesse correspondant au synchronisme :  $50 \text{ s}^{-1}$  pour  $p = 1$ ), il apparaît un écart appelé glissement  $g = (N_s - N)/N_s$  qui est fonction du couple résistant en régime permanent. Ce glissement en fréquence de rotation est de l'ordre de 3 à 5 % en fonctionnement normal.



**Figure 11.6.** Moteur asynchrone triphasé (d'après un document InterSections Schneider Electric).



**Figure 11.7.** Rotor cage d'écureuil (détail).

#### d) Moteurs autosynchrones

Le flux rotorique constant est créé par des aimants montés dans le rotor. Le flux statorique est créé par un enroulement triphasé alimenté par un onduleur. Cet ensemble électronique complexe, génère les ondes de tensions alternatives et commande la commutation de l'alimentation des bobines de telle sorte à

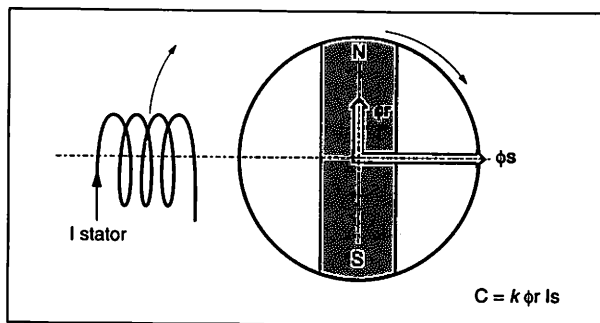


Figure 11.8. Principe de fonctionnement d'un moteur autosynchrone (Document InterSections Schneider Electric).

créer un champ tournant, toujours en avance de  $90^\circ$ , sur le champ produit par les aimants du rotor, pour contrôler le couple en permanence. Ce moteur ne peut donc pas fonctionner sans son électronique de commande.

Les algorithmes de commande sophistiqués et en constante évolution qui permettent des comportements dynamiques de plus en plus performants sur toute la plage de vitesses en font un actionneur de référence dans le domaine de l'automatisation.

Ces moteurs sont connus sous divers vocables : moteur «brushless» (sans balais), moteur synchrone auto piloté, moteur autosynchrone, c'est cette dernière appellation qui sera utilisée dans cet ouvrage.

Cette même technique est employée pour réaliser des moteurs linéaires : un cylindre supportant des aimants, peut être entraîné en translation sous l'effet de l'interaction du champ magnétique et du champ électromagnétique glissant produit par des bobines statoriques. Ces moteurs permettent des déplacements sur plusieurs mètres.

#### e) Moteurs électriques pas à pas

Ils sont utilisés dans les dispositifs de positionnement, notamment pour les appareils nécessitant de faibles puissance, car ils fonctionnent sans boucle d'asservissement et sont ainsi insensibles à certains phénomènes d'instabilité. En contrepartie ils doivent être utilisés en dessous de leurs limites de couple et de fréquence, afin d'éviter pertes de pas ou décrochage.

Un moteur pas à pas est conçu pour effectuer une portion de tour (1 pas) chaque fois qu'il reçoit une impulsion électrique.

La résolution d'un moteur électrique pas à pas peut varier de 4 à 400 pas par tour.

Il existe principalement trois types de moteurs pas à pas :

- les moteurs à aimant permanent;
- les moteurs à réluctance variable;
- les moteurs hybrides.

● Le principe de fonctionnement **des moteurs pas à pas à aimants permanents** est indiqué par la figure 11.9. L'aimant se place dans l'axe du champ magnétique créé par la bobine d'excitation qui est alimentée. Il est possible d'obtenir des positions intermédiaires, ou demi-pas, en alimentant deux bobines simultanément. Le nombre de pas par tour obtenu sur de tels moteurs est réduit.

● **Les moteurs pas à pas à réluctance variable** ne nécessitent pas de disposer d'aimants permanents. Ils sont dotés d'un stator et d'un rotor munis d'un nombre

différent de pôles. Le stator, qui comporte un nombre pair de pôles, est doté de bobines d'induction placées sur chacun d'eux. Ces bobines sont alimentées par paires opposées de sorte que le rotor se place dans la position offrant la surface métallique maximale en regard des deux pôles fixes du champ magnétique (Figure 11.9). De cette manière, le flux est maximal. La rotation est obtenue en alimentant successivement les paires de bobines suivantes correspondant au sens souhaité. Ces moteurs permettent d'obtenir un grand nombre de pas mais ne fournissent que de faibles couples.

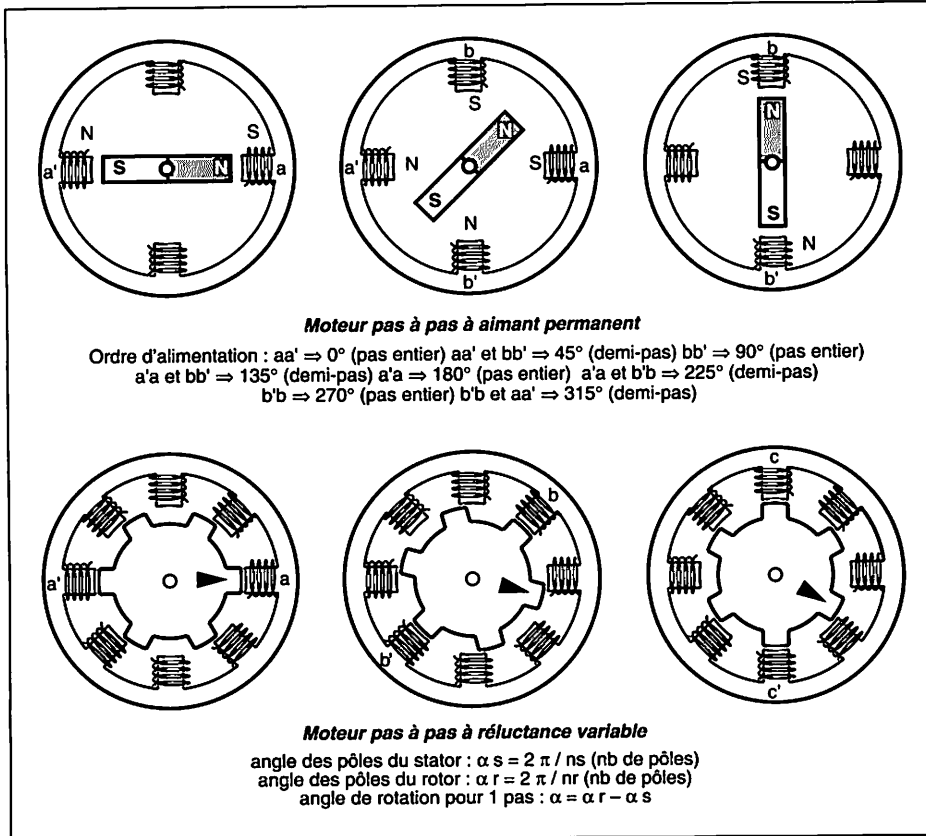


Figure 11.9. Moteurs pas à pas (principes).

● **Les moteurs hybrides** allient les avantages des moteurs à aimants permanents (couple plus élevé) et des moteurs à réluctance variable (nombre de pas). Leur principe est identique à celui des moteurs à réluctance variable mais leur rotor comporte des pôles d'aimants permanents répartis sur les plots de sa périphérie.

## 2. Caractéristiques des actionneurs électriques

### a) Courbes caractéristiques d'un moteur

Les caractéristiques importantes d'un moteur sont :

- le couple disponible en bout d'arbre C;
- la fréquence de rotation de l'arbre (donc du rotor)  $\Omega$ ;
- l'intensité du courant consommé.

Afin de comparer des types de moteurs différents et de déterminer le point de fonctionnement d'un ensemble mécanique entraîné par un moteur, il est en particulier nécessaire de connaître la courbe de couple en fonction de la fréquence de rotation, c'est la caractéristique mécanique du moteur.

Pour déterminer les conditions électriques de branchement, commande et protection d'un moteur, il est nécessaire de connaître aussi les caractéristiques électriques de ce moteur, ce sont les courbes de courant en fonction de la vitesse ou du couple.

**b) Caractéristiques des moteurs à courant continu**

Ces moteurs sont caractérisés par les relations :

$$C = k \cdot \Phi \cdot I \text{ et } \Omega = (U - R \cdot I) / k \cdot \Phi.$$

La relation de vitesse  $\Omega$  montre que si le flux  $\Phi$  venait à disparaître, celle-là deviendrait infinie; ces moteurs s'emballent donc en cas de forte diminution du flux.

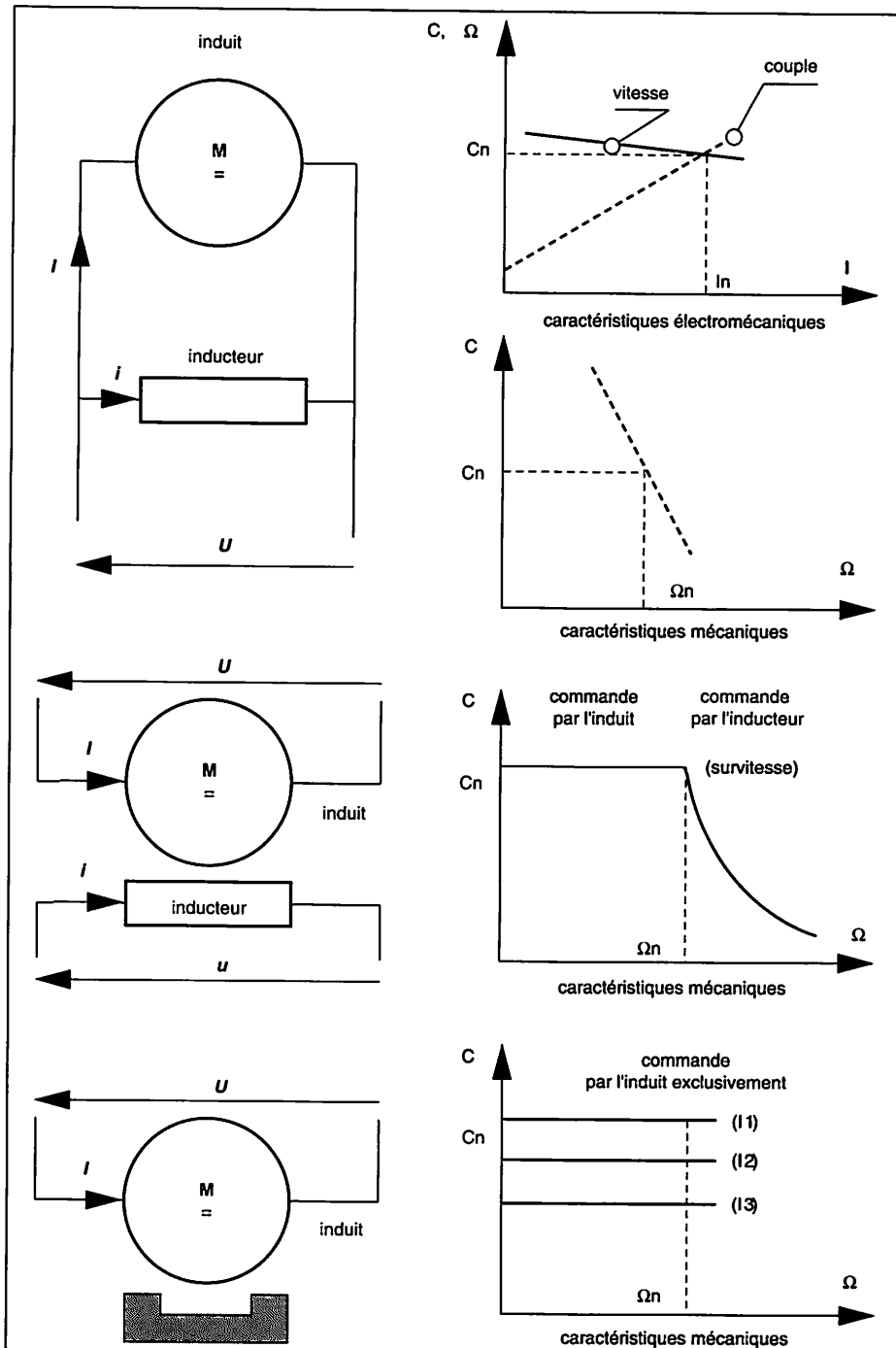


Figure 11.10. Caractéristiques des moteurs à courant continu.

● **Moteurs à excitation « en dérivation » (ou moteurs « shunt »)**

Ils sont conçus pour que leur inducteur et leur induit soient reliés en parallèle. Une seule tension est donc utilisée, le flux  $\psi$  est constant. Alimentés à tension constante, ils ont les mêmes caractéristiques que les moteurs à excitation indépendante. Leur caractéristique principale est de disposer d'une vitesse peu sensible à la charge.

● **Moteurs à excitation indépendante (inducteur bobiné)**

Ces moteurs ont leurs alimentations d'inducteur et d'induit totalement séparées. Pour faire varier leur vitesse, ils peuvent ainsi être commandés par l'induit (à flux constant) ou par l'inducteur (à puissance constante) :

- commandés par l'induit, leur vitesse est pratiquement insensible aux variations de charge, mais ils nécessitent de contrôler de fortes puissances électriques ;
- commandés par l'inducteur, ils nécessitent de faibles puissances de contrôle, mais leur couple est alors variable et le risque d'une rupture de circuit peut entraîner un emballement ( $\phi \rightarrow 0 \Rightarrow \Omega \rightarrow \infty$ ).

● **Moteurs à aimant permanent**

Le champ inducteur est constant et fourni par des aimants. Ces moteurs sont très utilisés pour des puissances allant jusqu'à quelques kW. La variation de vitesse est très facile à réaliser ( $N \approx U/k.\phi \approx \lambda.U$ ).

c) **Caractéristiques des moteurs asynchrones**

Un moteur asynchrone est doté d'une plaque à bornes où aboutissent toutes les connexions des bobines d'induction. Il est ainsi possible de les coupler « en étoile » ou « en triangle » pour les adapter à la tension du réseau (Figure 11.11). Un moteur conçu pour une installation en 230 V (3) peut ainsi être relié à une distribution en 400 V (3) grâce à un branchement des inducteurs « en étoile ». Lors du démarrage d'un tel moteur, il se produit une pointe de courant de l'ordre de cinq à sept fois le courant nominal de fonctionnement (Figure 11.11), il convient de s'assurer que la distribution peut le supporter.

Pour des installations ne nécessitant pas de couple important au démarrage (inerties pures de type machines à bois, pompes centrifuges, etc.), le couplage temporaire des enroulements d'inducteurs « en étoile » est possible pour réduire la pointe de courant. Dans ce cas, la tension dans l'inducteur est  $U_e = U_n.\sqrt{3}$ , mais le couple est alors divisé par trois.

Dans d'autres cas, avec des moteurs spéciaux à rotor bobiné (moteur à bagues), il est possible de démarrer en plaçant provisoirement des résistances en série avec le rotor afin d'augmenter le couple de démarrage.

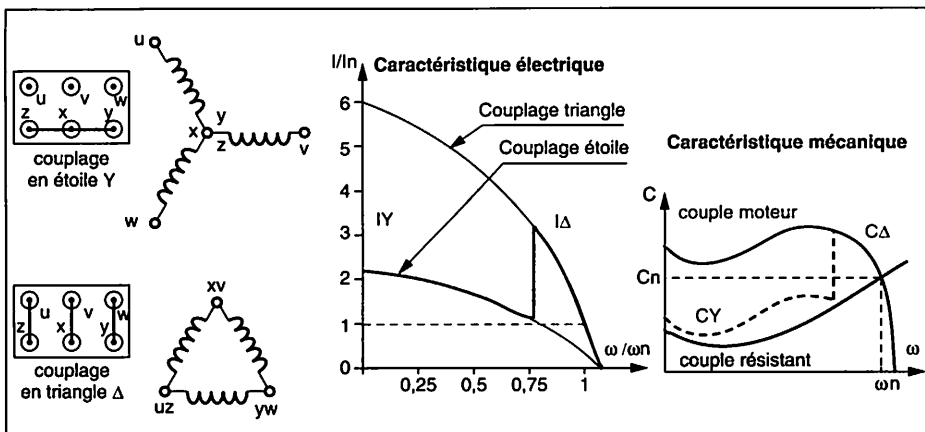


Figure 11.11. Courbes caractéristiques des moteurs asynchrones.

#### d) Caractéristiques des moteurs pas à pas

- **Nombre de pas.** Il varie de 24 à 400 pas par tour, soit une résolution de  $15^\circ$  à  $0,9^\circ$  par pas entier.
- **Nombre de phases.** Il est en général de quatre, mais il en existe qui ont deux, trois ou cinq phases.
- **Taille.** C'est le diamètre extérieur du moteur, exprimé en dixièmes de pouce. Cette caractéristique donne une indication très approximative de la puissance du moteur, mais qui est suffisante en première approche.
- **Couple/vitesse.** Les courbes de la Figure 10.12 donnent une indication pour une association commande-moteur donnée.
- **Couple dynamique.** C'est celui que peut développer le moteur en rotation.
- **Puissance.** On ne peut qu'indiquer une puissance apparente qui est le produit de la vitesse par le couple moyen.
- **Courant nominal.** C'est le courant maximum absorbé en régime permanent par chaque bobine.
- **Fréquence maximale réversible.** C'est la fréquence limite en deçà de laquelle un changement de sens de rotation est possible sans perte de pas.
- **Fréquence maximale unidirectionnelle.** C'est la fréquence limite pour un fonctionnement permanent, à vide, sans perte de pas.
- **Couple statique, ou de maintien.** Il est obtenu avec un courant constant à l'arrêt.
- **Couple de détente ou résiduel.** Il est obtenu en l'absence d'alimentation.

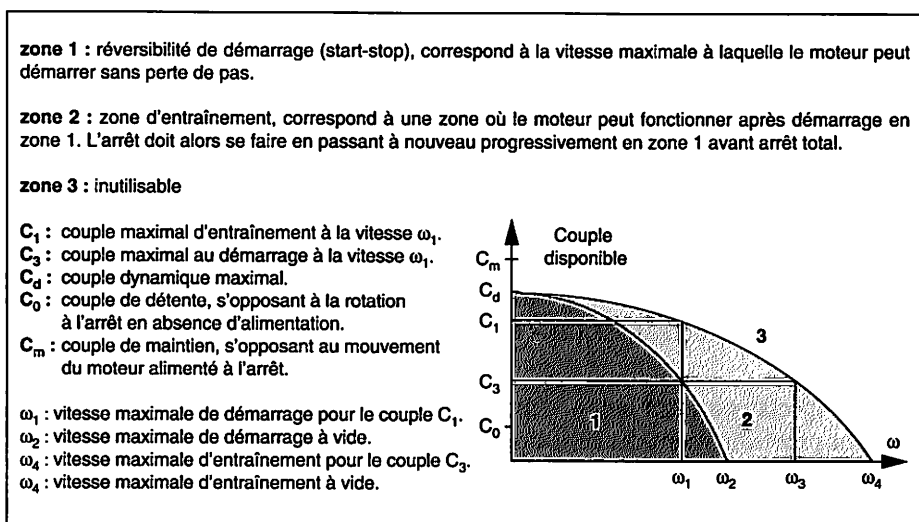


Figure 11.12. Courbes caractéristiques des moteurs pas à pas.

### 3. Commande et protection des moteurs électriques

#### a) Problème général

Pour alimenter un moteur électrique (souvent dénommé départ moteur), il est nécessaire d'assurer plusieurs fonctions :

- **commuter**, établir ou interrompre le circuit d'alimentation du moteur en fonction des besoins du processus ;
- **interrompre**, couper l'alimentation en pleine charge (arrêt d'urgence par exemple) ;

– **protéger contre les courts circuits**, interrompre l'alimentation des circuits pour des intensités nettement supérieures au courant nominal. Cette surintensité se caractérise par une ampleur importante (10 fois  $I_n$ , souvent plus (courant de court-circuit)) et doit être éliminée rapidement pour éviter des effets destructeurs. Il s'agit très souvent de protéger les circuits en amont en évitant la propagation du courant de défaut;

– **protéger contre les surcharges**, interrompre l'alimentation du moteur pour des intensités légèrement supérieures au courant nominal, consécutives généralement à des conditions de travail du moteur au-delà des valeurs nominales. La surcharge se caractérise par une intensité légèrement supérieure au courant nominal (de 1,05 jusqu'à 10  $I_n$ ) qui ne doit pas dépasser une durée normée pour ne pas provoquer des échauffements excessifs et destructeurs. Il s'agit dans ce cas de protéger le moteur contre un dépassement de ses capacités ;

– **sectionner**, isoler en tout ou partie les circuits de leur source d'énergie afin de pouvoir intervenir en toute sécurité sur les installations.

La figure 11.13 montre le schéma du départ moteur du convoyeur de la machine de conditionnement de comprimés. La fonction commutation est assurée par un contacteur KM1.

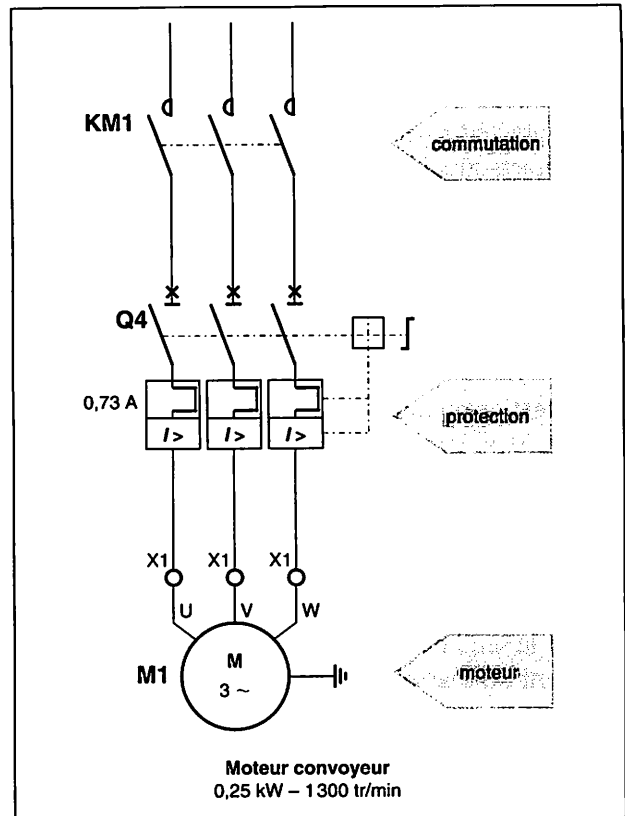


Figure 11.13. Schéma du moteur de convoyeur machine de conditionnement de comprimés.

### b) Commutation par commande électromagnétique

Les relais et contacteurs représentent la manière la plus élémentaire et la plus ancienne de commuter un circuit électrique, éventuellement à plusieurs conducteurs, dans lequel doit circuler un courant important (Figure 11.14).

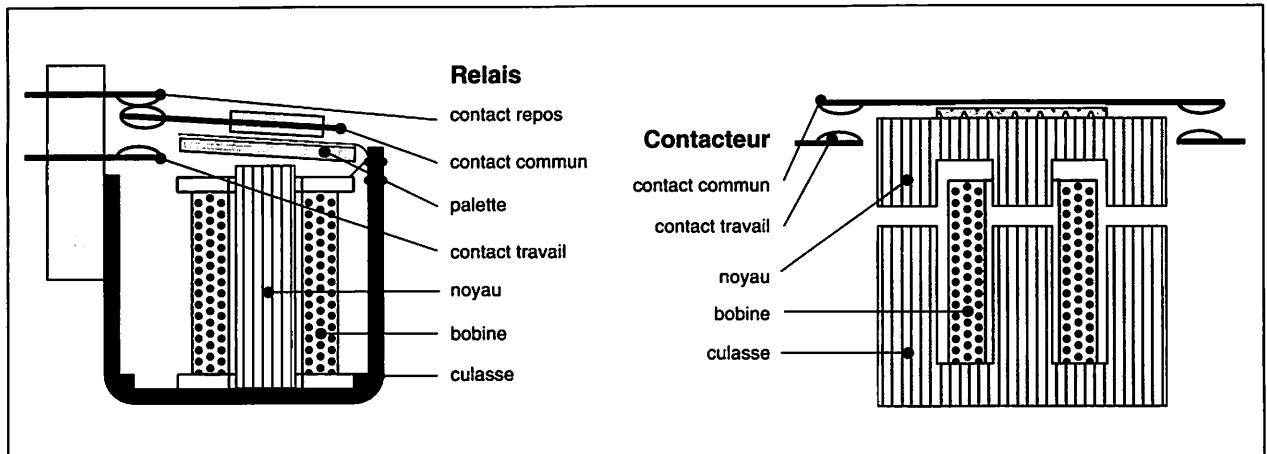


Figure 11.14. Relais et contacteur (principes).

Un relais est constitué d'une bobine alimentée par le circuit de commande, dont le noyau mobile ou la palette provoque la commutation de contacts.

Un contacteur procède d'un même principe mais peut commuter des fortes puissances par un dispositif de coupure d'arc visible sur le contacteur de la

figure 11.15, une chambre de coupure par contact de puissance. Ce dispositif n'est pas toujours très apparent sur des appareils de plus faible pouvoir de coupure (Figure 11.16).

Les contacteurs peuvent disposer soit par construction, soit par des blocs additifs de contacts supplémentaires permettant des commandes et signalisations diverses.

Bien que très employés, les contacteurs présentent l'inconvénient d'un démarrage ou d'un arrêt brutal du moteur. Des matériels utilisant des composants électroniques permettent une alimentation ou une coupure progressive. Ils seront présentés dans la partie 3 de ce chapitre.

### c) Protection du moteur

Elle est assurée dans l'exemple proposé (Figure 11.13) par un disjoncteur (Q4) à déclencheurs magnétothermiques.

La protection contre les fortes surintensités (court-circuits) est assurée par un ensemble de 3 déclencheurs magnétiques (un par phase) fonctionnant par effet électromagnétique ( $I>$ ) et provoquant l'ouverture des contacts quand l'intensité a atteint le seuil de réglage (généralement 13 fois le courant de réglage du déclenchement du thermique - Figure 11.17).

La protection contre les surcharges est assurée par un ensemble de 3 déclencheurs fonctionnant par effet thermique. Ces déclencheurs sont formés de deux lames collées (au coefficient de dilatation différent) et parcourues (ou chauffées) par le courant à contrôler. Ces lames se déforment et peuvent, par l'intermédiaire d'un mécanisme provoquer l'ouverture des contacts quand le couple intensité durée dépasse les valeurs caractéristiques (normes).

Ce disjoncteur assure également la fonction « sectionner ».

Cette solution permet avec deux produits le disjoncteur et le contacteur d'assurer une installation conforme et une bonne coordination entre les protections et commode d'utilisation (réenclenchement).

### d) Autres solutions

La protection contre les courts-circuits peut être assurée par des fusibles. Les fusibles sont des éléments calibrés pour fondre et interrompre le circuit quand l'intensité dépasse la valeur admise. Ils se présentent sous forme de cartouches (Figure 11.18) dont la taille dépend de la tension de service et du calibre (1 à 1250 A). La gamme aM (accompagnement moteur) est calculée pour accepter les surintensités de démarrage. Ces fusibles sont couramment associés à des appareils de type sectionneur interrupteur (Figure 11.20).

Cette solution très économique et employée nécessite de disposer toutefois d'un large éventail de cartouches en stock pour le remplacement. Elle réclame une protection contre les surcharges spécifique qui est alors assurée par un relais thermique. Le déclencheur fonctionne sur le même principe utilisé dans le disjoncteur (bilames), mais à la différence de celui-ci, l'interruption du circuit de puissance est réalisée par le contacteur, un contact à ouverture du relais thermique étant inséré dans le circuit de la bobine du contacteur. Cette solution a été utilisée dans le palletiseur pour le moteur à courant continu (Figure 11.19).

Reposant sur l'association de 3 appareillages distincts, elle permet de répondre aux diverses contraintes de mise en oeuvre et d'exploitation.

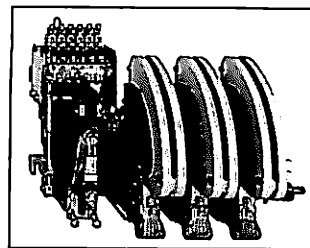


Figure 11.15. Contacteur de forte puissance (Document Schneider Electric).

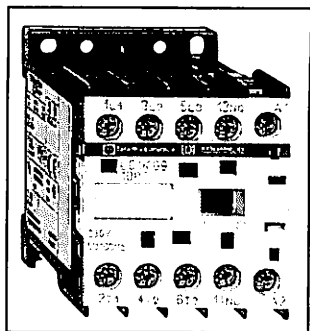


Figure 11.16. Contacteur de faible puissance 12 A (Document Schneider Electric).

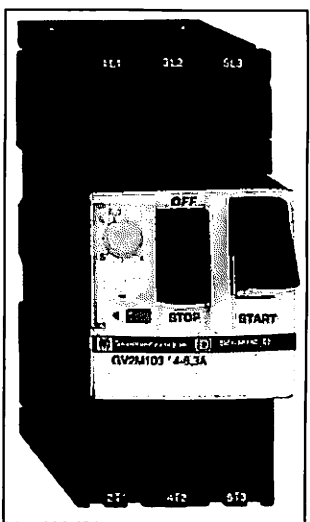


Figure 11.17. Disjoncteur moteur (Document Schneider Electric).



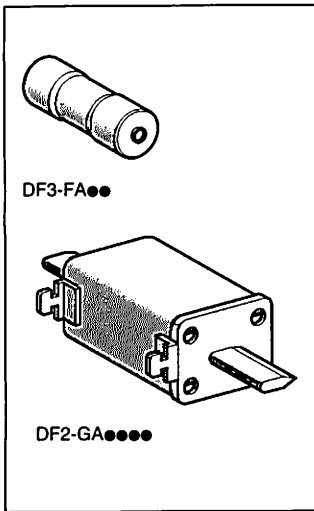


Figure 11.18. Cartouches fusibles (Document Schneider Electric).

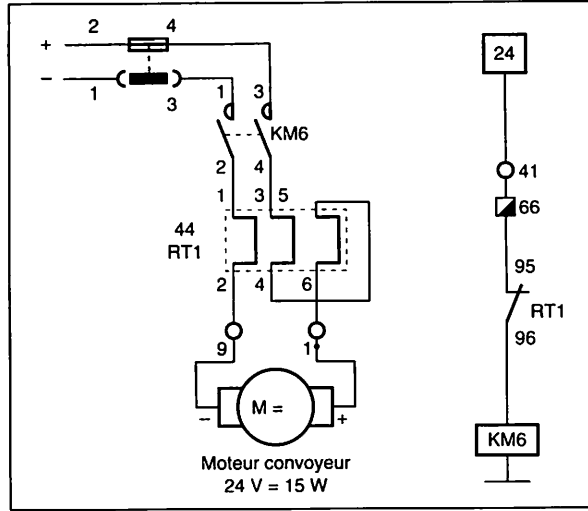


Figure 11.19. Solution de protection avec fusibles et relais thermique d'un moteur à courant continu (Palettiseur).

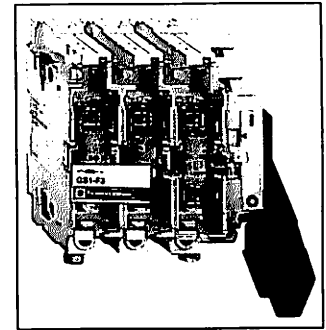


Figure 11.20. Interrupteur sectionneur à fusibles (Document Schneider Electric).

e) Sondes de températures

La solution par relais thermique qui fonctionne avec l'image du courant absorbé ne permet pas de détecter des élévations de températures anormales liées à des défaillances du voisinage (mauvaise ventilation, élévation de la température environnante, etc.). Avec les sondes, une élévation anormale de température du moteur provoque la variation brutale de la résistance de composants de types thermostances insérés dans les bobinages. Cette variation est exploitée par un ensemble relais qui provoque l'ouverture du circuit du contacteur.

f) Évolution des équipements départs-moteurs

Les constructeurs proposent dans les gammes de basses et moyenne puissance des appareils regroupant les fonctions dans un même ensemble (Figure 11.21).

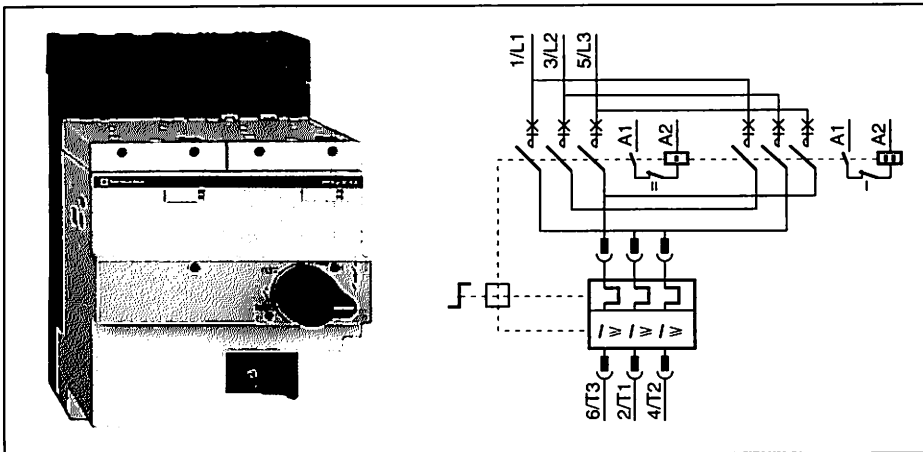


Figure 11.21. Intégral 63 A, deux sens de marche et schéma (doc. Schneider Electric).

Malgré un coût d'équipement plus élevé, cette solution permet un gain appréciable de place et de câblage. Elle assure également une très bonne coordination des protections. Enfin, les constructeurs proposent un nombre important d'additifs permettant d'offrir des fonctionnalités supplémentaires (contacts, limiteurs,...). Récemment est apparue sur le marché une gamme de produits (Figure 11.22) très intégrée (base puissance et base contrôle), communicante via les bus de terrains

(AS-i, Modbus), configurable facilement par matériel ou logiciel (selon les modèles). Cette gamme de produits permet d'assurer les fonctions standard de base mais également les fonctions avancées de gestion et de suivi (états de charge du moteur, historique des défauts, nombre de manœuvres,...).

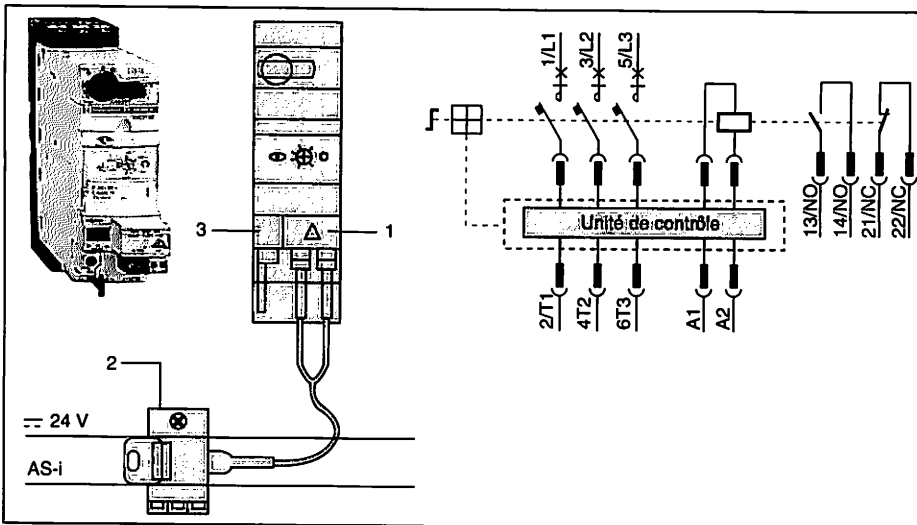


Figure 11.22. Démarrateur contrôleur modèle U (12 – 32 A) un sens de marche, relié à un bus AS-i et schéma (doc. Schneider Electric).

## 4. Commande à vitesse variable

La solution de la commutation électromagnétique présente les inconvénients d'un manque de progressivité tant dans l'application de la tension que dans la disparition. De plus, nombre d'applications nécessitent des vitesses réglables ou variables incompatibles avec les solutions de la variation mécanique. Les progrès de l'électronique ont permis la mise à disposition de constituants permettant de faire varier la vitesse des moteurs électriques.

### a) Variation de vitesse pour moteurs à courant continu

C'est la technique la plus ancienne et la plus facile à réaliser.

Pour un moteur à courant continu, le couple obtenu est l'image du courant qui le traverse, et peut être indépendant de la vitesse (flux constant), la vitesse est celle de la tension ou de l'inverse du flux d'induction. Pour en faire varier la fréquence de rotation, il suffit de faire varier la tension d'alimentation. Si on dispose d'un moteur à excitation séparée, on peut agir à la fois sur le flux magnétique produit par le bobinage d'induit, et sur l'alimentation du bobinage d'inducteur (ou d'excitation) pour augmenter la vitesse. Cette variation de tension peut se faire de manière continue (électronique à transistors) ou par hachage du courant (Figure 11.23).

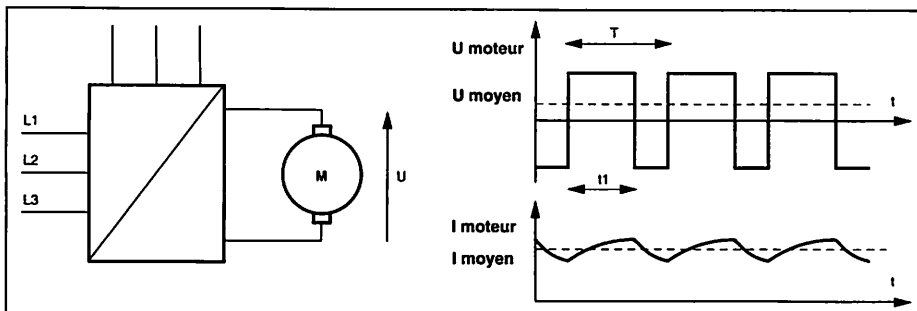


Figure 11.23. Variation de vitesse d'un moteur à courant continu par hacheur.

### b) Démarrage et ralentissement progressif du moteur asynchrone

Nombre d'applications ne requièrent qu'un démarrage et un ralentissement progressifs, pour réduire les sollicitations électriques et les sollicitations brutales de la mécanique. Une solution économique est proposée par des constituants appelés démarreurs (Figure 11.24). Le démarreur (1) paramétrable à partir de son terminal (2) gère les phases transitoires de démarrage et d'arrêt par la maîtrise du couple pendant les phases d'accélération (et de décélération). En régime établi, il est possible de court-circuiter le démarreur par le contacteur (3). Les fonctions de protection électronique sont toutefois maintenues ainsi que les fonctions de communication par réseaux.

### c) Variation de la vitesse du moteur triphasé

La variation de vitesse d'une machine asynchrone est mal aisée. Les grandeurs de couple et de vitesse ne sont pas indépendantes, à travers les variables de flux et de fréquence qu'il est nécessaire de contrôler.

La vitesse du rotor  $n$  dérive de la vitesse de synchronisme  $n_s = f_s / p$  ( $f_s$ , fréquence des courants statoriques et  $p$ , nombre de paires de pôles). Faire varier  $n$  revient à faire varier  $n_s$  c'est-à-dire  $f_s$ . Il est donc nécessaire d'alimenter le moteur par un convertisseur de fréquence inséré entre le réseau et le moteur. La principale difficulté consiste à générer des ondes les plus proches des formes sinusoïdales. Le convertisseur utilisé prend fréquemment le nom d'onduleur. Une des techniques les plus utilisées, est celle de la modulation de largeur d'impulsion « MLI » qui permet d'obtenir des formes quasi sinusoïdales (Figure 11.25), par hachage d'un courant continu, à des fréquences de quelques milliers d'Hertz.

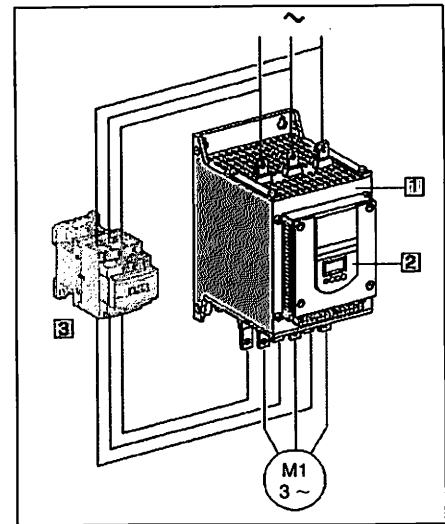


Figure 11.24. Démarreur Altistart (doc. Schneider Electric).

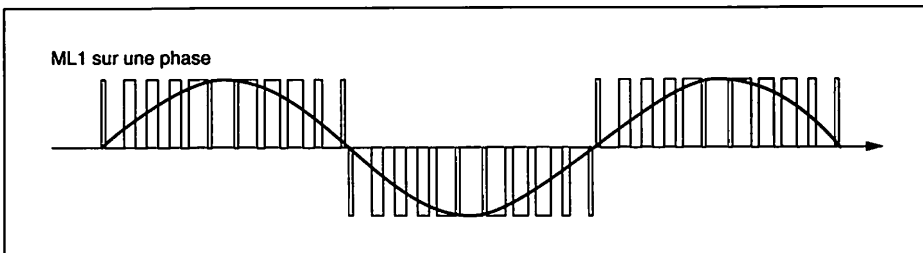


Figure 11.25. Obtention d'une onde sinusoïdale par hachage d'un courant continu (doc. InterSections Schneider Electric).

#### ● Contrôle en $E/f$

Pour conserver les performances du moteur (couple maximal pour toute vitesse), il faut maintenir le flux statorique constant. Cette condition peut être satisfaite en faisant varier la tension dans le même sens que la fréquence pour garder le rapport fréquence/tension constant. C'est la commande du contrôle vectoriel en tension ou contrôle  $E/f$ , mais elle n'est pas très performante pour un contrôle du couple à basse vitesse.

#### ● Contrôle vectoriel de flux

Pour obtenir des performances dynamiques importantes et un contrôle du couple à basse vitesse (voire à vitesse nulle), il est nécessaire d'utiliser une commande bien plus complexe, permettant de découpler les variables de flux et de couple.

C'est la technique du contrôle vectoriel de flux, très employée dans le cas des moteurs sans balais. L'utilisation du capteur de position permet d'obtenir des commandes optimales, nécessaires dans des applications où la recherche d'un positionnement précis est essentielle (robotique, machine outil,...).

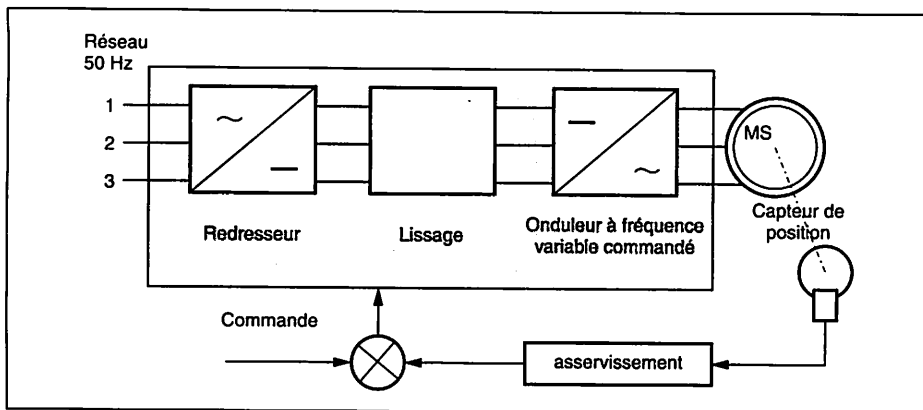


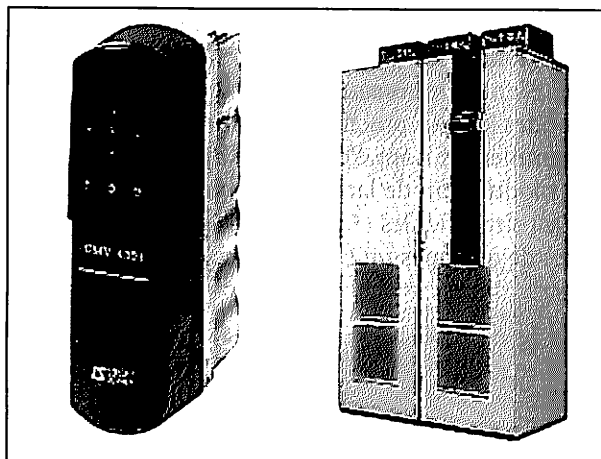
Figure 11.26. Schéma simplifié d'une commande à contrôle vectoriel de flux.

Les constructeurs proposent des variateurs universels permettant de choisir la commande la mieux adaptée à l'application :

- fonctionnement à contrôle tension fréquence ( $U/f$ ) en boucle ouverte ;
- fonctionnement à contrôle vectoriel de flux sans retour ;
- fonctionnement à contrôle vectoriel de flux avec retour.

Cette dernière possibilité permet de mieux maîtriser la vitesse et le couple sur une plus grande plage de vitesse (y compris la vitesse nulle), avec des performances dynamiques accrues.

Figure 11.27. Variateurs universels pour moteur asynchrone et autosynchrone pour des puissances jusqu'à 90 KW (doc. LEROY-SOMER).



● **Les moteurs électriques** sont les actionneurs rotatifs les plus répandus. Dans les mécanismes courants, ils sont fréquemment associés à des transformateurs de mouvements qui permettent d'obtenir les formes et les valeurs voulues. En effet, les fréquences de rotation des moteurs sont souvent trop élevées ( $1500 \text{ min}^{-1}$ , en standard) pour les applications usuelles.

● **Les moteurs asynchrones triphasés** sont les plus utilisés, dans les applications courantes à vitesse constante. Les atouts sont sa simplicité et sa robustesse. Les récents progrès des variateurs électroniques permettent l'emploi dans des régimes à basse vitesse en conservant un niveau de couple suffisant.

● **Les moteurs à courant continu**, historiquement apparus les premiers, ont été très employés dans le domaine de la vitesse variable. Ils voient leur champ d'application se réduire. Bien que les variateurs soient de conception simple et donc peu onéreux, le collecteur et les balais sont souvent la source d'ennuis (étincelles, perturbations, usure,..) qui conduisent à une restriction des domaines d'utilisation et des activités de maintenance importantes.

● **Les solutions à moteurs auto-synchrones** (actionneurs rotatifs et linéaires), bien que ces ensembles soient plus coûteux à l'achat que les solutions classiques (machines asynchrones ou à courant continu), s'imposent dans toutes les applications où des propriétés dynamiques sont recherchées. En effet, les performances des ensembles auto-synchrones, à basse vitesse notamment autorisent, dans nombre de cas, la suppression ou la simplification des transformateurs de mouvement et permettent la réalisation de mécanismes plus simples.

● **L'actionneur électrique**, à l'inverse de l'actionneur pneumatique, est un convertisseur d'énergie en relation avec un réseau infiniment puissant. Deux types de protections sont nécessaires :

– celle qui concerne à protéger l'actionneur, en cas de demande excessive de la charge, appelée couramment surcharge. Cette demande se traduit par la consommation d'un courant supérieur à la valeur admissible, qui par effet joule, peut produire des échauffements destructeurs. Des dispositifs à relais thermique ou à sonde électronique permettent d'interrompre l'alimentation et faire cesser l'anomalie ;

– celle qui consiste à protéger l'alimentation des défaillances de type court-circuit, dont les effets peuvent se révéler catastrophiques (déformations des circuits, incendies,...). Des dispositifs à fusibles ou relais magnétiques assurent la protection.

● Les appareils qui concourent à interrompre l'alimentation en cas de défaut sont appelés **disjoncteurs**. Ceux-ci sont préférés à des éléments de type fusibles par les facilités de réenclenchement après coupure et les nombreuses possibilités techniques offertes : signalisation, communication, mise en réseau.

## Exercices

**EXERCICE 1.** Renommer le contact électrique à pression pour le rendre conforme à la normalisation électrique sur la figure FM5.25.

**EXERCICE 2.** Que représentent les symboles Q11 à Q14 (Figure FM5.26) ?

# 12

# Sûreté de fonctionnement

La complexité croissante des systèmes techniques et les énergies importantes mises en œuvre engendrent des risques graves en cas de défaillance comme : les risques sur les personnes (blessures légères à très graves, maladies chroniques, invalidités,...), les biens (déformations, destructions, non intégrité des données,...) et l'environnement (pollution, contamination, parasitage électromagnétique,...). La défaillance peut se manifester par d'autres effets heureusement moins catastrophiques, mais préoccupants dans le climat économique actuellement très concurrentiel : la panne. Celle-ci se traduit en premier lieu par un arrêt de production donc un manque à gagner et des coûts de remise en état (2 000 € par minute d'arrêt pour une ligne d'assemblage de l'industrie automobile).

Sans aborder la présentation des techniques lourdes de conception sûres, qui sort du cadre de l'ouvrage, ce chapitre développe à travers quelques exemples la prise en compte de la dimension sûreté de fonctionnement dans l'élaboration de solutions câblées pour la réalisation de la commande.

## I. Quelques définitions

La sûreté de fonctionnement caractérise l'aptitude d'un dispositif à éviter l'apparition de défaillances et à minimiser leurs effets lorsqu'elles se sont produites. Elle vise à conférer une confiance justifiée dans le service délivré. C'est une notion générique qui peut être appréciée à l'aide d'un certain nombre d'attributs comme :

- la sécurité-innocuité (pas de survenue de défaillances catastrophiques) ;
- la sécurité-confidentialité (manipulations non autorisées d'informations) ;
- la disponibilité (prêt à l'utilisation) ;
- la fiabilité (continuité du service) ;
- l'intégrité (pas d'altérations inappropriées d'informations) ;
- la « maintenabilité » (facilité d'entretenir et de réparer).

Le concepteur doit donc rechercher des solutions qui garantissent sécurité et disponibilité pour un équipement tout au long du cycle de vie en fonction des spécifications du cahier des charges.

### ● Sécurité

La sécurité est l'aptitude d'un dispositif à ne présenter aucun danger pour les personnes, les biens ou l'environnement.

### ● Disponibilité

La disponibilité  $D$  d'un équipement caractérise l'aptitude d'un produit, d'une installation, d'être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, les approvisionnements étant assurés.

$$D = \frac{\text{temps de disponibilité}}{\text{temps de disponibilité} + \text{temps d'indisponibilité}}$$

● **Fiabilité**

La fiabilité d'un produit est l'aptitude de celui-ci à accomplir une fonction requise, pendant une période donnée (0,t) et dans des conditions définies. Elle caractérise la continuité du service

● **Maintenabilité**

La maintenabilité caractérise l'aptitude à la réparation après défaillance.

● **Panne**

La panne est l'état d'un produit (d'un composant, constituant ou équipement) le rendant inapte à accomplir une fonction prévue dans des conditions données d'utilisation.

● **Défaillance**

C'est un changement d'état qui traduit un écart par rapport au fonctionnement attendu par « l'utilisateur » (l'utilisateur est pris au sens large et peut être un autre système en relation avec le premier).

● **Dilemme sécurité disponibilité (sûreté de fonctionnement)**

Une approche par la sécurité aura tendance à privilégier les situations de repli ou d'arrêts en cas de doute sur le fonctionnement au détriment de la disponibilité. Certains choix permettent de privilégier ou la sécurité ou la disponibilité. Les techniques assurant disponibilité et sécurité sont beaucoup plus rares et coûteuses. Ainsi, le travail d'une recherche d'une meilleure sûreté consiste à éliminer ou réduire les causes de pannes ou d'accident.

## II. Amélioration de la sûreté de fonctionnement

### 1. Altérations de la sûreté, la défaillance

La défaillance traduit un écart par rapport au fonctionnement attendu par l'utilisateur. Elle est la conséquence d'une erreur dont la cause est une faute.

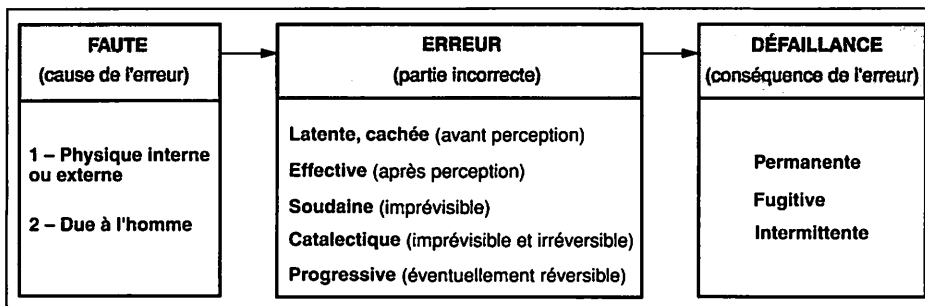


Figure 12.1. Triptyque fautes-erreurs-défaillances.

**EXEMPLE**

Le cas de l'explosion de la navette spatiale américaine est une défaillance. La protection thermique de la navette est une protection par tuiles (ou briques réfractaires). Au moment du décollage, une pièce est entrée en collision avec le revêtement de tuiles, c'est une *faute physique externe*. Celle-ci a occasionné la disparition de briques, c'est l'*erreur*. Elle est *latente*, puis *effective* dès détection par les contrôleurs au sol. Elle est de nature *catalectique* (imprévisible et irréversible). Cette erreur a occasionné une défaillance au moment de l'entrée dans l'atmosphère provoquant la destruction de la navette et la mort des passagers. Les situations sont souvent et heureusement moins dramatiques.

La défaillance peut ne pas occasionner de dommage (d'après la norme EN 1050 : le dommage est une lésion physique et/ou une atteinte à la santé ou aux biens). Par exemple, la rupture (erreur catalectique) d'une chaîne de transmission d'un convoyeur, par usure (faute physique interne) provoquera l'arrêt de celui-ci et une perte de production. Cette défaillance, conduisant à une panne, aura un effet sur la disponibilité de l'équipement mais à priori pas sur la sécurité, à moins que la projection des maillons de la chaîne, par exemple, ne provoque des dommages aux personnes présentes.

### ● Défaillances d'une chaîne fonctionnelle

Les défaillances peuvent affecter l'ensemble du système (panne d'énergie ou défaillance de l'automate programmable, par exemple). Elles peuvent être également localisées au niveau d'une chaîne fonctionnelle et concerner plus particulièrement :

- la chaîne d'action (défaillance du préactionneur, de l'actionneur ou de l'effecteur, voire de la mécanique du processus) ;
- la chaîne d'acquisition (défaillance du capteur, de la transmission de l'information) ; avec pour effet, en général, une non-exécution, ou un non-arrêt d'une action normalement demandée, ou, au contraire, une exécution ou un arrêt intempestif.

D'un point de vue commande, ces défaillances peuvent influencer sur l'évolution des modèles de comportement soit par un blocage, soit par une évolution intempestive générant des discordances PO-PC (incohérences logiques entre le fonctionnement attendu et celui observé).

### ● Localisation des défauts

Pour une installation commandée par automate programmable, et bien que les situations rencontrées soient extrêmement variées, des éléments statistiques permettent de dégager une répartition générale des défauts.

On retiendra que ceux-ci se localisent principalement au niveau des chaînes d'acquisition (2/3) et d'action, l'automate représentant moins de 10% des défauts et la part imputable à l'unité centrale est très faible (de l'ordre de 2%).

## 2. Maîtrise des risques

Si les premières mesures générales d'hygiène et de sécurité du travail datent de 1913, force est de constater que la construction européenne depuis la fin des années 80 au travers de directives, transposées en droit français, dans le code du travail, a fait évoluer la législation et améliorer fortement la sécurité. Les **directives** fixent les exigences essentielles et les objectifs que doivent remplir les concepteurs. Elles restent très générales dans leur description et ne rentrent pas dans les détails techniques.

### EXEMPLE

**Directive 89-392- Annexe 1 § 1.2.7, Défaillance du circuit de commande.**

« Un défaut affectant la logique du circuit de commande ou une défaillance ou une détérioration du circuit de commande ne doit pas créer de situations dangereuses.

En particulier, il ne doit pas y avoir :

- ni marche intempestive ;
- ni empêchement de l'arrêt de la machine si l'ordre en a déjà été donné ;
- ni chute ou éjection d'un élément mobile de la machine ou d'une pièce tenue par la machine ;
- ni empêchement de l'arrêt automatique ou manuel des éléments mobiles, quels qu'ils soient ;
- ni inefficacité des dispositifs de protection ».



**EXEMPLE**

**Code du travail : Décret 93-40 art. R. 233-28, Arrêt d'urgence.**

« Chaque machine doit être munie d'un ou de plusieurs dispositifs d'arrêt d'urgence clairement identifiables, accessibles et en nombre suffisant, permettant d'éviter des situations dangereuses risquant ou en train de se produire ».

● **Emergence d'un dommage (d'après la norme NE 1050), notion de risques**

Toute situation de travail intègre des phénomènes dangereux (d'après l'EN 1050, le phénomène dangereux est la cause capable de provoquer une lésion) susceptibles de causer des dommages.

Le dommage, caractérisé par sa gravité, résulte de la conjonction de trois causes (Figures 12.2 et 12.3) :

- la présence de *personne(s)* ;
- l'existence de *phénomène dangereux* (liés à l'utilisation des énergies mécaniques, thermiques, ...) ;
- un *événement déclencheur* (rupture, étincelle,...).

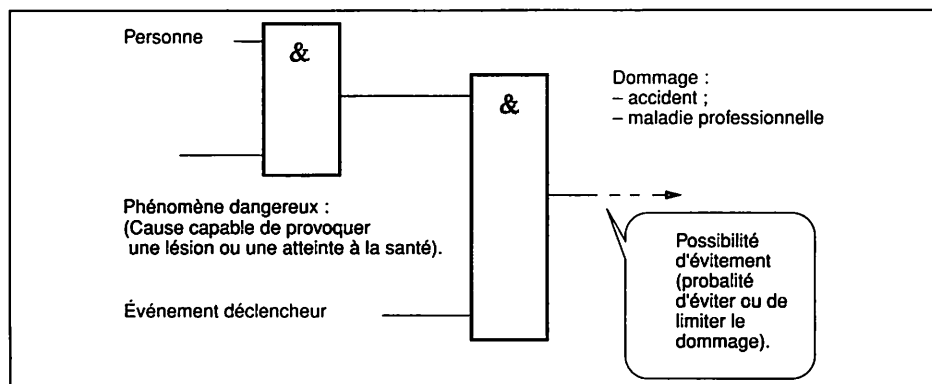


Figure 12.2. Survenue d'un dommage.

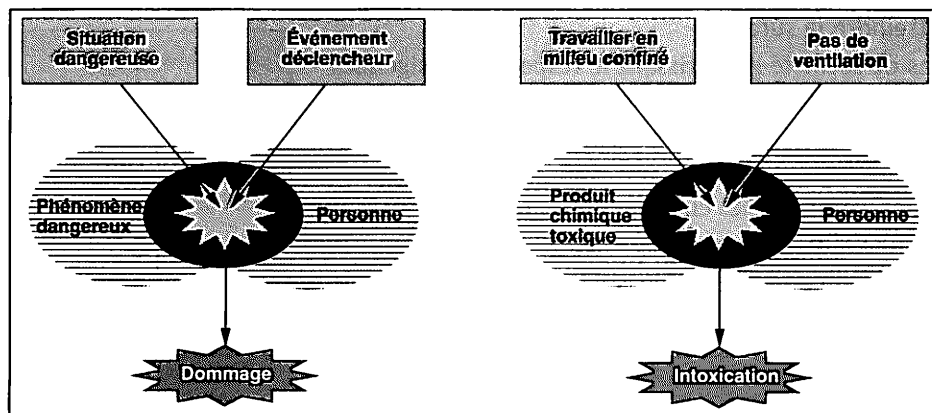


Figure 12.3. Illustration d'une conjonction de trois causes provoquant un dommage (source : INRS).

Il existe fort heureusement des possibilités d'évitement.

Le **risque** est la mesure d'un danger (de la survenue d'un dommage). Il dépend de deux éléments.

La probabilité d'occurrence du dommage déterminée par :

- la fréquence et la durée d'exposition ;
- la probabilité que le dommage survienne ;
- la possibilité d'éviter ou de limiter le dommage.

La gravité du dommage déterminée par :

- le nombre de personnes concernées ;
- l'importance du dommage.

Selon les industries et les situations, l'évaluation des risques s'effectue à partir de divers outils, nombreux et variés (risque sismique : échelle de Richter, risque chimique, nucléaire, etc.). La recherche de la sécurité dans les systèmes de commande des systèmes de commande des équipements automatisés est effectuée couramment à partir d'une échelle à 5 niveaux (Figure 12.4).

L'estimation du risque s'effectue à partir de la prise compte de 3 facteurs à deux niveaux :

- gravité de la lésion (facteurs S, niveau S1 ou S2) ;
- fréquence et durée d'exposition (facteur F, niveau F1 ou F2) ;
- possibilité d'éviter ou de limiter le phénomène (facteur P, niveau P1 ou P2).

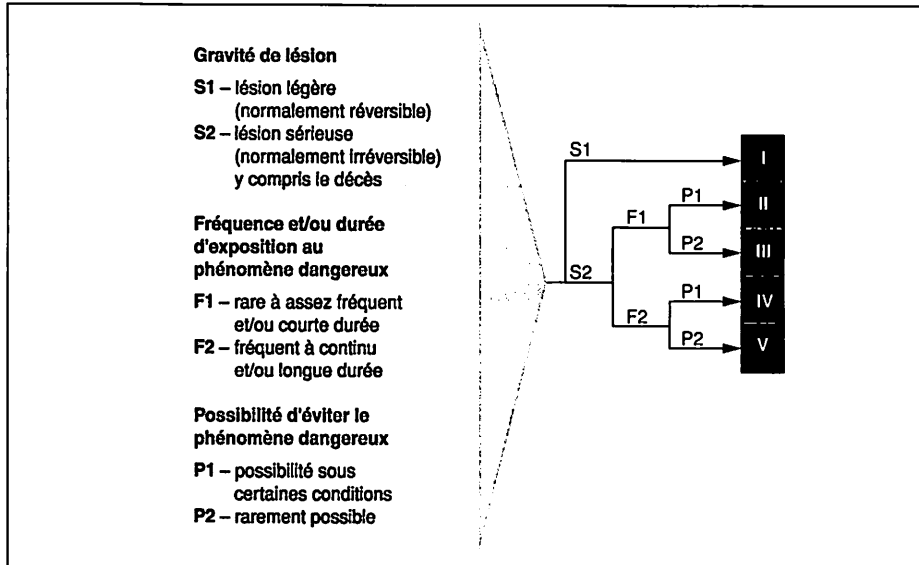


Figure 12.4. Estimation des risques pour un système de commande.

● Démarche générale pour atteindre la sûreté

La mise en œuvre des moyens de sécurité garantissant le respect des exigences essentielles des directives passe par une analyse des risques.

Les principales étapes, préconisées par la norme EN 1050 sont indiquées figure 11.5 :

- phase 1, appréciation des risques ;
- phase 2, prévention des risques, comment les éliminer ou les réduire ?
- phase 3, conception des systèmes sûrs.

La problématique est variée, lourde et complexe et dépasse largement du cadre de l'ouvrage. Le paragraphe qui suit n'abordera que le cas d'un circuit de contrôle de l'énergie afin d'illustrer quelques dysfonctionnements possibles d'un circuit électromécanique.

● Illustration : défaillances d'une chaîne de sécurité câblée utilisant des éléments électromécaniques

Les principales causes de défaillances des circuits sont liées à l'usure mécanique, électrique, les surcharges (surtensions et surintensités et l'environnement (poussières, rayonnement, température) des composants (contacts des boutons poussoirs, mauvais fonctionnement des contacteurs, rupture des liaisons,...).

Les effets principaux sont :

- le contacteur ne commute pas le courant quand il le devrait ;
- le contacteur reste collé alors qu'il devrait s'ouvrir.

Soit le circuit de commande conventionnel pour deux moteurs, représenté figure 12.6. Les ordres « marche moteur 1 » et « marche moteur 2 » sont émis par la partie commande (automate programmable, par exemple). Par souci de clarté

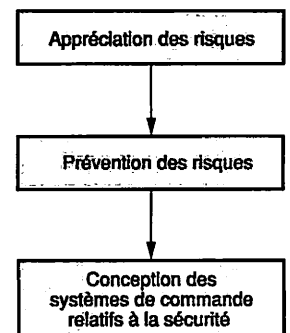


Figure 12.5. Phases principales d'une démarche de sécurité.

et de commodité de compréhension, les composants de protection électrique telles que sectionneur, fusibles, relais thermiques et autres n'ont pas été représentés et les dénominations des composants (boutons poussoirs) utilisent les mnémoniques.

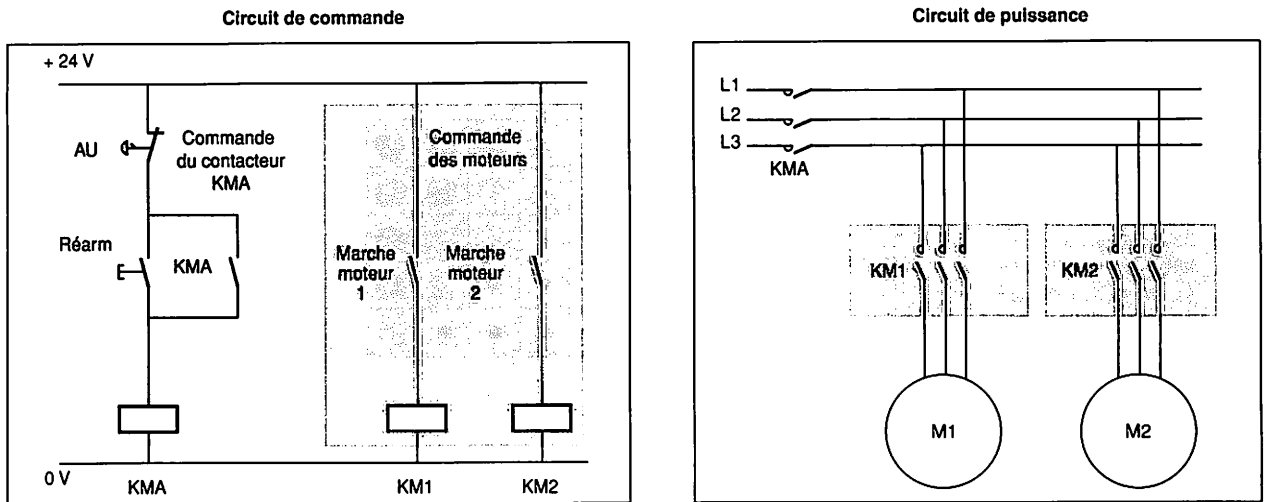


Figure 12.6. Circuit de commande conventionnel (schéma de principe).

**Fonctionnement :** à tout moment, une action sur la commande de l'arrêt d'urgence «AU» entraîne le relâchement du contacteur KMA par défaut d'alimentation et l'ouverture du circuit de puissance par les contacts de KMA : les deux moteurs ne sont plus alimentés. La commande manuelle d'arrêt d'urgence «AU» est du type «coup de poing» à verrouillage mécanique et déverrouillage par clé, interdisant un redémarrage immédiat. De plus, une action de réarmement manuel «Réarm» est nécessaire pour ré-alimenter le contacteur KMA après le déverrouillage du bouton «AU».

**Inconvénient :** ce système est mis en défaut dans le cas où le contacteur KMA reste collé par soudure de ses contacts, l'appui sur le bouton coup de poing d'arrêt d'urgence étant alors inopérant. Ceci est d'autant plus ennuyeux que le collage du contacteur s'effectue sans que l'on puisse le savoir. Malgré ses faiblesses, ce type de circuit peut être employé sur des machines présentant peu de danger.

### 3. Recherche d'une catégorie de système de commande (d'après la norme EN 954)

Seule la chaîne de sécurité, par arrêt d'urgence, est abordée dans cet ouvrage et l'approche concerne principalement les fonctions de sécurité.

#### ● Fonctions de sécurité

Les fonctions de sécurité sont destinées à assurer la surveillance, la commande, l'arrêt de fonctionnement ou la séparation des sources d'énergie. Les fonctions essentielles concernent l'arrêt d'urgence et les dispositifs de verrouillage (ou d'inter verrouillage), les commandes bi-manuelles et les barrières immatérielles.

La norme EN 954-1 aide le concepteur à choisir un système de commande sûr afin que les défaillances relatives à la partie sécurité ou les perturbations extérieures ne puissent pas conduire à une situation dangereuse sur la machine (ou l'équipement).

Une première démarche consiste à évaluer le niveau de risques. Une matrice permet la détermination de la catégorie du système de commande en fonction des risques estimés (Figure 12.7).

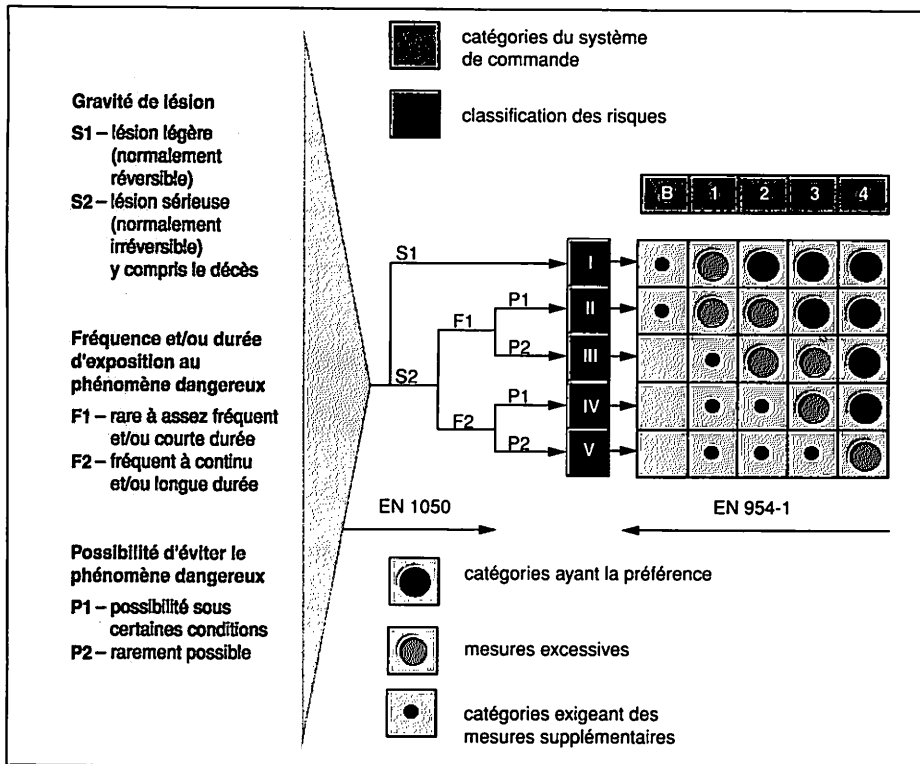


Figure 12.7. Tableau de choix des niveaux de sécurité des systèmes de commande.

L'exploitation du tableau s'effectue en commençant par l'estimation

- de la gravité de la lésion (S1 ou S2);
- puis la fréquence (F1 ou F2);
- enfin les possibilités d'évitement (P1 ou P2).

Le chemin ainsi défini conduit à l'appréciation d'un niveau de risque entre I et V et déterminant la catégorie du système de commande adaptée. La norme classe les catégories des systèmes de commande en cinq niveaux aux exigences croissantes en matière de sécurité de B, 1, 2, 3, 4 (Figure 12.8). Par exemple, le chemin S2, F2, P1 conduit à un risque de niveau IV et impose pour la commande la catégorie 3.

Le tableau (Figure 12.8) précise les principales caractéristiques des diverses catégories, notamment le comportement des circuits en cas de défaut et les incidences sur la structure des circuits de sécurité. Il introduit la notion de redondance pour obtenir des circuits plus sûrs.

Cat-egories	Base principale de la sécurité	Exigence du système de commande	Comportement en cas de défaut	Structure typique d'un circuit de sécurité en cas de défaut	Commentaires
<b>B</b>	Par la sélection des composants conformes aux normes pertinentes	Contrôle correspondant aux règles de l'art en la matière	Perte possible de la fonction de sécurité		Perte possible de la fonction de sécurité
<b>1</b>	Par la sélection de composants conformes aux normes pertinentes	Utilisation de constituants et de principes éprouvés	Perte possible de la fonction de sécurité. Probabilité plus faible qu'en B	<p>*Unité de traitement</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de redondance sur E</li> <li>• Pas de redondance interne assurée par un relais à contacts liés mécaniquement</li> <li>• Pas de redondance sur S</li> </ul>

Catégories	Base principale de la sécurité	Exigence du système de commande	Comportement en cas de défaut	Structure typique d'un circuit de sécurité en cas de défaut	Commentaires
2	Par la structure des circuits de sécurité	Test par cycle. La périodicité du test doit être adaptée à la machine et à son application	Défaut détecté à chaque test		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redondance ou pas sur les entrées</li> <li>• La boucle de retour permet d'assurer un test cyclique sur la sortie</li> </ul>
3	Par la structure des circuits de sécurité	Un défaut unique ne doit pas conduire à la perte de la fonction de sécurité. Ce défaut doit être détecté si cela est raisonnablement faisable	Fonction de sécurité garantie, sauf en cas d'accumulation de défauts		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redondance sur les E</li> <li>• Redondance sur les S</li> </ul>
4	Par la structure des circuits de sécurité	Un défaut unique (ou une accumulation de défauts) ne doit pas mener à la perte de la fonction de sécurité. Ce défaut doit être détecté dès, ou avant la prochaine sollicitation de la fonction de sécurité	Fonction de sécurité toujours garantie		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redondance sur les E</li> <li>• Redondance sur les S</li> <li>• La boucle de retour permet d'assurer un test cyclique sur les sorties</li> </ul>

Figure 12.8. Catégories des systèmes de commande.

## 4. Techniques pour améliorer la sécurité

Il n'est pas souvent possible de réduire le risque à la source. Plusieurs techniques sont employées :

- empêcher la présence de personne dans une zone à risques ;
- réaliser des fonctions de sécurité fiables et sûres permettant d'avoir un comportement sûr lors de l'entrée d'une personne dans la zone dangereuse ou en cas de dysfonctionnement.

### a) Éloignement des personnes

Une des solutions utilisées consiste à confiner la zone « dangereuse » en utilisant des obstacles surveillés (protection par dispositions), empêchant, sauf procédures particulières, le voisinage des personnes (protection collective) et des équipements. La figure 12.9 montre une installation de robots de soudage de l'industrie automobile. On observera, sur les cotés, les grilles métalliques empêchant l'intrusion d'un opérateur et des panneaux formant écran pour protéger du rayonnement des soudures. Il existe d'autres techniques visant à empêcher l'accès d'une personne dans la zone pouvant présenter des risques tels les dispositifs de protection électro-sensibles (Figure 12.10). Ces dispositifs utilisant les faisceaux d'un ensemble de cellules photo-électriques sont conçus pour détecter la présence ou le passage de tout ou partie d'une personne dans le champ de détection et arrêter tout mouvement dangereux de la machine en agissant sur son circuit de commande. Ce type de dispositif n'est pas adapté aux machines présentant des risques de projections.



Figure 12.9. Installation de soudage robotisée avec protecteurs latéraux.

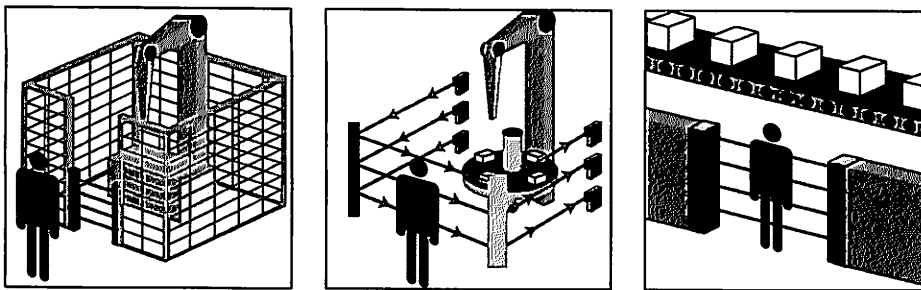


Figure 12.10. Exemples d'application de dispositifs électro-sensibles (doc. INRS).

**b) Redondance et surveillance**

La **redondance** peut être définie (norme AFNOR X 60-500) comme étant « l'existence dans une entité de plus d'un moyen pour accomplir une fonction requise » ou encore comme (EN 60204-3.47) : « la duplication de dispositifs ou systèmes visant à garantir que, dans l'éventualité d'une défaillance dans l'exécution de sa fonction, un autre est disponible pour la dite fonction. »

La redondance peut porter sur tout ou partie du système automatique. Cette technique s'applique aussi bien aux éléments matériels qu'aux éléments immatériels comme les logiciels.

**5. Illustration, évolution de la chaîne de sécurité câblée**

**a) Redondance matérielle (sur les sorties)**

On ajoute, par rapport au circuit de la figure 12.6, un contacteur supplémentaire KMB, dont les contacts de puissance et de commande sont câblés en série avec ceux de KMA (Figure 12.11).

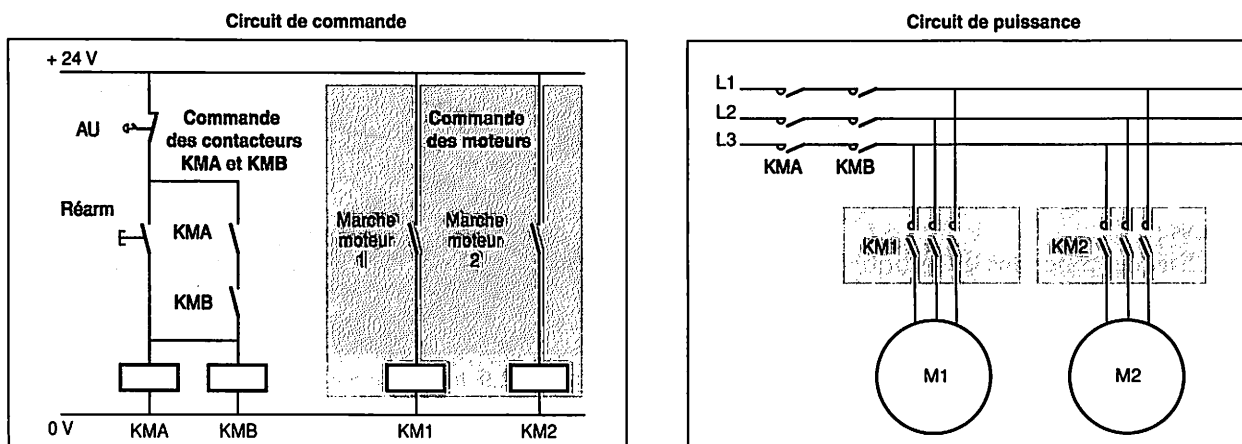


Figure 12.11. Circuit de commande avec redondance des sorties (principe).

● **Fonctionnement** : suite à une action sur l'arrêt d'urgence, les deux contacteurs KMA et KMB retombent en même temps, provoquant l'ouverture du circuit de puissance par leurs contacts respectifs montés en série. Dans le cas où l'un des deux contacteur reste collé, l'autre est suffisant pour assurer la coupure recherchée du circuit de puissance.

● **Inconvénient** : il est impossible de savoir si l'un des deux contacteur KMA ou KMB reste « collé » puisque l'autre assure un fonctionnement apparemment correct, alors même que la redondance a disparu. Le niveau de sécurité a diminué sans que l'on ne le sache, le circuit se comportant comme le précédent. Tout se passe comme si on était ramené à un seul contacteur. Il est donc nécessaire de détecter l'anomalie pour intervenir afin de retrouver un niveau de sécurité originel.

**b) Surveillance matérielle**

La figure 12.12 illustre cette technique avec un circuit de commande comportant deux contacts liés pour chaque contacteur KMA et KMB.

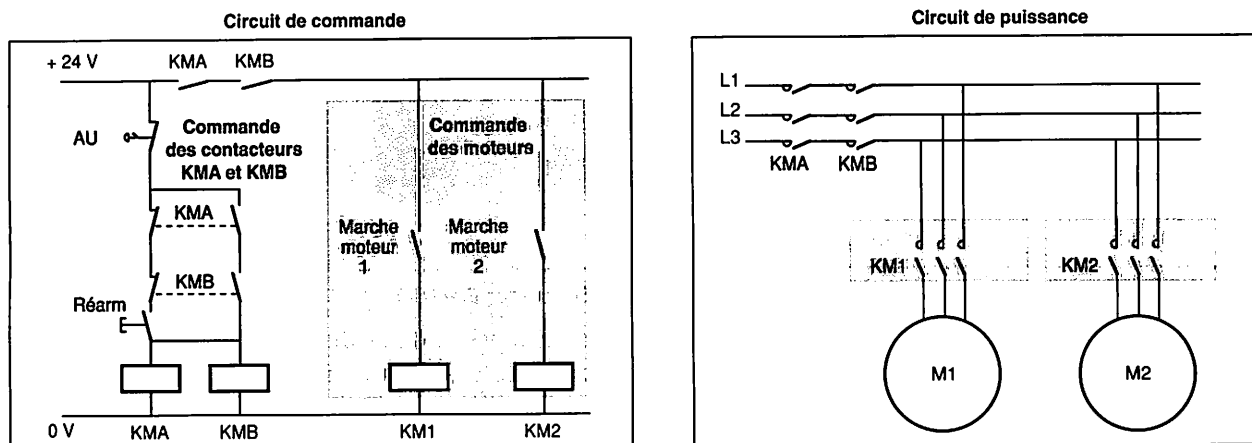


Figure 12.12. Circuit de commande avec redondance et auto-contrôle (principe).

● **Fonctionnement :** il est identique à celui du circuit avec redondance en cas d'arrêt d'urgence. En revanche, dans le cas où l'un des deux contacteurs KMA et KMB reste collé, il est impossible de réarmer le circuit. Si KMA est collé, il ouvre la ligne de gauche par son contact normalement fermé, la ligne de droite restant également ouverte par le contact normalement ouvert de KMB. Il en va de même lorsque KMB reste collé. **On réalise ainsi une surveillance de l'état du circuit de sécurité détectée lors de chaque sollicitation de la fonction.**

**REMARQUE**

Il est à noter toutefois que si le contact du bouton poussoir « AU » reste collé, la fonction de mise hors énergie ne sera pas assurée. L'utilisation de composants éprouvés peut limiter ce risque. On verra plus loin qu'il est également possible d'utiliser deux contacts d'un même bouton (Figure 12.15) pour augmenter le niveau de sécurité. Enfin, ce type de solution nécessite pour fonctionner des relais spéciaux, dits à contacts chevauchants, pour KMA et KMB afin d'éviter les effets de sonnette à l'appui sur « Réa ». D'autres constructeurs ont adopté des techniques différentes (PILZ,...).

**c) Un exemple de solution industrielle, modules de sécurité Préventa**

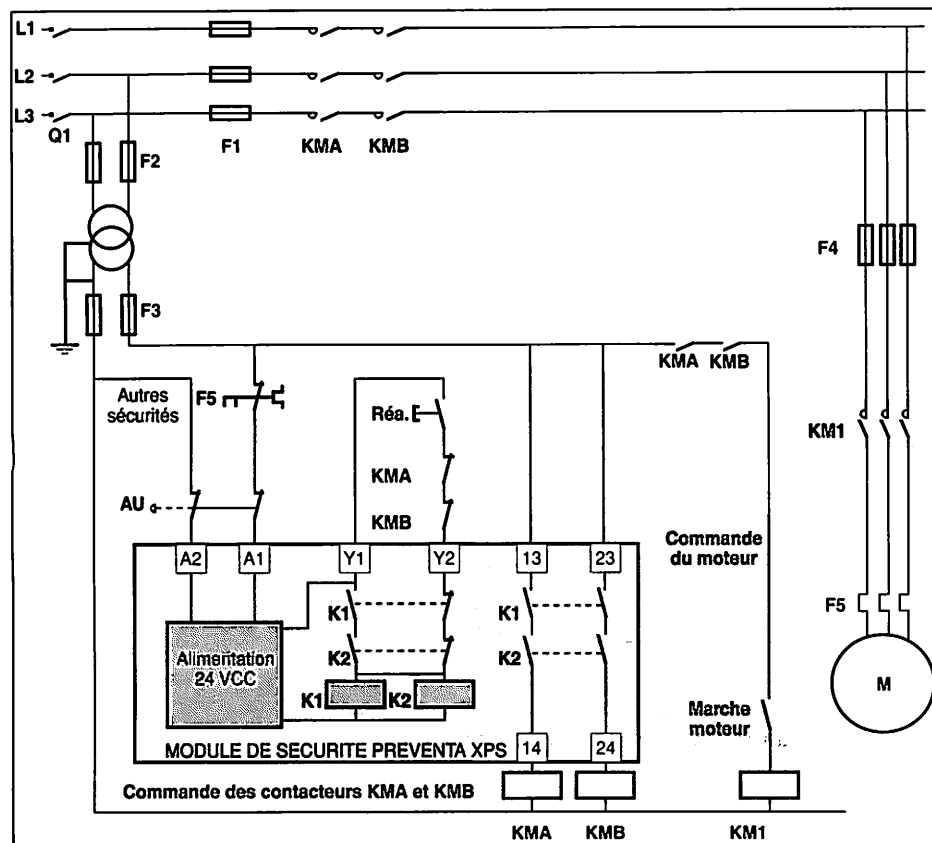


Figure 12.13. Circuit de commande avec module de sécurité.

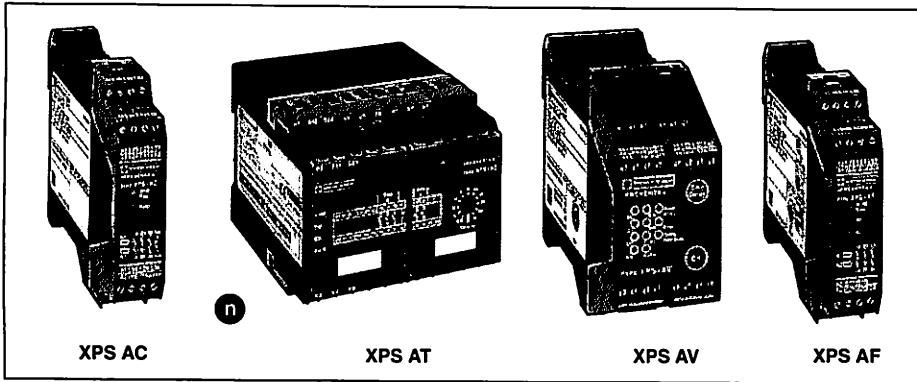


Figure 12.14. Vues de modules de sécurité (modules Préventa Schneider Electric).

La plupart des concepteurs proposent un constituant standard appelé module de sécurité qui assure les fonctions de redondance et d'auto-contrôle de manière interne, l'utilisateur n'ayant plus qu'un câblage externe à réaliser (Figures 12.13 et 12.15). Le coût de ces composants est partiellement compensé par le gain de temps en câblage et en conformité vis-à-vis du respect de la réglementation en vigueur. La figure 12.14 montre quelques constituants proposés par Schneider Electric sous le nom de « modules Préventa ». Une large gamme est disponible pour répondre aux diverses situations rencontrées. Il existe des modules permettant le raccordement sur bus AS-i.

● **Fonctionnement** : l'arrêt d'urgence, qui est souvent monté en série avec d'autres sécurités (capot de protection, « chien de garde » d'un automate programmable, autre arrêt d'urgence, etc.) provoque la coupure d'alimentation du module de sécurité : Les contacteur KMA et KMB retombent.

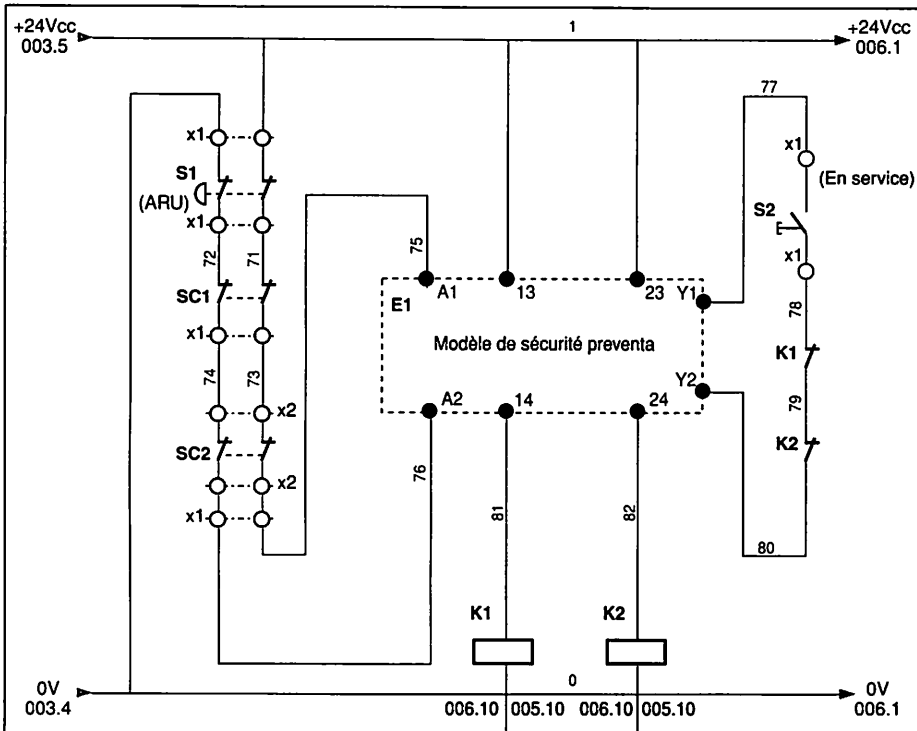


Figure 12.15. Câblage d'un module Preventa sur la machine de conditionnement de comprimés (doc. Ravoux).

Deux contacts supplémentaires ont été mis en série sur la ligne d'alimentation de la commande : il s'agit d'une redondance supplémentaire provoquant une coupure de la commande moteur KM1 simultanément à celle de la puissance.



Le système de redondance et d'autocontrôle interne est le même que celui vu précédemment, le collage de l'un des relais internes est impossible : K1 ou K2 interdisant le réarmement. De plus, l'état des contacteur KMA et KMB est contrôlé par les deux contacts en série sur la ligne de réarmement : si l'un des contacteur est collé le réarmement est impossible. Le lecteur notera également la redondance sur les contacts du bouton-poussoir « AU ».

La figure 12.15 illustre le câblage d'un circuit de contrôle de l'énergie, à l'aide d'un module industriel Préventa (Schneider Electric). Le lecteur notera la redondance sur les sorties K1 et K2 ainsi que sur les entrées (ARU, détecteurs de sur-course : SC1 et SC2) pour pallier à la défaillance d'un contact.

● **La sûreté de fonctionnement** en automatique est un domaine très exigeant, en constant développement. Les évolutions de la société et les pratiques actuelles conduisent à la prise en compte de prescriptions de plus en plus contraignantes. Deux éléments, entre autres, sont caractéristiques :

- la sécurité, c'est-à-dire l'aptitude à fonctionner sans danger pour les biens et les personnes ;
- la disponibilité, c'est-à-dire l'aptitude à fonctionner à un instant donné.

● **L'automaticien** doit intégrer la dimension « sûreté de fonctionnement » tout au long du cycle de vie du produit et selon les nombreux points de vue des acteurs associés (en conception, réalisation, exploitation, maintenance,...). La technique générale de protection consiste à analyser les risques aux divers stades de l'équipement, rechercher s'il est possible de les éliminer ou plus généralement de les réduire, par l'utilisation de techniques les mieux adaptées aux préoccupations rencontrées.

Les principales techniques utilisées, consistent généralement à :

- interdire l'accès et le voisinage des zones à risques aux personnes, par des dispositifs matériels (murs, protecteurs, enceintes grillagées,...) ou immatériels (barrières photo-électriques), sauf autorisations particulières ;
- à dupliquer les équipements (redondance). Pour garantir un niveau de sûreté constant, cette technique nécessite, fréquemment la mise en place de procédures de surveillance capables de détecter les anomalies et de permettre leur traitement à temps utile.

● **La maîtrise des fonctions de sécurité** comme le contrôle de l'énergie, à travers les exigences de la norme EN 954 est une composante essentielle de l'approche « sûreté de fonctionnement ». Les constructeurs de matériels proposent des constituants et solutions adaptées aux situations courantes, qu'il convient de connaître.

## Exercices

**EXERCICE 1.** Lister les principales composantes de la sûreté de fonctionnement.

**EXERCICE 2.** Quel niveau de risque et quelle(s) catégorie(s) de commande sont préconisé(s) si l'analyse des risques (Figure 12.8) conduit aux chemins :

- S1 ?
- S2, F1, P2 ?
- S2, F2, P2 ?

**EXERCICE 3.** Préciser le rôle des contacts à ouverture K1 et K2 de la figure 12.15.

**EXERCICE 4.** Expliquer la raison pour laquelle l'alimentation de l'automate programmable est prise avant les contacts K1 et K2 du module Préventa (Figure FM5.23.). Quel est le rôle du transformateur T1 (Figure FM5.23.) ?

## Palettiseur

### I. Présentation du palettiseur

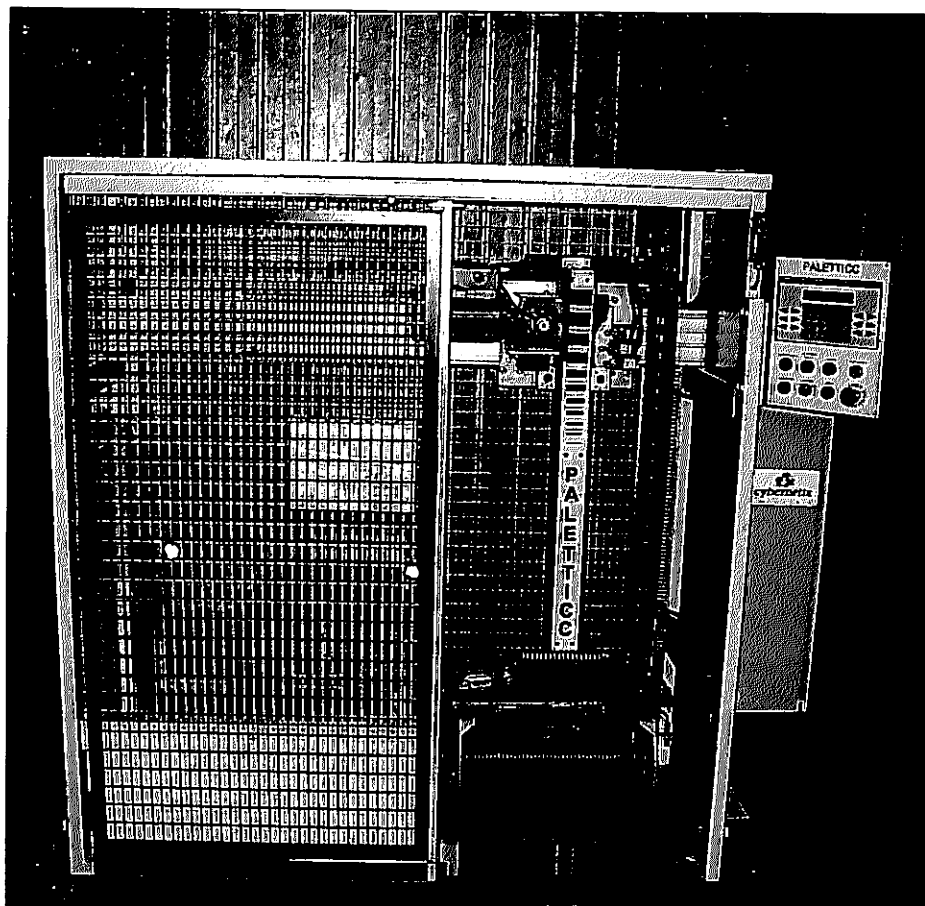


Figure FS 1.1. Palettiseur « Paletticc » (doc. Cybernetix industries).

#### 1. EXPRESSION DU BESOIN

L'une des solutions pour transporter des produits en quantité est la palettisation, c'est-à-dire l'empilage sur une palette de plusieurs couches de produits. L'arrangement en quinconce des produits (par exemple des cartons) sur la palette permet de donner une stabilité suffisante à l'empilage.

La palette pleine peut alors être prise et déposée grâce à des chariots « transpalettes » munis de fourches adaptées.

Un palettiseur est un système qui permet d'empiler automatiquement des produits sur une palette en alternant les « couches » en quinconce.

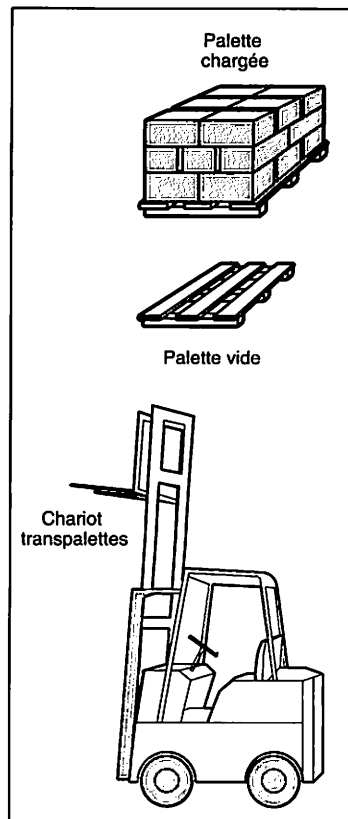


Figure FS 1.2. Palettisation.

## 2. STRUCTURE DE LA PARTIE OPÉRATIVE

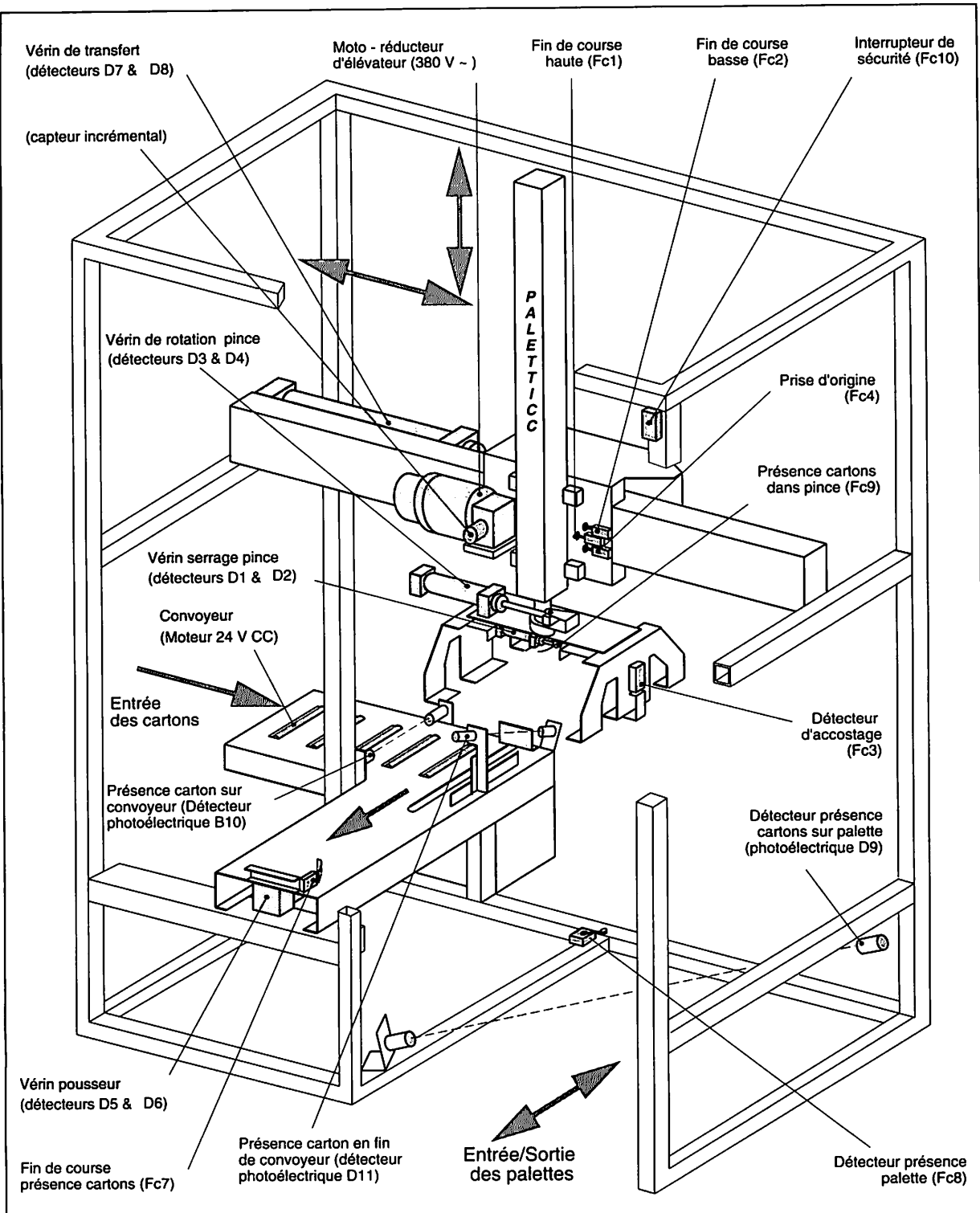


Figure FS 1.3. Structure du palettiseur.

### 3. CAPACITÉS

Encombrement au sol : 2,77 m × 1,35 environ.

Hauteur maximum : 2,4 mètres.

Nombre de rangées paramétrable de 1 à 5.

Cadence : 3 cartons par minute.

		Palettes	Cartons	
		bois	Mini	Maxi
Longueur	(mm)	500	320	500
Largeur	(mm)	500	160	250
Hauteur	(mm)	65	130	160
Masse	(kg)	/	/	7,5

## II. Fonctionnement

Le palettiseur peut être programmé pour faire le nombre nécessaire de couches de deux cartons, sans toutefois excéder cinq couches.

En début de production et ensuite après chaque cycle, une palette vide doit être introduite par l'avant du palettiseur sur un emplacement qui est accessible par une porte coulissante.

La palette une fois remplie devra être retirée par la même voie et remplacée par une palette vide.

L'alimentation en produits (cartons) est assurée par un convoyeur à rouleaux situé sur la gauche de l'ensemble.

#### ● Mode de formation d'une palette

À chaque démarrage du système, l'opérateur doit mettre sa machine dans l'état initial à l'aide des commandes manuelles accessibles par la console de dialogue située à l'avant du palettiseur. En particulier, il doit procéder à une prise d'origine de l'élévateur afin d'initialiser le dispositif de mesure de déplacement de l'élévateur.

Avant le lancement d'une production d'une palette ou d'une série de palettes identiques, l'opérateur doit programmer la hauteur des cartons et le nombre de couches souhaité.

Chaque carton introduit dans le palettiseur par le convoyeur à rouleaux est amené par le pousseur sur une table où est constituée une couche. Lorsque deux cartons consécutifs ont été amenés sur la table, la pince s'en saisit, les soulève, les déplace au-dessus de la palette et les y dépose.

Les deux cartons suivants seront saisis, soulevés, déplacés au-dessus de la palette, puis tournés d'un quart de tour avant d'être déposés sur la couche précédente placée sur la palette.

Et ainsi de suite, jusqu'à ce que le nombre de couches choisi par l'opérateur en début de cycle soit atteint.

Une balise lumineuse verte indique alors, par son clignotement, que la porte peut être ouverte pour retirer la palette pleine et éventuellement la remplacer si la production de palettes du même modèle doit être poursuivie.

## III. Modes de marches et d'arrêts

### 1. MODES DE MARCHES ET D'ARRÊTS DE SÉCURITÉ

Ces modes de marches et d'arrêts incluent l'ensemble des procédures visant à assurer la sécurité des biens et des personnes, décrites dans les cases « Hors énergie PZ », « Arrêt de sécurité D1 », « Remise en énergie A5 » ou « Traitement de

défaillance D2» du GEMMA (Figure FS 1.4 page 180). Outre la protection câblée (voir Figures FS 1.25, FS 1.26, FS 1.27), la gestion de certains défauts est assurée de manière logicielle par l'automate programmable de commande.

#### ● « Mise en énergie »

La procédure de mise en énergie est la suivante (voir schémas de câblage, Figures FS 1.25 et FS 1.26)

- mise sous tension (poignée du sectionneur sur le coffret électrique), le voyant blanc H1 du pupitre s'éclaire, le terminal de dialogue affiche « ARRÊT PUISSANCE », l'automate programmable est alimenté en 220V;
- mise en service (bouton poussoir « Marche » S1 du pupitre de commande), le voyant vert S1 du pupitre et la balise verte (H3) s'éclairent.

La mise en énergie du palettiseur n'est possible qu'à certaines conditions de sécurité :

- aucun des deux arrêts d'urgence ne doit être actionné (Boutons poussoirs « coup de poing » S3 et S7) ;
- la porte doit être fermée (interrupteur de sécurité à clé de verrouillage S20) ;
- l'air comprimé doit être présent (pressostat B12) ;
- si la pince n'est pas orientée à 0°, parallèlement à la porte (Détecteur ILS sur vérin B3), la mise en pression du circuit pneumatique n'est pas autorisée (sortie Q4.0 = 0), l'opérateur doit alors orienter la pince manuellement.

Par ailleurs, une procédure de mise en pression progressive est effectuée automatiquement si le vérin de transfert n'est pas en butée, à droite ou à gauche. Ceci permet d'éviter un mouvement brusque du vérin de transfert à la mise en pression (mise en pression progressive).

#### ● « Arrêt de sécurité », case D1

Il se déclenche lorsqu'il apparaît un événement pouvant entraîner un risque important : Il est assuré principalement par le câblage qui inclut deux modules de sécurité de type PREVENTA, PRV1 et PRV2 (voir schéma électrique, Figure FS 1.25). Il entraîne la coupure de l'énergie électrique par ouverture du relais-maître KM1, plus précisément :

- coupure de l'alimentation 24 VCC des sorties de l'automate par ouverture du contact 33-34 du relais de sécurité PRV1 (Figure FS 1.26, en H3) entraînant l'arrêt des commandes électriques des électrovannes (Figure FS 1.27) ;
- coupure de l'alimentation 24VCA des sorties de l'automate par ouverture d'un contact de KM1 (Figure FS 1.26) entraînant la coupure de la puissance pneumatique par arrêt du pilotage de l'électrovanne générale 5YV1 (sortie Q4.0 non alimentée, voir Figure FS 1.27) qui provoque la purge de tous les vérins pneumatiques, sauf celui du transfert qui est immobilisé par bloqueurs pneumatiques (voir schéma pneumatique, Figure FS 1.28) ;
- coupure de l'alimentation du moteur de l'élévateur (contact KM1, Figure FS 1.25 en C0).

Il est à noter que l'automate programmable ainsi que le terminal d'exploitation restent alimentés.

Les événements susceptibles d'entraîner une procédure d'arrêt de sécurité sont nombreux (voir schéma électrique, Figure FS 1.25). Les principaux sont :

- appui sur l'un des deux boutons poussoir d'ARU ;
- ouverture de la porte, hors période « d'accès autorisé » ;
- manque de tension d'alimentation, qui met la machine hors service et implique un redémarrage manuel obligatoire (norme EN292-1).

Le redémarrage après arrêt de sécurité impose une procédure de remise en état initial de la partie opérative, qui doit être effectuée en mode manuel.

Lors de la mise en service, la case D1 est fugitive si les conditions de sécurité sont satisfaites.

#### REMARQUE

La procédure de réarmement du circuit n'est pas décrite dans le GEMMA car elle est intégralement câblée. En fait elle est implicite car l'information « SECURITE » ne peut pas être vraie tant que le relais maître KM1 n'est pas réarmé. C'est une solution classique qui consiste à utiliser une seule entrée de sécurité sur l'automate (généralement un contact d'un relais maître KSECU) les informations « ARU », « Réarmement » et autres étant traitées par câblage.

### ● « Arrêt sur défaut », case D2

Il se déclenche lorsqu'il apparaît un défaut ne pouvant pas entraîner de risque important, tel que :

- déclenchement du relais thermique de protection du moteur de convoyeur (qui n'entraîne un arrêt complet qu'en cas d'évolution de la partie opérative entre l'instant d'apparition du défaut et sa suppression);
- déclenchement du disjoncteur magnéto-thermique de protection du moteur d'élévateur (entraîne aussi un arrêt complet dans les conditions précédentes);
- défaut pince, en cas de disparition de l'information de présence de cartons dans la pince;
- défaut codeur élévateur, en cas d'accostage en positions extrêmes à grande vitesse;
- détection d'une butée de sécurité élévateur (haute ou basse);
- manque de pression d'air comprimé (affiche message « manque d'air »).

L'apparition de l'un de ces défauts entraîne l'allumage du voyant « défaut » du pupitre de dialogue ainsi que des procédures spécifiques décrites par le GEMMA (Figure FS 1.4).

## 2. AUTRES MODES DE MARCHES ET D'ARRÊTS

### a) « Mise PO dans l'état initial », (case A6) :

#### ● Actionneurs déjà en référence

- Afin d'autoriser la mise en énergie, la pince a préalablement été orientée à la main par l'opérateur en position de référence 0°, c'est-à-dire parallèle à la porte. Cette précaution est indispensable, la pince pouvant interférer mécaniquement avec le grillage de protection (une solution radicale consisterait à éloigner un peu le grillage).
- Lors de la mise en pression pneumatique, le vérin du poussoir s'est remis en position sortie, car il est piloté par un distributeur monostable.
- Le moteur du convoyeur est naturellement à l'arrêt.

#### ● Actionneurs éventuellement mis en référence par commandes manuelles

- Vérin de serrage pince.
- Vérin de transfert.

#### ● Prise d'origine élévateur

Il s'agit d'une séquence automatique qui permet d'initialiser le compteur associé au capteur incrémental de mesure du déplacement vertical de l'élévateur. Elle est lancée par l'appui sur la touche « POM » du clavier de la console de dialogue. Cette prise d'origine doit être effectuée à chaque mise sous tension du palettiseur pour autoriser le fonctionnement en mode « automatique » ou « pas à pas ».

Par ailleurs, la palette doit être vide et il ne doit y avoir de carton ni en butée sur le convoyeur, ni au poste de prise.

### b) Marche en mode « manuel » case F4 (commutateur sur « manu », porte fermée)

Le mode « manuel » permet la vérification du fonctionnement séparé de chaque mouvement pour les réglages.

Chaque consigne est accessible par une touche de fonction du clavier de la console de dialogue (voir V.2, ci-après).

Un seul mouvement est possible à la fois. Certains mouvements ne sont pas autorisés dans n'importe quel état de la partie opérative (par exemple l'ouverture de la pince n'est pas possible si des cartons y sont emprisonnés alors que l'élévateur n'est pas en position basse d'accostage).

### REMARQUE

La procédure de mise en référence de la partie opérative sur cette machine est tortueuse. Elle s'effectue :

- à la main par l'opérateur pour la pince;
- automatiquement et intempestivement, lors de la mise en énergie pour le poussoir (pré-actionneur monostable);
- semi-automatiquement sur commande POM pour la prise d'origine;
- par commandes manuelles sur pupitre pour le vérin transversal et le serrage de la pince.

Le constructeur a choisi de regrouper la mise en référence avec le mode manuel, mais pour plus de clarté et de cohérence, il a été choisi ici de placer cette procédure dans la case GEMMA prévue à cet effet, soit A6.

### REMARQUE

L'ouverture de la porte en mode manuel lorsque « accès autorisé » = 1 n'entraîne pas d'arrêt d'urgence. Dans ce cas, le module PRV2 associé à la porte provoque uniquement la coupure d'alimentation des sorties de l'automate (Figures FS 1.27 en B3 et FS 1.25 en D3). Les commandes étant invalidées, l'opérateur peut alors intervenir dans l'enceinte.

**c) Marche en mode « pas à pas », case F5 (« pas à pas », porte fermée)**

Le mode « pas à pas » permet la vérification du fonctionnement des opérations dans le même ordre qu'en mode « automatique » notamment en phase de réglage après maintenance. Une consigne de l'opérateur est toutefois nécessaire après chaque mouvement pour autoriser le suivant (par appui sur le bouton-poussoir « validation cycle »).

En mode « pas à pas » une seule tâche est exécutable à la fois. La séquence type dans ce mode est donc la suivante :

- former une rangée de deux cartons;
- saisir deux cartons;
- déposer les deux cartons.

Ainsi, le chargement des cartons et leur préparation pour le transfert ne peuvent se faire pendant la mise en place de la couche précédente sur la palette, comme cela est possible en fonctionnement automatique.

**d) Marche « production normale », case F1**

Ce mode correspond au fonctionnement normal de la machine. Le cycle se déroule automatiquement conformément au grafcet de production normale « GPN ». Dès que la palette est pleine, il y a retour automatique à la situation initiale, case A1.

**e) Arrêt dans état initial, case A1**

La partie opérative étant en référence, l'opérateur peut choisir le mode de fonctionnement désiré (auto, pas à pas ou manu). Le passage en mode automatique (case F1) n'est autorisé qu'après la saisie des paramètres de production au moyen du clavier du terminal : hauteur des cartons et nombre de rangées sur la palette.

**f) Interruption de cycle, case A4**

En mode « automatique », une consigne d'interruption de cycle verrouille toute évolution du grafcet. La partie opérative s'arrête dès que les actions associées aux étapes en cours sont terminées. L'évolution du grafcet reprend à partir de cet état dès que l'interruption est annulée.

**g) Arrêt de production, case A2**

Une action sur la touche « fin de production » du clavier de la console de dialogue entraîne l'arrêt du palettiseur en fin de confection de la palette en cours.

Le redémarrage d'une autre série de palettes nécessitera l'entrée des paramètres d'une nouvelle production, par l'intermédiaire de la console de dialogue (hauteur des cartons et nombre de rangées).

**3. GEMMA**

Le GEMMA de la figure FS 1.4 décrit de manière détaillée les modes de marches et d'arrêts.

Définition des informations logiques composites :

- **CI** = « préhenseur en position d'origine » ET « pince orientée à 0° » ET « transfert en position de prise » ET « pince ouverte » ET « pousseur rentré » ET « palette vide » ET « absence de carton au poste de prise » ET « POM effectuée ».
- **DEFAULT** = « défaut convoyeur » OU « défaut élévateur » OU « défaut serrage pince » OU « défaut codeur » OU « butées de fin de course élévateur atteintes » OU « absence air comprimé ».
- **SECURITE** = « présence tension d'alimentation » ET « pince en position 0° en mode Manu » ET (« porte fermée » OU « porte ouverte » ET « accès autorisé »).

L'information «SECURITE» est en réalité plus complexe, car l'information «présence tension d'alimentation» est câblée en aval d'un contact de KM1, qui est le relais maître de sécurité du circuit d'arrêt d'urgence (voir Figure FS 1.26 en G4).

En simplifiant, on peut considérer que : «SECURITE» = «KM1» ET «pince en position 0° en mode Manu» ET («porte fermée» OU «porte ouverte» ET «accès autorisé»).

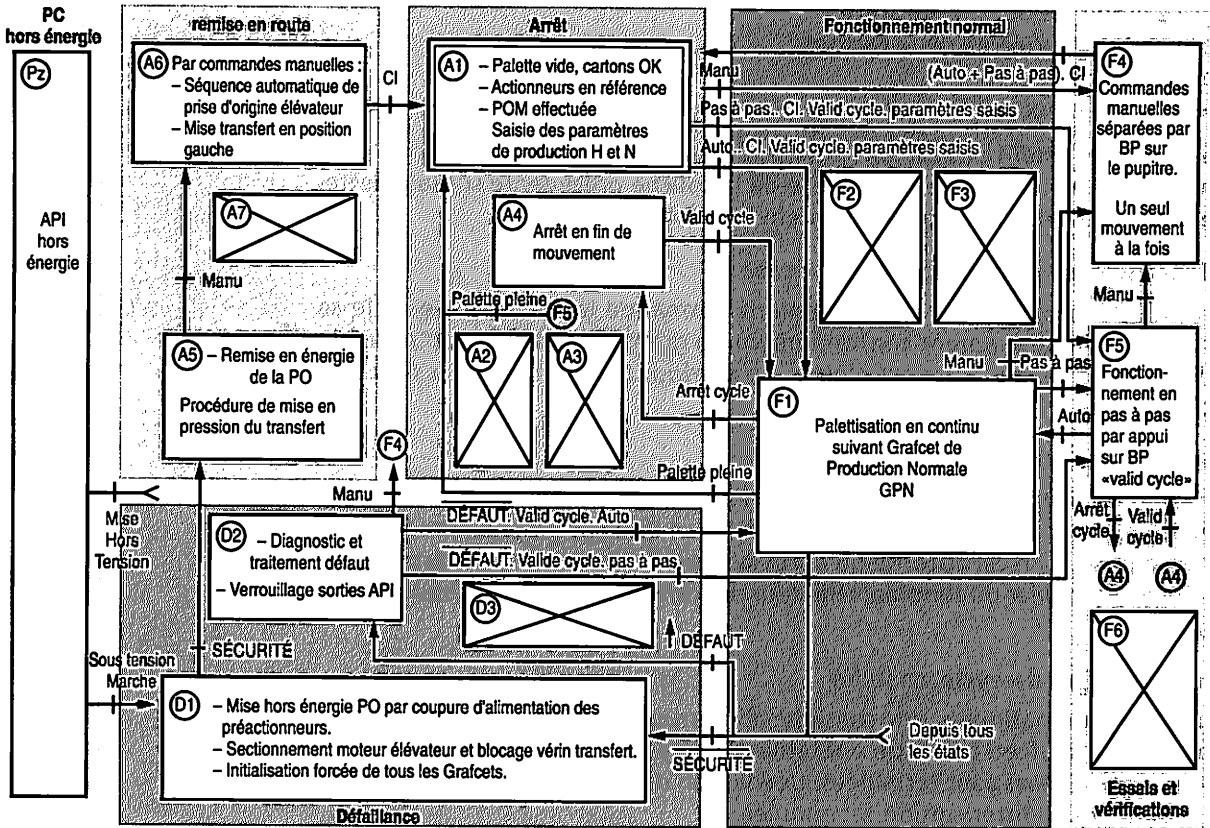


Figure FS 1.4. Graphe des Modes de marche et d'Arrêt (GEMMA).

#### REMARQUE PREALABLE

Le constructeur a choisi une programmation faisant exclusivement appel au langage «LADDER» pour la gestion des modes de marches ainsi qu'une commande non hiérarchisée pour la partie GRAFCET. Si cette solution est économe en termes de lignes de programme, elle n'est compréhensible que par un spécialiste. Pour la clarté des explications, il a été choisi d'effectuer une description hiérarchisée du fonctionnement de la partie commande au moyen du modèle GRAFCET qui, rappelons-le, est un outil de spécification. Par ailleurs, et pour les mêmes raisons de clarté, il a été procédé à un certain nombre de simplifications : en particulier, les commandes de messages et celles des voyants ne sont pas décrites.

## IV. Description hiérarchisée du fonctionnement de la partie commande

### 1. STRUCTURATION DE LA PARTIE COMMANDE

La représentation structurée du comportement de la partie commande (Figure FS 1.5) présente l'avantage de bien distinguer les différentes fonctions de commande qui sont :

- la surveillance : c'est la partie de niveau supérieur, susceptible d'envoyer des ordres de forçage en direction des deux autres niveaux ;
- la conduite des autres modes de marches et d'arrêts : elle réalise le passage d'un mode à l'autre et garantit leur unicité ;
- la commande du processus : Il s'agit de l'ensemble de la commande en mode de production normale F1, en mode pas à pas F5 ou en initialisation A6. Elle n'est effective que si les niveaux supérieurs l'autorisent.



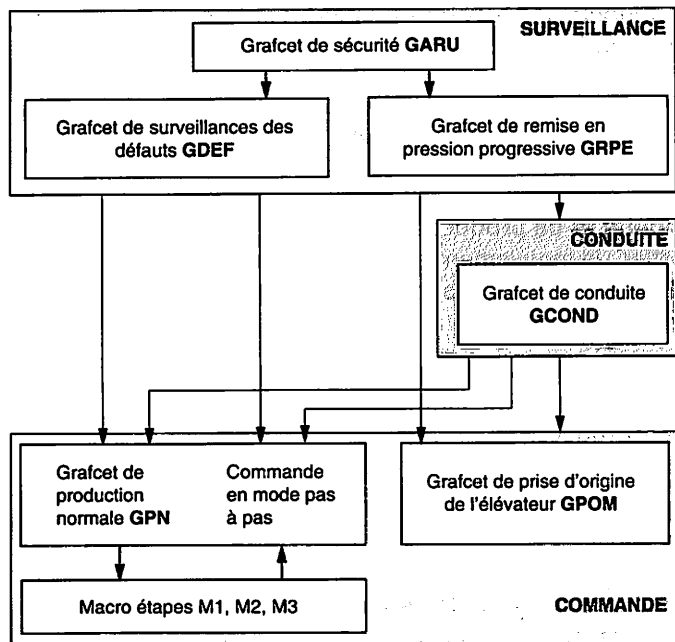


Figure FS 1.5. Représentation du comportement de la partie commande.

## 2. GRAPHES DU NIVEAU SURVEILLANCE : « GARU », « GDEF » ET « GPRE »

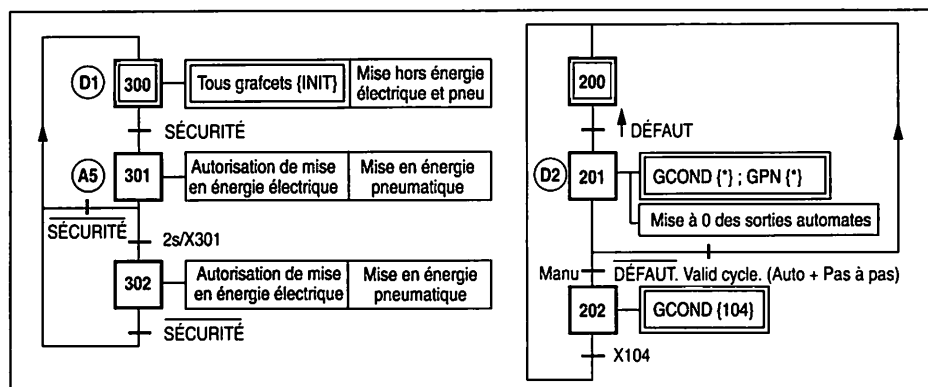


Figure FS 1.6. Graphes de surveillance (d'arrêt d'urgence « GARU », à gauche et de surveillance des défauts « GDEF », à droite).

D'une manière générale, les grafquets de surveillance comportent seulement deux ou trois étapes, car ils doivent être en permanence réceptifs à l'apparition d'une défaillance ou d'un défaut.

### a) Grafcet de sécurité « GARU » (Figure FS 1.6 gauche)

Étape 300 : c'est l'étape active lors de la mise sous tension et en cas d'arrêt d'urgence. Elle provoque l'initialisation de tous les grafquets par forçage ainsi que la mise hors énergie de la PO par ouverture des sorties Q2.0 (autoriser PO en énergie) et Q4.0 (électrovanne générale pneumatique). Cette mise hors énergie est simultanément effectuée par le circuit câblé (redondance) par le biais des modules de surveillances PRV1 et PRV2.

Étape 301 : il s'agit d'une étape transitoire dont la durée est de deux secondes. Elle autorise le fonctionnement du grafcet de remise en pression. À noter la sensibilité à l'information « SECURITE ».

Étape 302 : cette étape autorise le fonctionnement dans tous les modes autres que D1 et A5. En cas d'apparition de l'information « SECURITE », retour à l'étape initiale 300.

### b) Grafcet de surveillance de défaut « GDEF » (Figure FS 1.6 droite)

Étape 200 : attente de défaut.

Étape 201 : figeage des grafquets de conduite et de production normale et verrouillage logiciel des commandes des sorties : le mouvement en cours se termine éventuellement. En cas de résolution du problème, possibilité de reprendre le cycle en cours, le figeage des grafquets étant relâché.

Étape 202 : passage en mode manuel par forçage de l'étape correspondante du grafcet de conduite (104) qui provoquera elle-même l'initialisation du grafcet de production normale. Cette étape est fugace.

### c) Graphe de mise en référence automatique de la pince et de remise en pression progressive du vérin de transfert, lors de la remise en énergie « GPRE » (Figure FS 1.7)

Après un arrêt de sécurité ayant entraîné une coupure de l'énergie pneumatique, il est nécessaire de mettre la pince en position 0° et de remettre progressivement le vérin de transfert en pression afin d'éviter un éventuel mouvement brusque. Le Grafcet de la figure FS 1.7 décrit cette séquence, qui est lancée par l'étape 301 de GARU.

Procédure de remise en pression progressive : Si le vérin est en position intermédiaire (étapes 154 et 155), les chambres sont alimentées alternativement pendant des durées brèves (0,1s) ce qui permet un équilibrage de pression. Si le préhenseur est en butée d'un coté ou de l'autre (étape 152 ou 153), la pression peut être mise dans la chambre correspondante sans risque. Cette procédure s'arrête au bout de deux secondes.

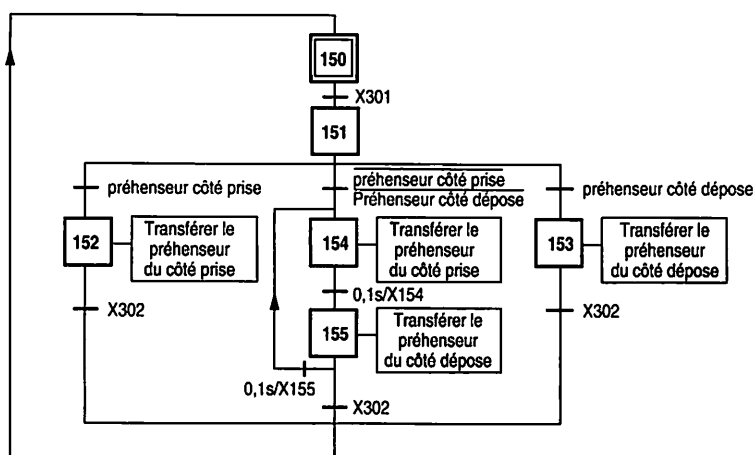


Figure FS 1.7. Graphe de remise en énergie « GPRE ».

#### REMARQUE

Une solution plus classique consisterait à implanter un démarreur progressif en amont de l'électrovanne pneumatique générale EV5. La procédure précédente n'aurait alors plus de raison d'être.

#### REMARQUE

Afin d'obtenir une représentation à la fois simple et conforme aux options retenues par le constructeur il a été choisi ici de fusionner les modes « auto » et « pas à pas » en remarquant qu'ils sont reliés aux mêmes autres modes sur le GEMMA. Cette solution, assez classique, qui consiste à implanter le mode pas à pas directement sur le grafcet de production normale en mode automatique, est décrite en c.

## 3. GRAPHE DU NIVEAU CONDUITE : « GCOND »

Ce grafcet (Figure FS 1.8) permet le suivi des modes de marches et d'arrêts autres que ceux de sécurité, en respectant fidèlement le GEMMA.

Étape 100 : cette étape est active dans les modes D1 et A5. Elle n'est jamais réactivée en cours de production : seul un arrêt de sécurité peut provoquer son activation (forçage émis par l'étape 300 du grafcet « GARU »).

Étape 101 : correspond à la mise en état initial (ou mise en référence) de la partie opérative. Cette étape appelle le grafcet de prise d'origine « GPOM » dès que l'opérateur en fait la demande. L'opérateur a la possibilité de stopper cette séquence en cours par appui sur le bouton poussoir « ARRÊT » qui entraîne une remise en situation initiale du grafcet « GPOM » par forçage.

Étape 102 : choix du mode de fonctionnement et autorisation de la procédure d'entrée des paramètres de production. Tant que ces derniers ne sont pas saisis, il est impossible de lancer un cycle.

Étape 103 : modes de production en « auto » ou en « pas à pas ». Cette étape autorise le fonctionnement du grafcet de production normale « GPN ».

Étape 104 : mode manuel : le grafcet de production normale est bloqué en état initial par forçage. La sortie du mode manuel n'est effective que lorsque les conditions initiales sont satisfaites.

Étape 105 : arrêt en cours de cycle : le grafcet de production normale est figé en l'état par forçage, la reprise du cycle en cours s'effectuant par un appui sur le bouton poussoir « valid cycle ».

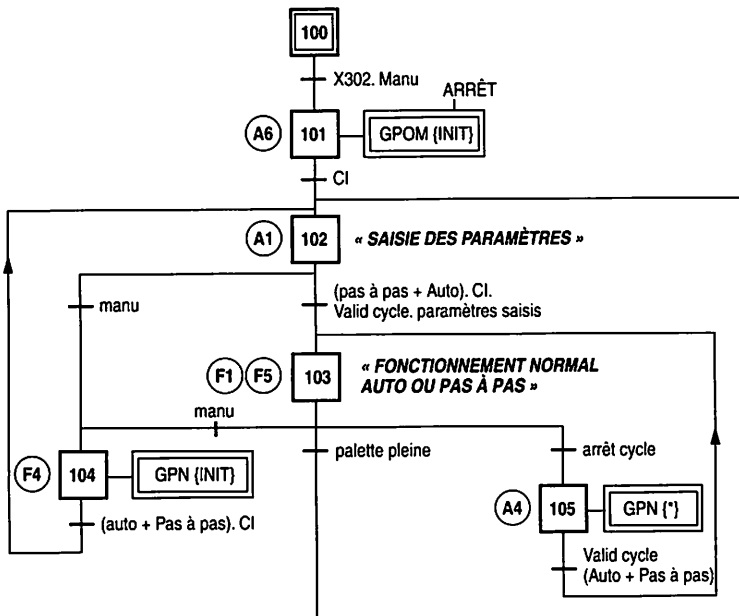


Figure FS 1.8. Graphe de conduite.

#### 4. GRAPHES DU NIVEAU COMMANDE « GPN », « GPOM » ET « GPAP »

##### a) Prise d'origine élévateur « GPOM » (Figure FS 1.9)

L'information logique « condition de départ POM » est définie par : « Absence défaut moteur élévateur » ET « Absence défaut "butée atteinte" » ET « Absence défaut codeur » ET « Porte fermée » ET (« pince à 0° » OU « Transfert position dépose »).

Sur impulsion de la touche F9 (demande POM) :

- si l'élévateur se trouve en position haute : descente en petite vitesse durant 3 secondes pour quitter le fin de course haut, puis remontée de l'élévateur en petite vitesse jusqu'à la détection position haute (prise d'origine);
- si l'élévateur ne se trouve pas en position haute : montée de l'élévateur en petite vitesse jusqu'à la détection position haute (prise d'origine).

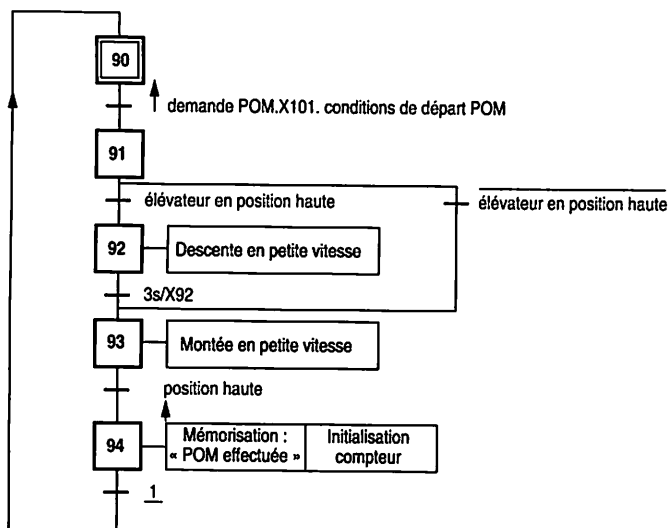


Figure FS 1.9. Graphe de prise d'origine.

**b) Production normale « GPN » (Figures FS 1.10 et FS 1.11)**

Ce grafcet est lancé dès que les « Conditions de marche automatique » sont satisfaites, soit X103 = 1.

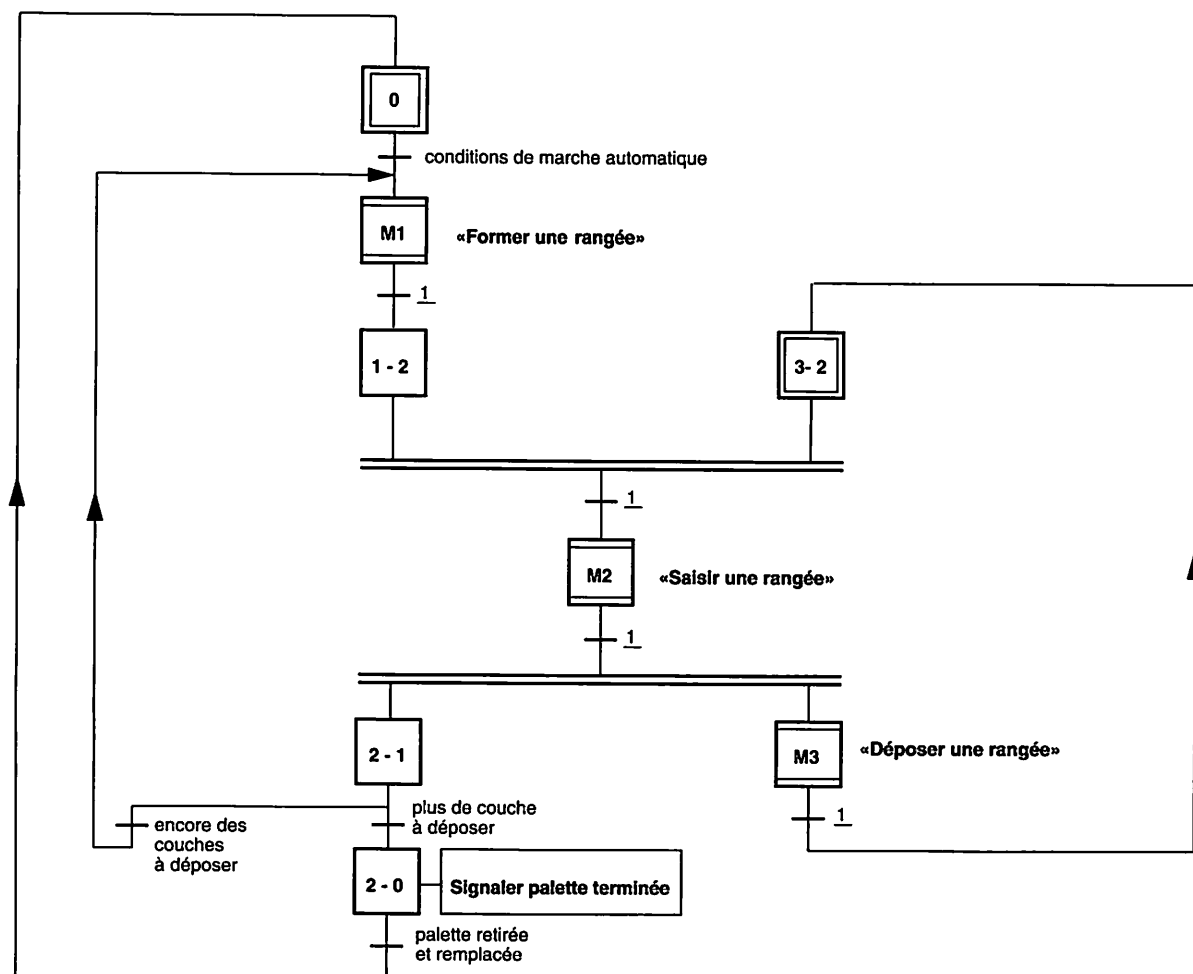


Figure FS 1.10. Graphe de production normale.

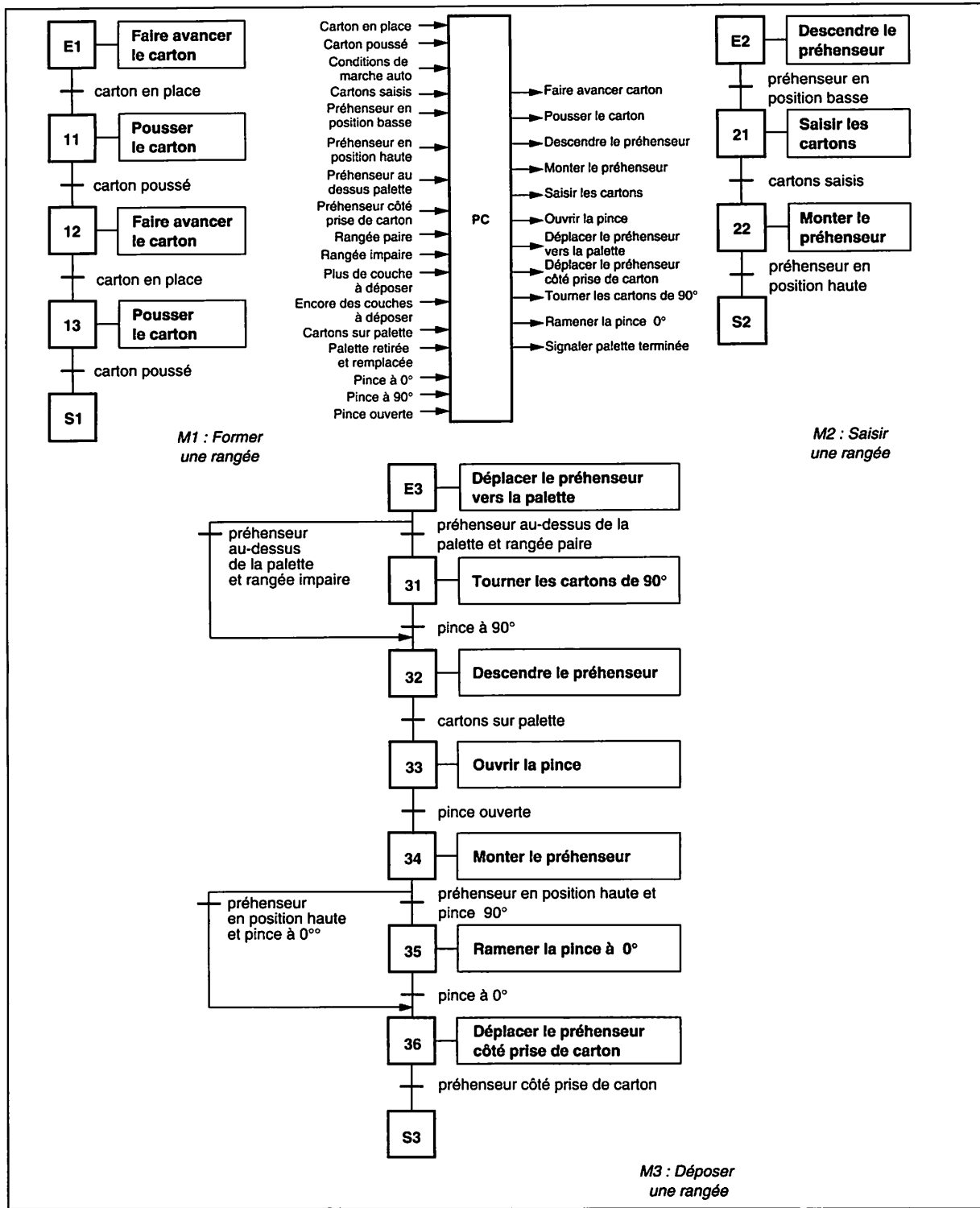


Figure FS 1.11. Développement des macro-étapes du graphe de production normale.

**c) Pas à pas «GPAP»**

Le mode « pas à pas » est exécuté par le même grafcet que celui de la production normale automatique «GPN». Il suffit de procéder aux modifications suivantes :

- Grafcet de production normale «GPN» : le cycle en pas à pas est linéaire, les tâches opératives s'effectuant dans l'ordre M1, M2 et M3. Pour interdire le

lancement simultané de M2 et M3 en mode « pas à pas », on transforme la transition 2-1 vers M1 en : « Encore des couches à déposer. (Auto + pas à pas. X3-2 ) »: de cette manière, il faut attendre la fin de M3 (étape 3-2 active) pour relancer M1.

### ● Macro-étapes M1 à M3

Le principe des modifications du graphe de production normale « GPN » afin d'intégrer le mode pas à pas est décrit ci-dessous (Figure FS 1.12). Suivant que les ordres doivent être maintenus (préactionneurs monostables, etc.) ou non (moteurs, etc.) pendant l'attente du pas suivant en mode « pas à pas », on intègre une étape intermédiaire : cette dernière solution est celle retenue par le constructeur. Cette étape intermédiaire est fugace en mode automatique.

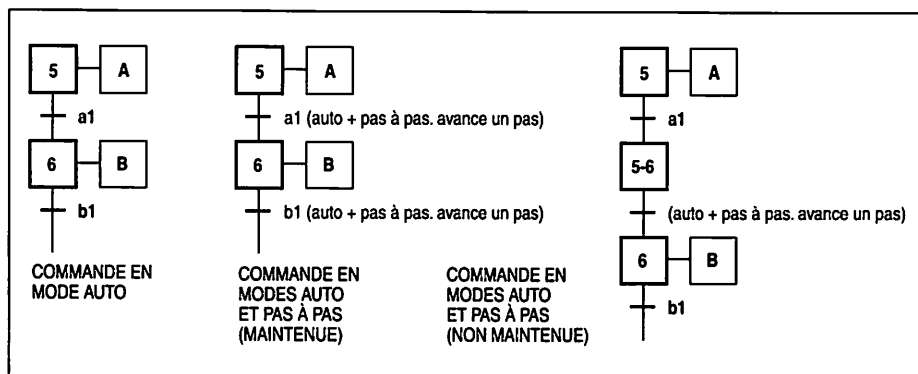


Figure FS 1.12. Principe de modification du graphe de production normale pour intégrer la marche en pas à pas.

## V. Caractéristiques techniques

### 1. FONCTION « ACQUÉRIR LES INFORMATIONS »

Le palettiseur comporte vingt et un détecteurs et capteurs qui sont :

- des détecteurs de fins de course des vérins D1 (B1) à D8 (B8) (interrupteurs à lame souple montés directement sur les vérins à pistons magnétiques);
- des détecteurs de fins de course; de l'élévateur Fc1 (S10) et Fc2 (S12), d'accostage de pince Fc3 (S13), de prise d'origine de l'élévateur Fc4, de présence cartons en fin de poussage Fc7, de présence palette Fc8, de présence de cartons dans la pince Fc9 (détecteurs à action mécanique);
- des détecteurs de présence de cartons à l'entrée du convoyeur D10 (B10), en bout de convoyeur D11 (B11), sur palette D9 (B9) (détecteurs photoélectriques);
- d'un contact à pression D12 (B12) indiquant la présence d'air comprimé;
- d'un détecteur de fermeture de porte Fc10 (S20) (interrupteur de sécurité à clef);
- d'un capteur incrémental lié au déplacement de l'élévateur.

#### ● Détecteurs de fin de course vérin par interrupteur à lame souple

Type : à détection magnétique avec visualisation par diode électro-luminescente.

Protection : IP 67.

Sortie : électronique PNP (compatible automate programmable).

Alimentation : 0 à 30 V CC.

Courant maximum admissible : 0,150 A.

Consommation : moins de 0,030 A.

Répétitivité :  $\pm 0,1$  mm.

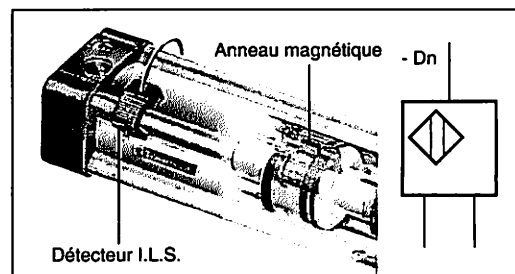


Figure FS 1.13. Interrupteur à lame souple.

### ● Détecteurs à action mécanique

**Type :** appareils complets, corps métallique, encombrement réduit.  
**Mouvement :** angulaire (sauf Fc3, S13 : à poussoir).  
**Dispositifs de commande mécanique :** levier à galet, à poussoir (Fc3, S13), à « moustache » (Fc9, S19).  
**Sortie :** un contact « OF » à action brusque (inverseur).  
**Durabilité mécanique :**  $10^6$  manœuvres.  
**Couple minimum d'actionnement :** 0,05 N.m.  
**Couple minimum d'ouverture positive :** 0,15 N.m.  
**Fidélité :** 0,01 mm sur point d'enclenchement.  
**Tension d'isolement :** 500 V.

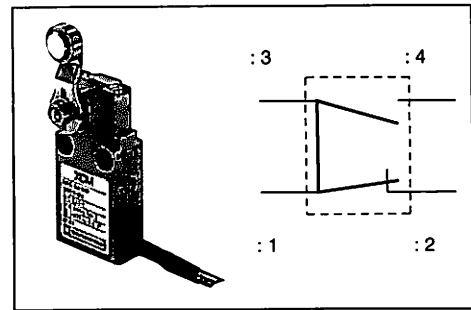


Figure FS 1.14. Détecteur à action mécanique (Schneider).

### ● Détecteurs photoélectriques

**Type :** cylindrique fileté  $\varnothing 18 \times 1$  à corps plastique.  
**Protection :** IP 67.  
**Alimentation :** 12 à 24 V CC, protection contre les inversions de polarité.  
**Consommation à vide :**  $\leq 0,030$  A.  
**Sortie :** statique PNP, commute 0,2 A.  
**Montage :** reflex, portée nominale de 4 m.  
**Fréquence maximale de commutation :** 500 Hz.  
**Retards :** à la disponibilité  $\leq 15$  ms;  
à l'action ou au relâchement  $\leq 1$  ms.

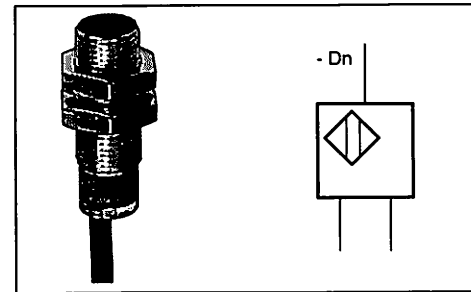


Figure FS 1.15. Détecteur photoélectrique (Schneider).

### ● Capteur incrémental

**Type :** Baumer BHE 05.05T100-6-I.  
**Alimentation :** 5 V CC  $\pm 5$  %.  
**Résolution :** 100 points par tour.  
**Voies :** 2 (signaux déphasés de  $90^\circ$ ).  
**Sortie :** TTL UB 5 V  $\pm 5$  %.  
**Fréquence maximale de commutation :** 50 kHz  $\pm 15$  %.  
**Taille :** 40 ( $\varnothing 40$  mm).  
**Bout d'arbre creux :**  $\varnothing 6$  mm.

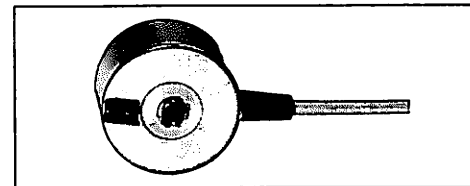


Figure FS 1.16. Capteur incrémental (Baumer).

### ● Interrupteur de sécurité d'ouverture de porte

**Type :** commande à droite.  
**Commande mécanique :** par languette, déverrouillage par clef.  
**Fréquence de fonctionnement :** 600 cycles/h.  
**Durabilité mécanique :**  $0,6 \cdot 10^6$  cycles de manœuvres.  
**Degré de protection :** IP 67.  
**Vitesse d'attaque :** entre 0,01 et 0,5 m/s.  
**Sortie :** contact tripolaire « O + F + F » décalés à action dépendante.  
**Caractéristiques électriques d'emploi :** 250 V CC, 0,27 A.  
**Tension d'isolement :** 500 V, degré de pollution 3 selon IEC 947-1.

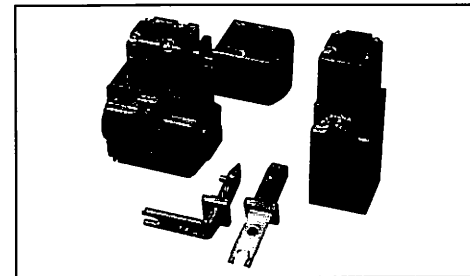


Figure FS 1.17. Interrupteur de sécurité (Schneider).

### ● Contact à pression

**Seuil de pilotage :** réglable de 2 à 5 bars.  
**Fréquence de fonctionnement :** 10 Hz maximum.  
**Endurance mécanique :**  $10^6$  manœuvres.  
**Sortie :** contact « OF » (inverseur).  
**Caractéristiques électriques d'emploi :** 250 V CA 10 A.  
**Pouvoir de coupure pour 106 manœuvres :** 58 W sous 24 V CC (circuit résistif).  
**Raccordement pneumatique :** connexion instantanée  $\varnothing 4$  mm.  
**Divers :** voyant et commande manuelle.

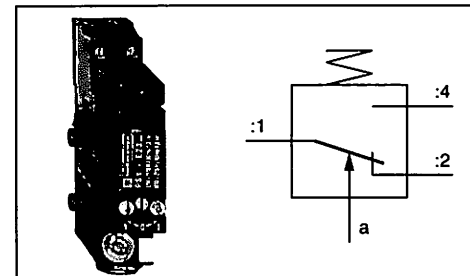


Figure FS 1.18. Contact à pression (Schneider).

## 2. FONCTION « DIALOGUER AVEC L'OPÉRATEUR »

### a) Version de base (Figure FS 1.19)

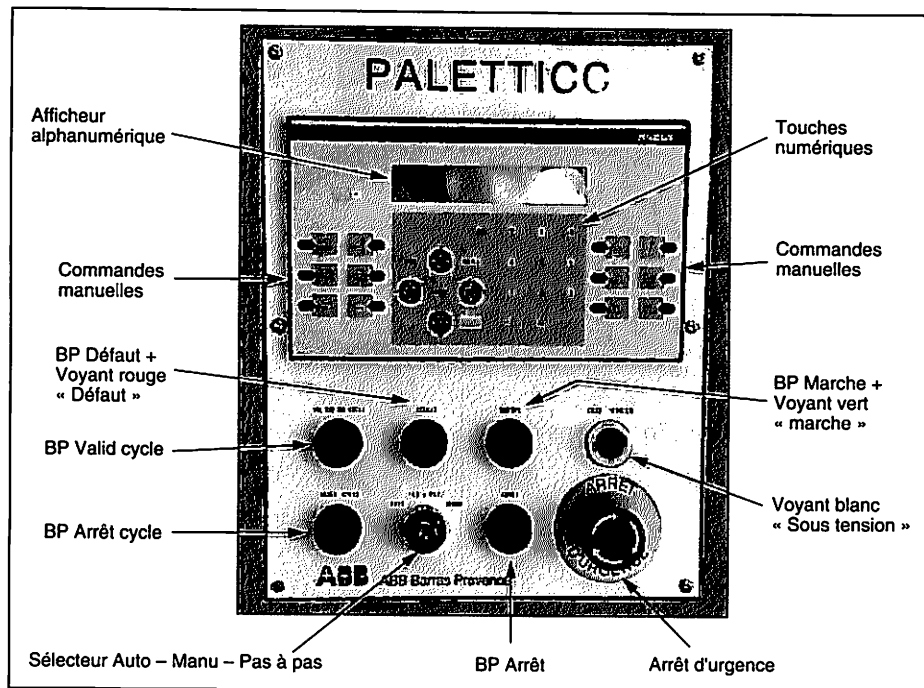


Figure FS 1.19. Organisation du pupitre (Cybernetix).

Les boutons poussoirs « marche », « arrêt », « ARU » et « défaut » ne sont pas pris en compte par l'automate : ils sont câblés directement. Il en va de même pour les voyants « marche » et « sous tension ».

La fonction « dialoguer avec l'opérateur » est assurée par une console de dialogue (ou pupitre) située à droite de la porte d'accès du palettiseur. Cette console est organisée autour d'un terminal d'exploitation programmable « Magélis » (Schneider), relié à l'automate programmable par une liaison série intégrée. Des boutons, poussoirs, voyants et un sélecteur, certains reliés directement à l'automate programmable, complètent la console. Le terminal d'exploitation Magélis comprend un afficheur à deux lignes de 20 caractères. Il est doté d'une mémoire flash EPROM de 256 Kilo-octets pouvant contenir 400 pages « applications » (2 lignes par page) et 256 pages « alarmes » (2 lignes par page). Si plusieurs messages doivent être affichés, ils le sont alternativement à deux secondes d'intervalle.

Différentes touches permettant de modifier des variables, de commander un équipement ou de naviguer dans l'application de dialogue

Commandes manuelles à partir du terminal d'exploitation (un seul mouvement à la fois est possible) :

**Touche F1** : Commande convoyeur (action maintenue) ;

**Touche F2** : Commande sortie pousseur (action maintenue), rentrée pousseur si relâchement ;

**Touche F3** : Ouverture/fermeture pince (action impulsionnelle : 1 impulsion entraîne la fermeture si la pince est ouverte, ou l'ouverture si la pince est fermée) ;

**Touche F4** : Rotation pince (action impulsionnelle : 1 impulsion entraîne la rotation à gauche si elle est à droite, ou la rotation à droite si la pince est à gauche) ;

**Touche F5** : Translation élévateur pince vers le poste de prise (action maintenue) ;

**Touche F6** : Translation élévateur pince vers le poste de dépose (action maintenue) ;



**Touche F7** : Montée élévateur (action maintenue);

**Touche F8** : Descente élévateur (action maintenue);

**Touche F9** : Départ séquence « prise d'origine » (action impulsionnelle). Si l'opérateur désire interrompre cette séquence il doit actionner le bouton poussoir « arrêt cycle » extérieur au Terminal.

#### ● Messages d'interrogation de l'opérateur ou d'autorisation

Ces messages sont fixes et appellent une réponse de l'opérateur, qui utilise alors le clavier pour entrer les données nécessaires.

« **Hauteur carton ... mm** » : l'opérateur doit indiquer la valeur de la hauteur par les touches numériques et la valider par la touche « Enter ».

« **Nombre de rangs ...** » : l'opérateur doit indiquer le nombre de rangs voulu à l'aide des touches numériques et le valider par la touche « Enter ».

« **Pas suivant** » : en mode pas à pas, l'opérateur doit actionner « Validation de cycle ».

#### ● Messages d'état

Ces messages sont adressés à l'opérateur, soit à sa demande, soit automatiquement dans certaines situations de la machine.

« **Altitude \_ \_ mm** » : apparaît deux secondes en mode manuel à la demande de l'opérateur, par appui sur la touche « Altitude manu ».

« **H carton \_ \_ mm** » : apparaît deux secondes en mode automatique ou pas à pas, par appui sur la touche « Hauteur carton auto ».

#### ● Autres messages

Le terminal permet d'afficher de nombreux messages en cours de fonctionnement tels que : « Manque palette », « Poussoir non reculé », « Carton au poste de prise », « Défaut convoyeur », etc. Voir dossier technique du constructeur pour la liste complète de ces messages.

### b) Version associée à un logiciel de supervision

Le palettiseur peut être placé dans une installation gérée par un logiciel de supervision « PCvue 32 ». Dans ce cas, au niveau du micro-ordinateur de supervision, l'opérateur dispose : d'un synoptique animé de la machine, de la visualisation des états des entrées et sorties, des deux premiers niveaux de la description fonctionnelle SADT, du GEMMA animé en fonction de l'état courant du palettiseur, d'une fenêtre des alarmes.

## 3. FONCTION « TRAITER LES INFORMATIONS »

Le cœur de la partie commande du palettiseur est un automate programmable Schneider TSX 37-21 doté d'un module d'entrées/sorties supplémentaire (Figure FS 1.20). Le processeur inclut une mémoire RAM de 20 K mots (programme, données et constantes). Le logiciel est capable de traiter une tâche événementielle sur apparition de 1 à 16 événements, qui permettent de prendre en compte des données Tout Ou Rien à tout instant, indépendamment du cycle de scrutation. D'autre part, il possède un horodateur intégré. Il est équipé d'une prise auxiliaire poste fixe et d'une prise terminal (RS 485, protocole Uni-Telway maître/esclave, Modbus esclave ou chaîne de caractères).

À cette logique programmée s'ajoute un certain nombre de fonctions câblées, dont les fonctions de sécurité en particulier, que l'on trouvera sur les schémas en fin de chapitre (d - fonctions câblées).

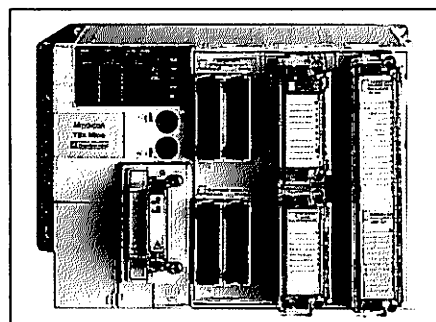


Figure FS 1.20. Automate programmable (Schneider).

## a) Affectation des variables d'entrées et sorties

Les variables en couleur sont spécifiques à la gestion des sécurités et des modes de marches et d'arrêt.

Rep Mnémo	Rep Norm.	Fonction d'entrée	AUTOMATE TSX-37		Fonction de sortie	Rep Mnémo	Rep Norm.
DJ1	Q10	Détecter défaut élévateur	% I 1.4	% Q2.0	Autoriser P.O. en énergie		
RT1	F10	Détecter défaut convoyeur	% I 1.5	Q2.11	Allumer voyant défaut	DS2	H2
D9	B9	Détecter carton sur palette	% I 1.6	% Q2.3	Mettre en Marche le convoyeur	KM6	KM6
D1	B1	Détecter pince ouverte	% I 1.7	% Q2.4	Monter le préhenseur	KM2	KM2
D2	B2	Détecter pince fermée	% I 1.8	% Q2.5	Descendre le préhenseur	KM3	KM3
D3	B3	Détecter rotation à 0°	% I 1.9	% Q2.6	Mettre en Petite vitesse d'élévation	KM5	KM5
D4	B4	Détecter rotation à 90°	% I 1.10	% Q2.7	Mettre en Grande vitesse d'élévation	KM4	KM4
D7	B7	Détecter préhenseur côté prise	% I 1.11	% Q2.8	Allumer balise verte		H3
D8	B8	Détecter préhenseur côté dépose	% I 1.12	% Q2.9	Allumer balise orange		H4
D5	B5	Détecter pousseur en position sortie	% I 1.13	% Q2.10	Allumer balise rouge		H5
D6	B6	Détecter pousseur en position rentrée	% I 1.14	% Q4.4	Ouvrir la pince	EV2A	2YV0
Fc1	S10	Détecter préhenseur en pos. haute	% I 3.0	% Q4.5	Fermer la pince	EV2B	2YV1
Fc2	S12	Détecter préhenseur en pos. basse	% I 3.1	% Q4.6	Tourner la pince à 0°	EV3A	3YV0
Fc3	S13	Détecter l'accostage de la pince	% I 3.2	% Q4.7	Tourner la pince à 90°	EV3B	3YV1
D10	B10	Détecter présence carton	% I 3.3	% Q4.8	Transférer le préhenseur du côté prise	EV1B	1YV0
D11	B11	Détecter carton en butée	% I 3.4	% Q4.9	Transférer le préhenseur côté dépose	EV1A	1YV1
Fc7	S17	Détecter deux cartons amenés	% I 3.5	% Q4.10	Sortir le pousseur	EV4	4YV1
Fc8	S18	Détecter présence de la palette	% I 3.6	% Q4.0	Actionner l'électrovanne générale	EV5	5YV1
Fc9	S19	Détecter cartons dans la pince	% I 3.7				
Fc4	S14	Détecter prise d'origine élévateur	% I 3.8				
D12	B12	Détecter présence air comprimé	% I 3.9				
Bp6	S6	Valider le cycle	% I 3.10				
		Détecter présence du 24 volts	% I 3.11				
Bp5	S5	Sélectionner mode automatique	% I 3.12				
Bp5	S5	Sélectionner mode manuel	% I 3.13				
Bp4	S4	Demander arrêt du cycle	% I 3.14				
Fc10	S20	Détecter porte fermée	% I 3.15				

## b) Gestion des modes de marches et d'arrêt

Le constructeur a fait le choix de réaliser toute la surveillance de défaut ainsi que la conduite des modes de marches en langage LADDER. L'analyse de cette programmation sort du cadre de cet ouvrage. On peut toutefois mettre en évidence des solutions typiques en détaillant la commande du convoyeur (sortie % Q2.3, Figure FS 1.21).

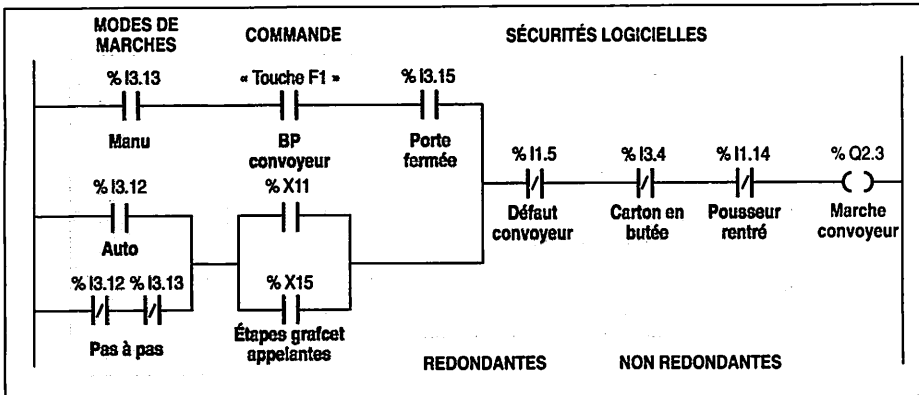


Figure FS 1.21. Principe de la commande d'une sortie typique.

### ● Modes de marches

La commande du convoyeur est possible dans les trois modes « auto », « manu » et « pas à pas ». La commande manuelle doit être inopérante en mode « auto » et « pas à pas » (exclusion mutuelle par le sélecteur à trois positions).

### ● Commande

Suivant le mode de fonctionnement, c'est le bouton poussoir ou les étapes grafcet X11- X15 (correspondant respectivement aux étapes E1 et 12 dans la macro-étape M1, Figure FS 1-11) qui déclenchent la rotation du moteur du convoyeur.

### ● Sécurité logicielles

Dans le cas où certaines conditions de sécurité ne sont pas remplies, la commande est inhibée.

**Sécurité redondantes :** elles sont placées afin d'augmenter le niveau de sécurité en redondances avec le câblage : « Porte non fermée » et « défaut du convoyeur ». Par ailleurs, le circuit de puissance du moteur du convoyeur est protégé par un relais thermique RT10.

**Sécurité logicielles non redondantes :** elles permettent de s'assurer que la commande ne s'effectue pas lorsque la partie opérative est dans une situation incompatible : « pousseur non rentré » ou « carton en butée ».

## c) Commande en mode automatique et en mode pas à pas

La commande implantée dans l'automate s'éloigne quelque peu du modèle décrit précédemment :

- Ce type d'automate est programmé à partir d'un atelier logiciel appelé TSX-Micro. Le langage « grafcet » disponible n'inclut pas la programmation des macro-étapes, ce qui impose une réécriture des grafquets correspondants.
- Le constructeur a choisi un type de commande « égalitaire », les grafquets relatifs aux macro-étapes communiquant directement entre eux sans intervention d'un Grafcet de coordination des tâches GPN.
- La macro-étape M3 a été séparée en trois grafquets distincts et les macro-étapes M1 et M2 ont été représentées par un grafcet chacune, ce qui fait cinq grafquets au final.
- Les grafquets ont été adaptés pour permettre la commande en mode auto ou en mode pas à pas.

À titre d'exemple, le grafcet automate correspondant à la macro étape M2 « Saisir une rangée » est représenté ci dessous (Figure FS 1.22). L'expression de certaines réceptivités a été simplifiée afin de faciliter la compréhension.

Le fonctionnement dans les deux modes « auto » et « pas à pas » est obtenu par la méthode décrite en IV.4.c. La synchronisation horizontale avec les autres grafquets impose l'utilisation de nombreuses variables logiques d'état de grafcet X32, X11, etc. ainsi que celle de bits internes élaborés par traitement combinatoire telles que « poussage de deux cartons effectué ».

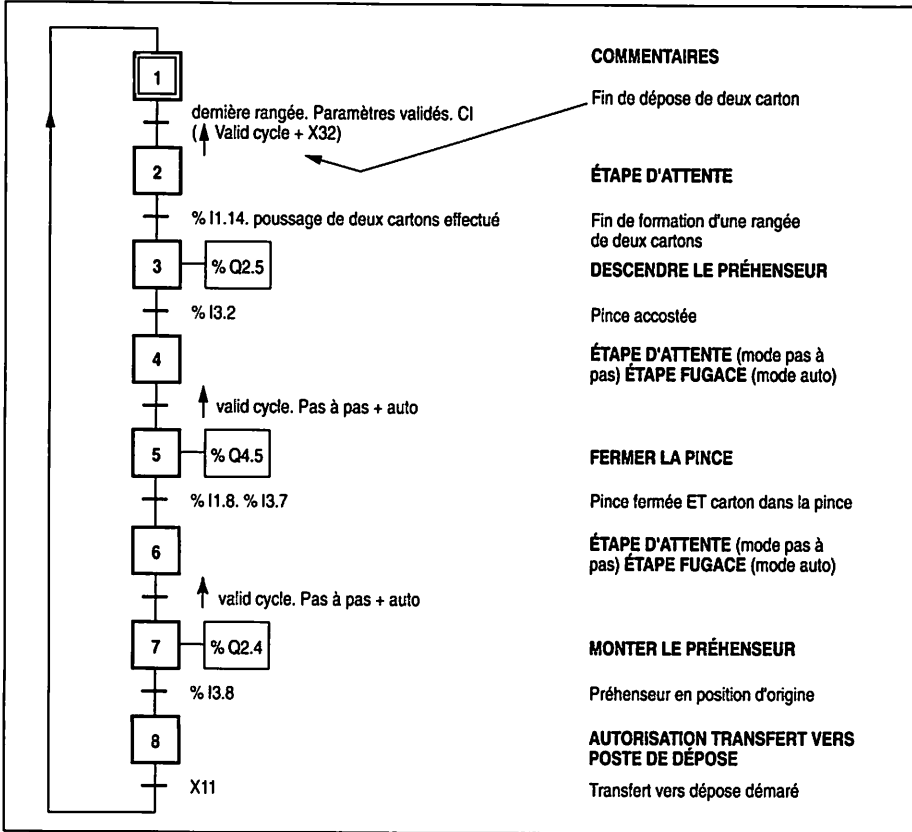


Figure FS 1.22. Grafcet « automate » de la macro-étape M2.

#### d) fonctions câblées

D'autres fonctions sont réalisées par câblage, telles que les fonctions « acquérir les entrées » (Figures FS 1.23 et FS 1.24) ou « commander la puissance » qui intègre elle-même nombre de sécurités câblées (voir : 5 – « Commander la puissance »).

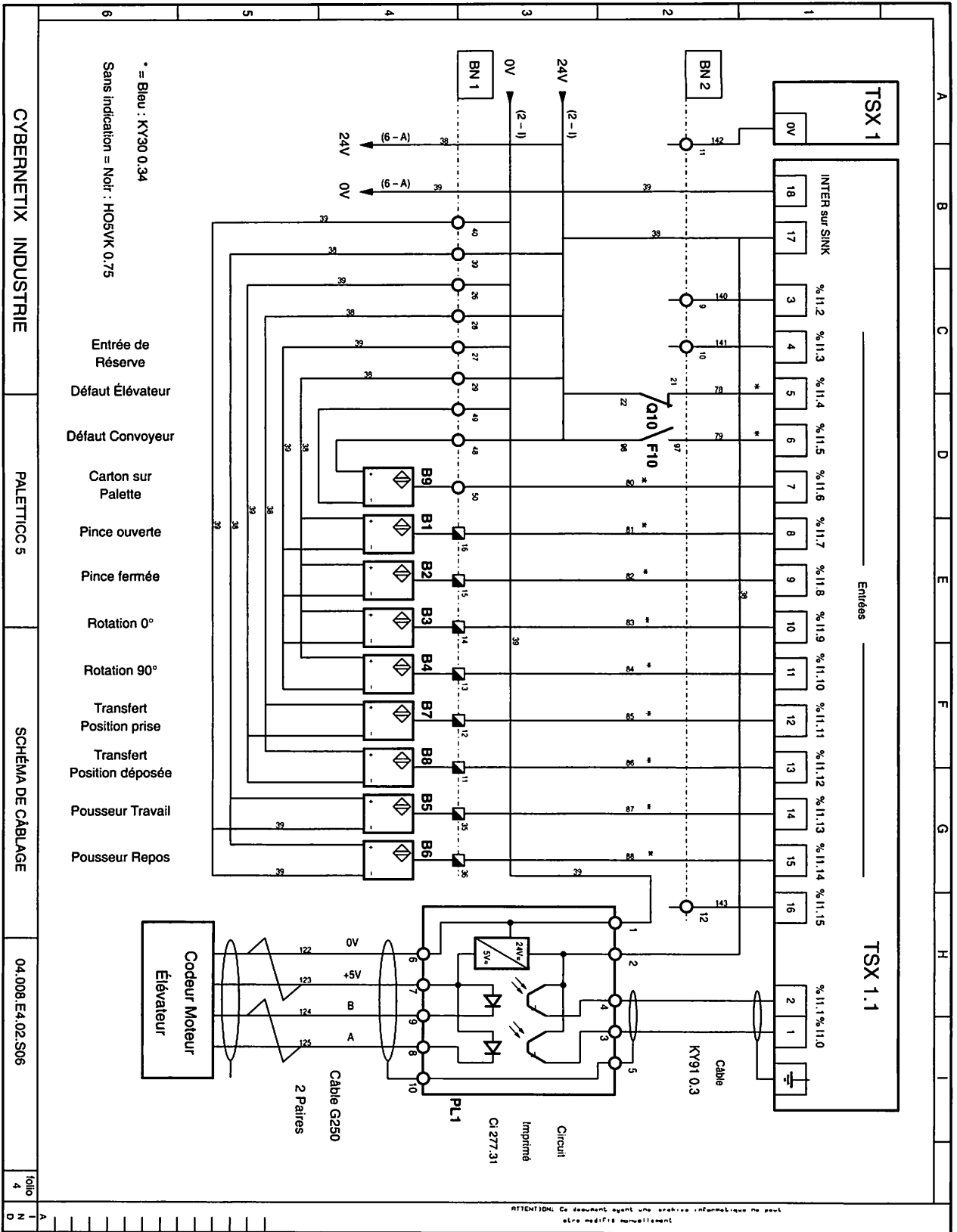


Figure FS 1.23. Schéma de câblage des entrées de l'automate.

ATTENTION: Ce document est une archive informatique ne peut être modifié manuellement

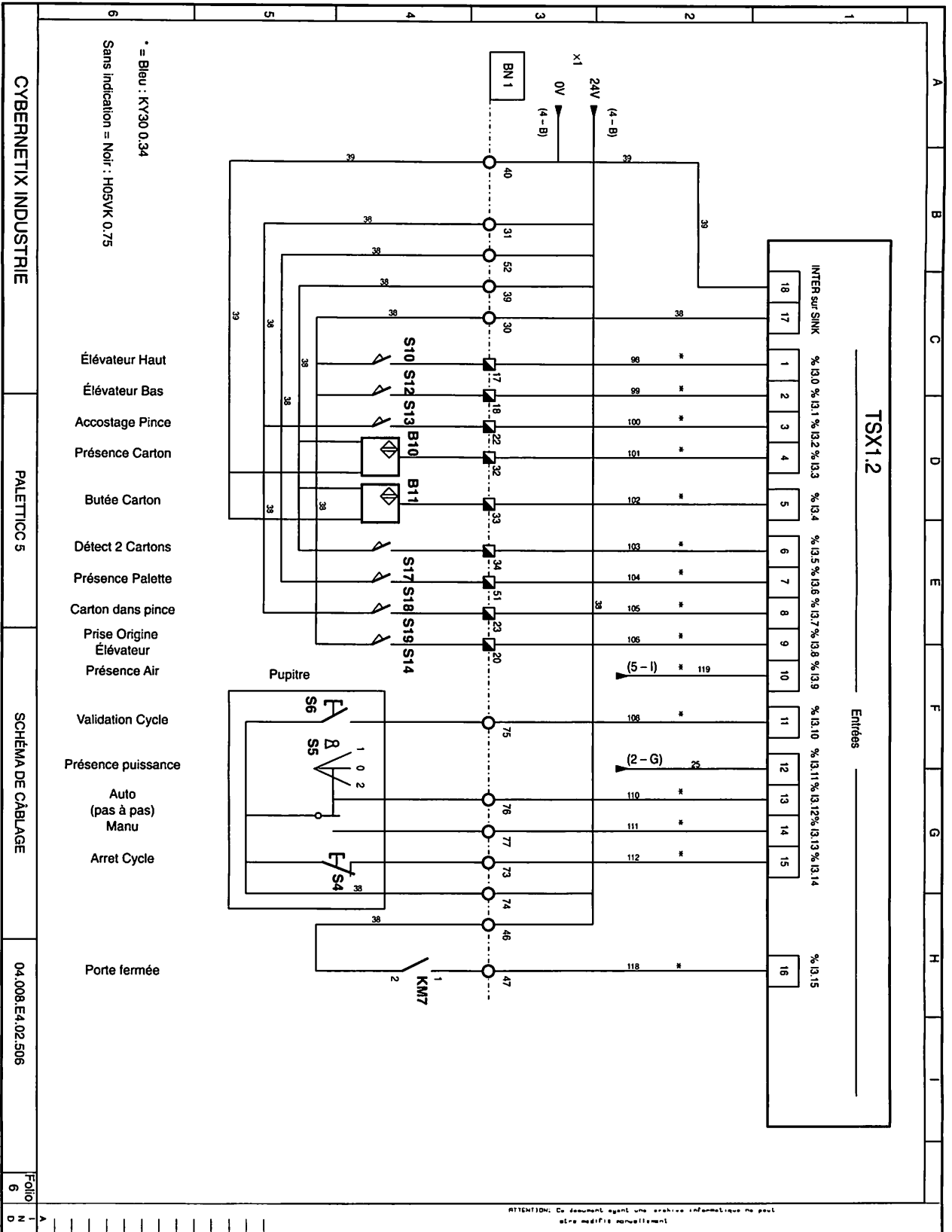


Figure FS 1.24. Schéma de câblage des entrées supplémentaires l'automate.

5. FONCTION « COMMANDER LA PUISSANCE »

a. Chaîne d'action électrique

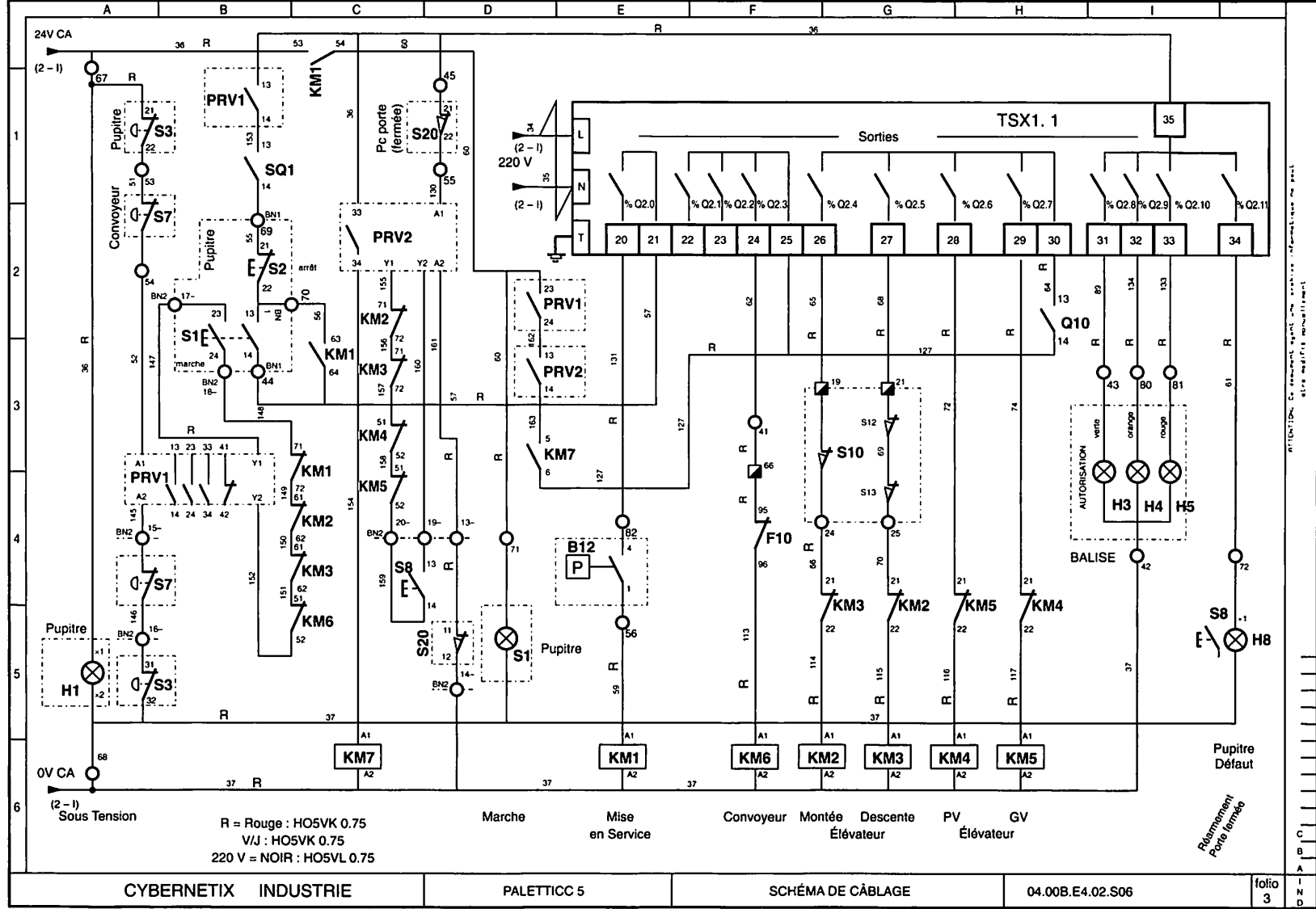
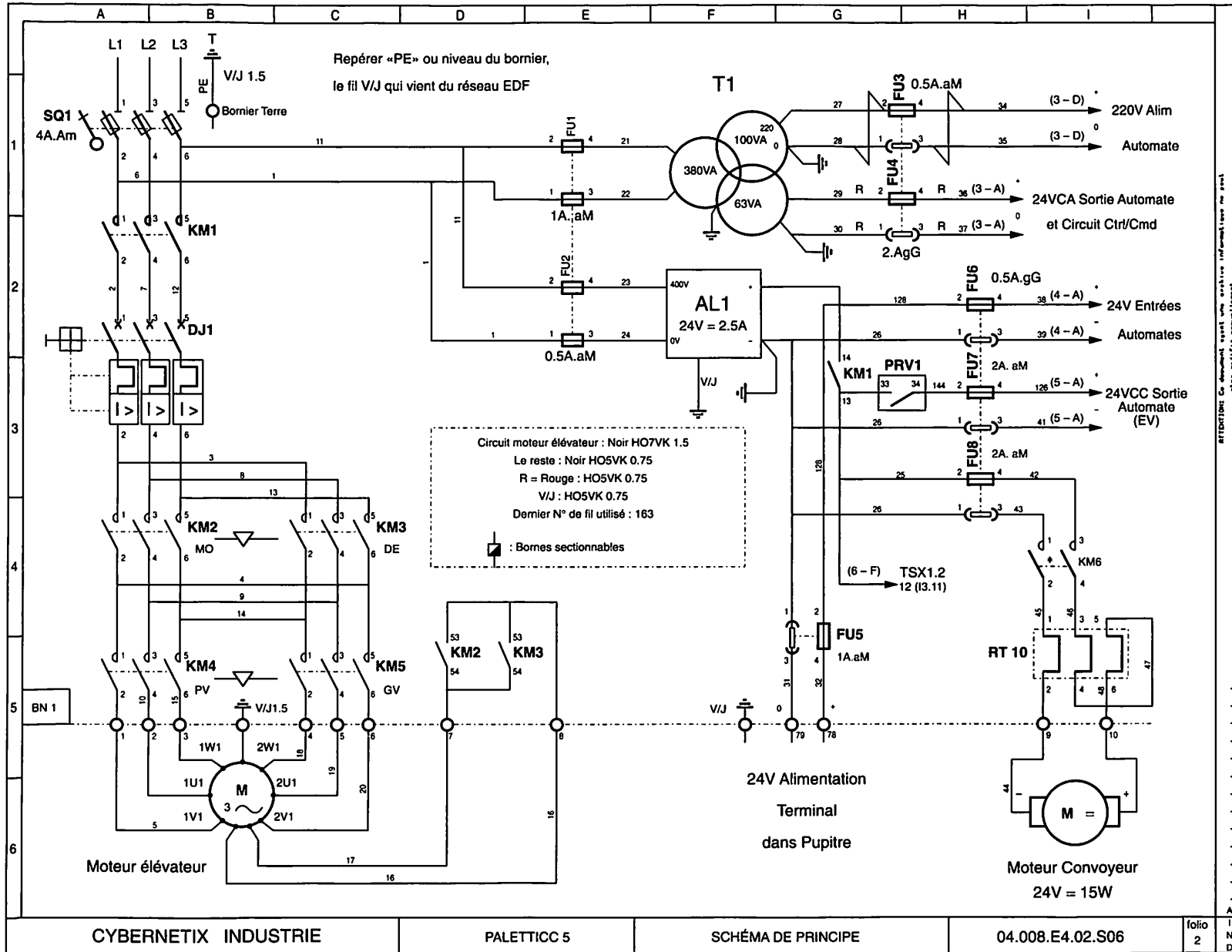


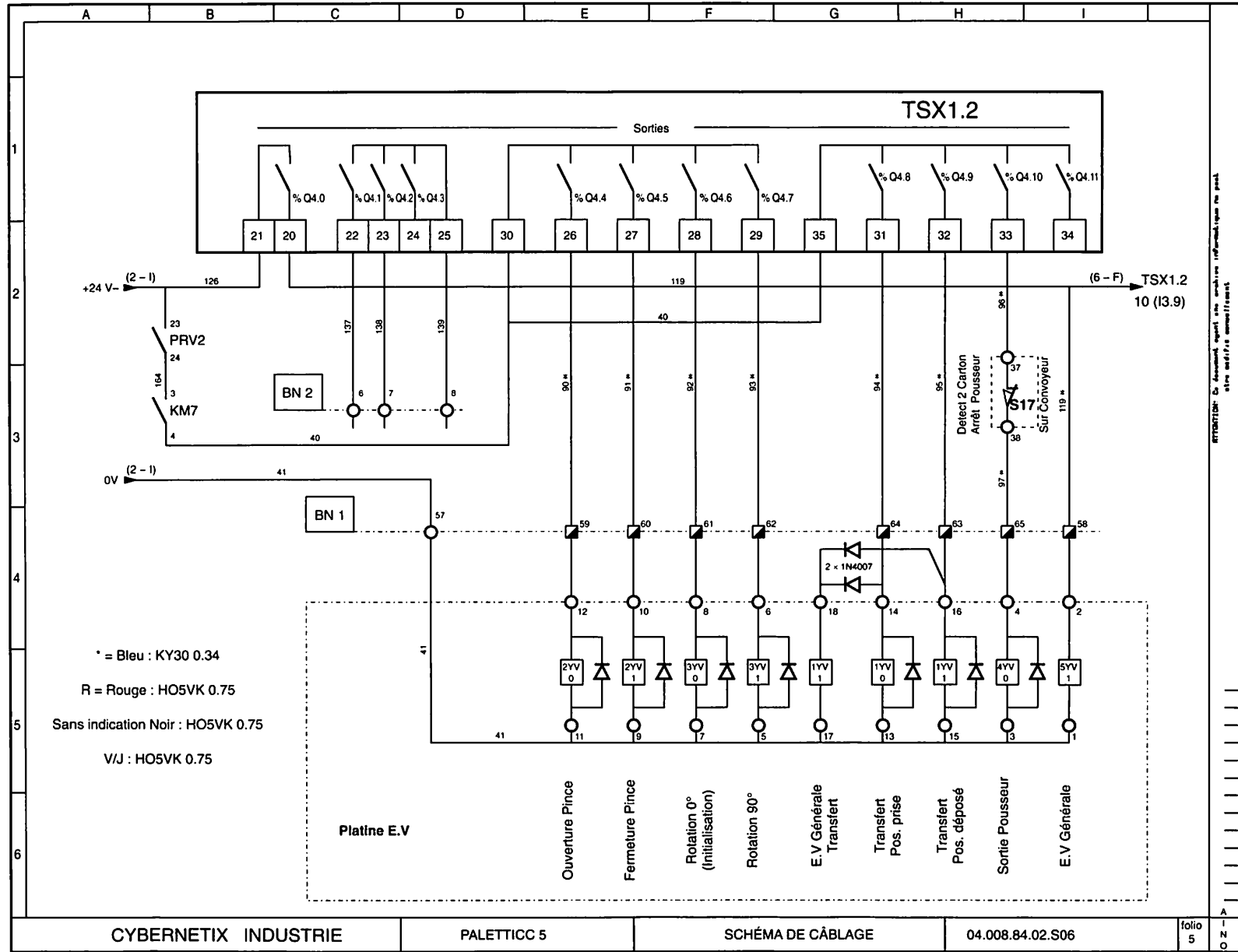
Figure FS 1.25. Schéma de câblage des sorties et des sécurités.



REVISION: Ce document, ainsi que toutes informations ne sont être remis gratuitement.

Figure FS 1.26. Schéma de câblage des moteurs et de la « tête de filerie ».





ATTENTION: Ce document ne contient que des informations relatives au câblage. Il ne doit pas être utilisé pour le montage.

Figure FS 1.27. Schéma de câblage des sorties de l'automate.

b) Chaîne d'action pneumatique

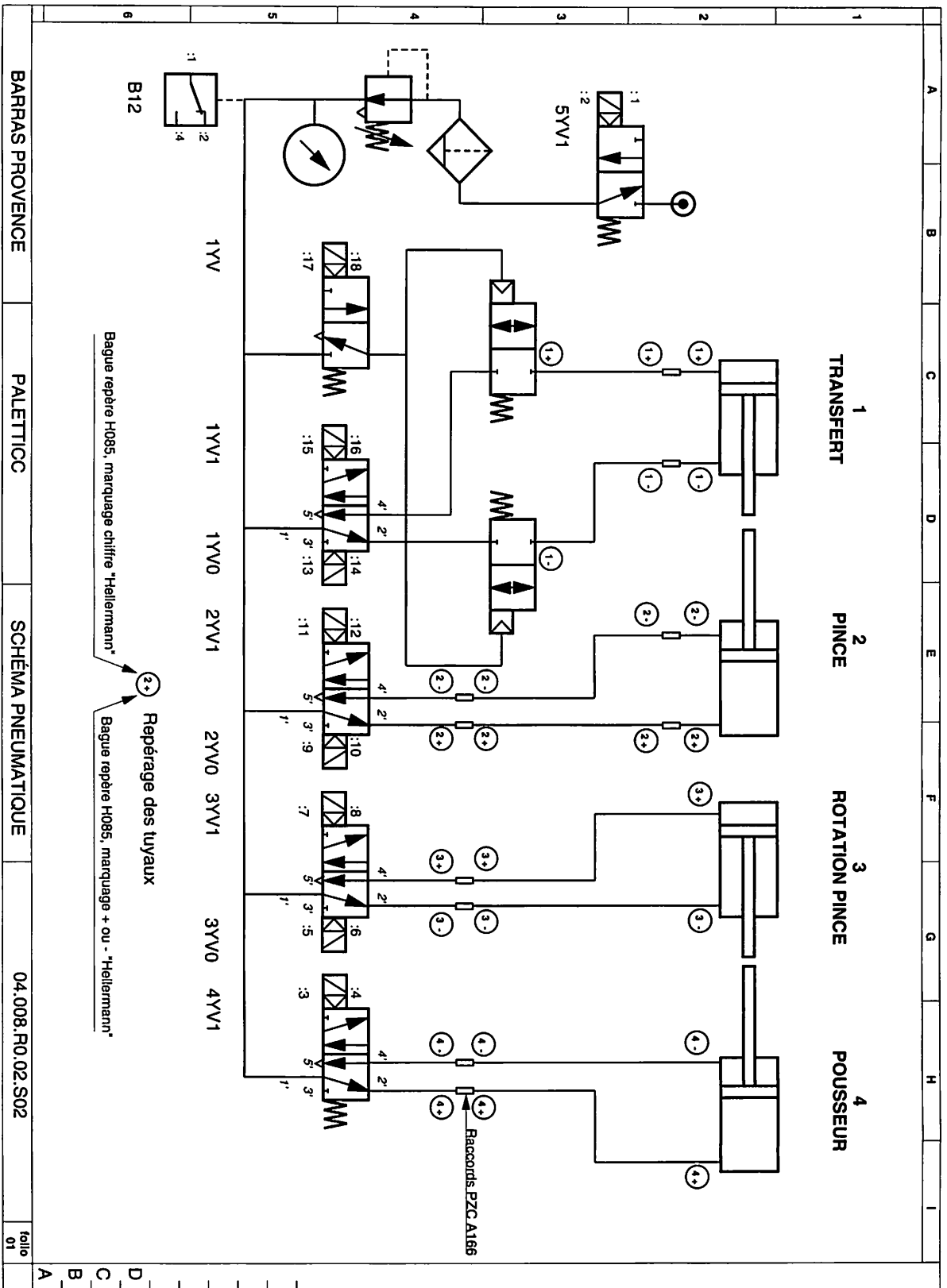


Figure FS 1.28. Schéma de puissance pneumatique.

# Machine de conditionnement automatique

## I. Présentation du système

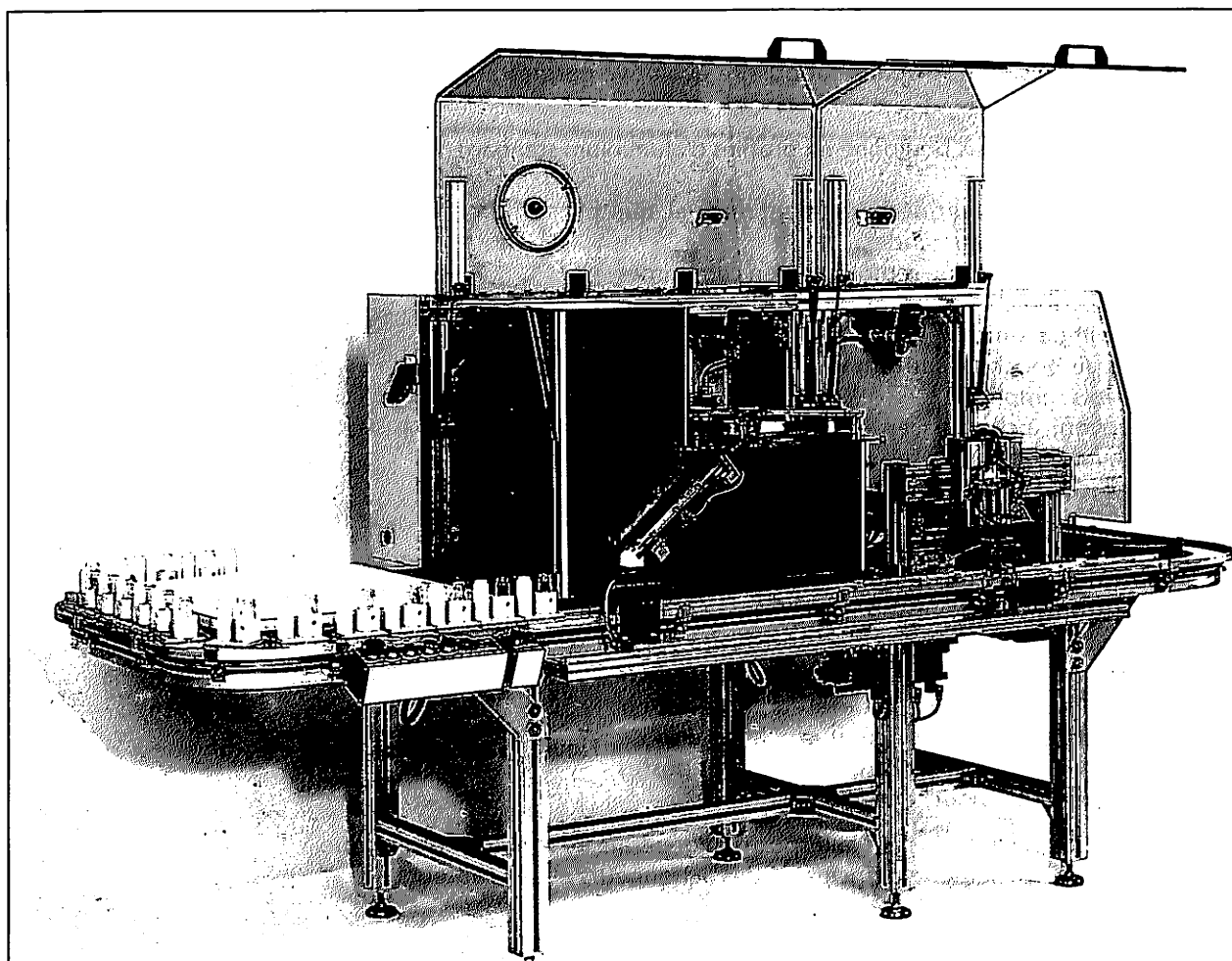


Figure FS 2.1. Machine de conditionnement automatique (doc. Ravoux).

### 1. EXPRESSION DU BESOIN

Les produits pharmaceutiques tels que pilules, gélules et comprimés sont fréquemment conditionnés en flacon ou en tube. Certains produits de confiserie sont conditionnés de la même façon.

Ces flacons et tubes sont bouchés par enclipsage, c'est-à-dire par emboîtement légèrement forcé du bouchon sur le tube ou le flacon.

La machine de conditionnement automatique doit donc assurer :

- le remplissage en quantité précise mais réglable de flacons de dimensions et formes diverses;
- le bouchage avec des capsules emboîtables de dimensions et formes variées;
- l'évacuation des produits finis.

La figure FS 2.2 donne un exemple de flacon et de produits conditionnés par la machine.

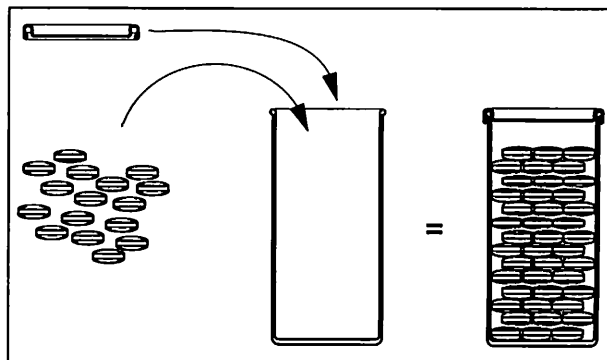


Figure FS 2.2. Opération de remplissage et de bouchage.

## 2. CHOIX DU PROCESSUS ET STRUCTURE DE LA PARTIE OPÉRATIVE

Le choix a été fait de séparer remplissage et bouchage. Les concepteurs de la machine ont choisi une structure modulaire évolutive permettant des modifications ultérieures.

Construite sur un châssis boulonné en profilés d'aluminium standard, la machine (Figure FS 2.4) comporte :

- un poste de chargement/déchargement manuel, qui reçoit le pupitre de commande;
- un poste automatique de remplissage en comprimés où ils sont distribués et comptés à partir d'une trémie de capacité importante;
- un poste de bouchage automatique du flacon ou tube (une fois rempli);
- un convoyeur à chaîne « en écaille », ou transfert libre, recevant des palettes rectangulaires (Figure FS 2.3) sur lesquelles l'opérateur dispose les flacons vides et les bouchons d'un côté et retire les flacons remplis et bouchés à leur retour au poste de chargement/déchargement d'un autre côté. Les flacons sont disposés dans une empreinte qui permet de les centrer avec suffisamment de précision. Les bouchons sont placés sur un cylindre support pour permettre leur saisie par le manipulateur. L'opérateur, après avoir placé un flacon et un bouchon sur une palette, dispose celle-ci sur un convoyeur qui les amène vers les postes de remplissage et de bouchage.

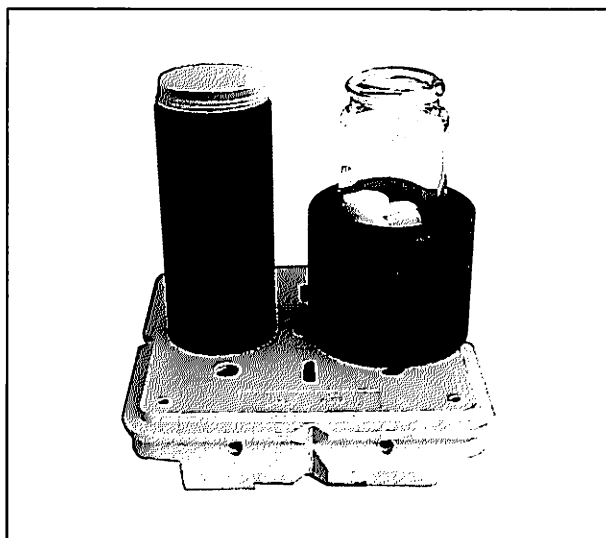


Figure FS 2.3. Aménagement d'une palette de convoyeur.

Les figures FS 2.1 et FS 2.4 donnent la disposition générale de la machine ainsi que l'identification des éléments principaux, des actionneurs et des capteurs.

## 3. CAPACITÉS

**Cadence** : jusqu'à 10000 comprimés ou gélules à l'heure.

**Alimentation électrique** : 400 V triphasé 50 Hz (ligne 1,4 kW).

**Consommation électrique** : 0,4 kWh.

**Air comprimé** : 6 bars en pression nominale.

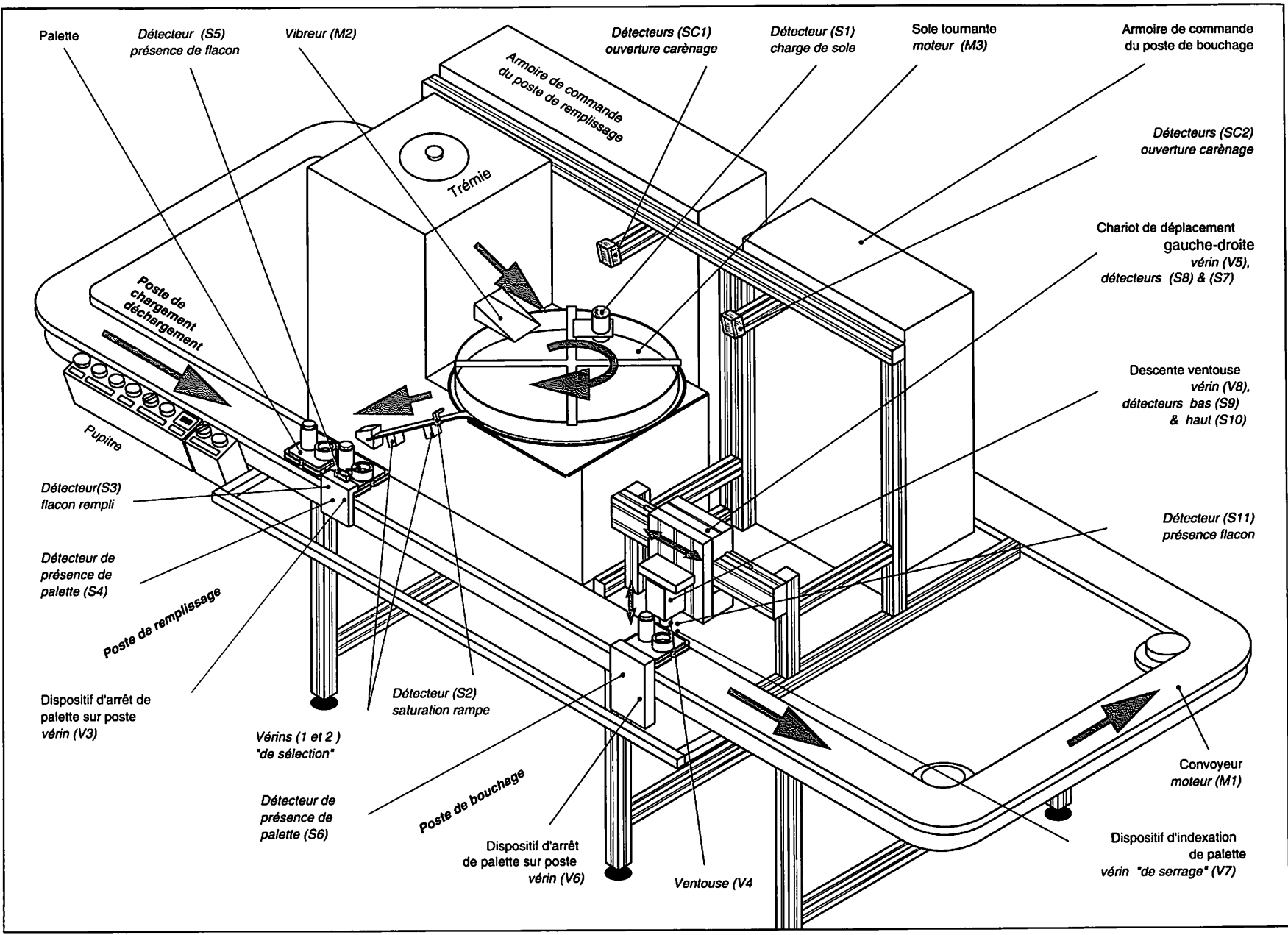
**Consommation d'air** : 15 normaux litres/minute.

**Masse totale à vide** : 270 kg.

**Dimensions** : 2,9 m × 1,05 m au sol, 2 m de haut.

**Bruit** : < 70 dB.

Figure FS 2.4. Structure de la partie opérative.



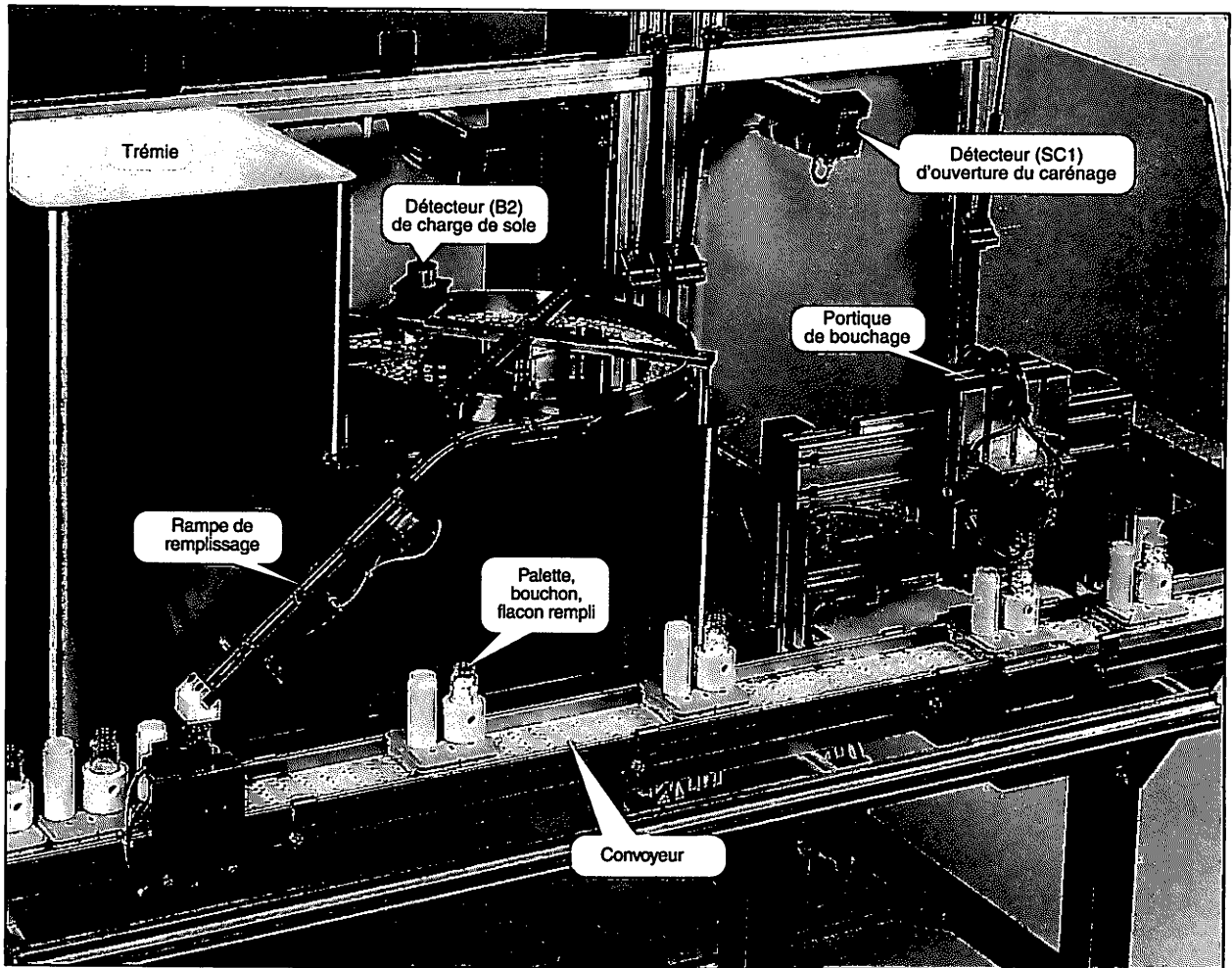


Figure FS 2.5. Postes de remplissage et de bouchage.

## II. Fonctionnement

### 1. MODE OPÉRATOIRE

L'opérateur dispose les flacons vides et les bouchons sur les palettes comme indiqué figure FS 2.3. Les palettes ainsi préparées sont disposées sur le convoyeur qui tourne en permanence.

L'opérateur réceptionne, au même poste de chargement/déchargement, les palettes sur lesquelles sont placés les flacons remplis et bouchés, et les range dans des cartons.

#### ● Remplissage

Les comprimés sont extraits de la trémie par une goulotte vibrante qui les déverse sur une sole tournante (dont le fond tourne dans le sens horaire). Ils sont ensuite distribués l'un derrière l'autre, grâce à une rampe de guidage en forme de spirale, puis évacués vers une rampe inclinée disposée en sortie de la sole.

La rampe de remplissage de flacons est munie d'un sélecteur constitué de deux vérins simple effet à tiges sorties au repos (V1) et (V2), dont le principe de fonctionnement est décrit par la figure FS 2.6. Le réglage de la quantité de comprimés est possible par la modification de l'écartement des deux vérins.

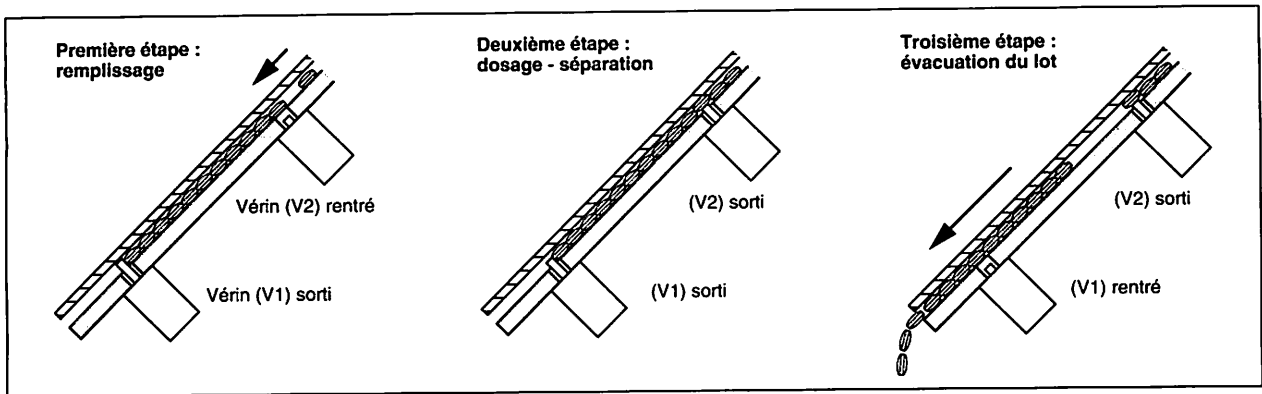


Figure FS 2.6. Principe du dosage mécanique.

### ● Bouchage

Les palettes se présentent sous le portique de bouchage avec un flacon et un bouchon, disposés sur la palette comme indiqué sur la figure FS 2.3. Elles sont immobilisées au poste de bouchage de telle sorte que le porte-bouchon soit dans l'axe de la ventouse.

La position initiale du portique est celle qui est représentée en trait continu sur la figure FS 2.7.

L'ensemble ventouse descend (mouvement 1), saisit le bouchon en fin de descente, remonte (mouvement 2), puis se déplace à droite (mouvement 3) afin de placer le bouchon dans l'axe du flacon. La ventouse descend alors (mouvement 4), emboîte le bouchon sur le flacon, le lâche, puis remonte (mouvement 5). L'ensemble se replace ensuite sur la gauche (mouvement 6).

La palette portant un flacon rempli et bouché est alors libérée et convoyée vers le poste de chargement/ déchargement.

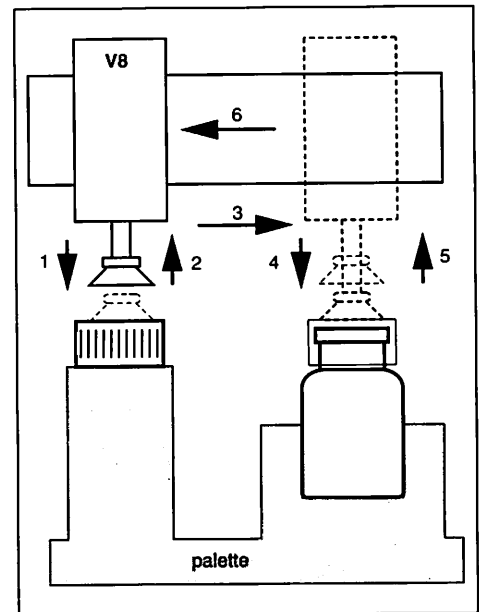


Figure FS 2.7. Cycle de bouchage.

## 2. FONCTIONNEMENT EN PRODUCTION NORMALE

La machine comporte quatre sous-ensembles fonctionnels :

- le convoyeur, qui fonctionne en permanence;
- le distributeur vibrant et la sole tournante, dont la commande obéit à des conditions logiques élémentaires;
- le poste de remplissage, dont le fonctionnement est séquentiel;
- le poste de bouchage, dont le fonctionnement est séquentiel.

### a) Fonction « transférer » (convoyeur)

Le moteur est mis en fonctionnement par une commande de type marche/arrêt.

### b) Fonction « alimenter en comprimés »

Le distributeur vibrant fonctionne s'il n'y a pas d'accumulation de comprimés dans la sole, indiquée par l'état du détecteur (B2). S'il y a surcharge, le distributeur vibrant arrête d'alimenter la sole en comprimés. Le fonctionnement de cette sole est lui même conditionné au remplissage de la rampe de distribution. Si elle n'est pas saturée la sole tourne afin de fournir des comprimés à la rampe. Si elle est saturée, la sole est arrêtée.

Cette condition particulière est exprimée par l'étape 51 du grafcet décrivant le cycle de remplissage (Figure FS 2.8).

### c) Fonction « remplir les flacons »

Le GRAFCET de la figure FS 2.8 décrit le fonctionnement en mode automatique du poste de remplissage.

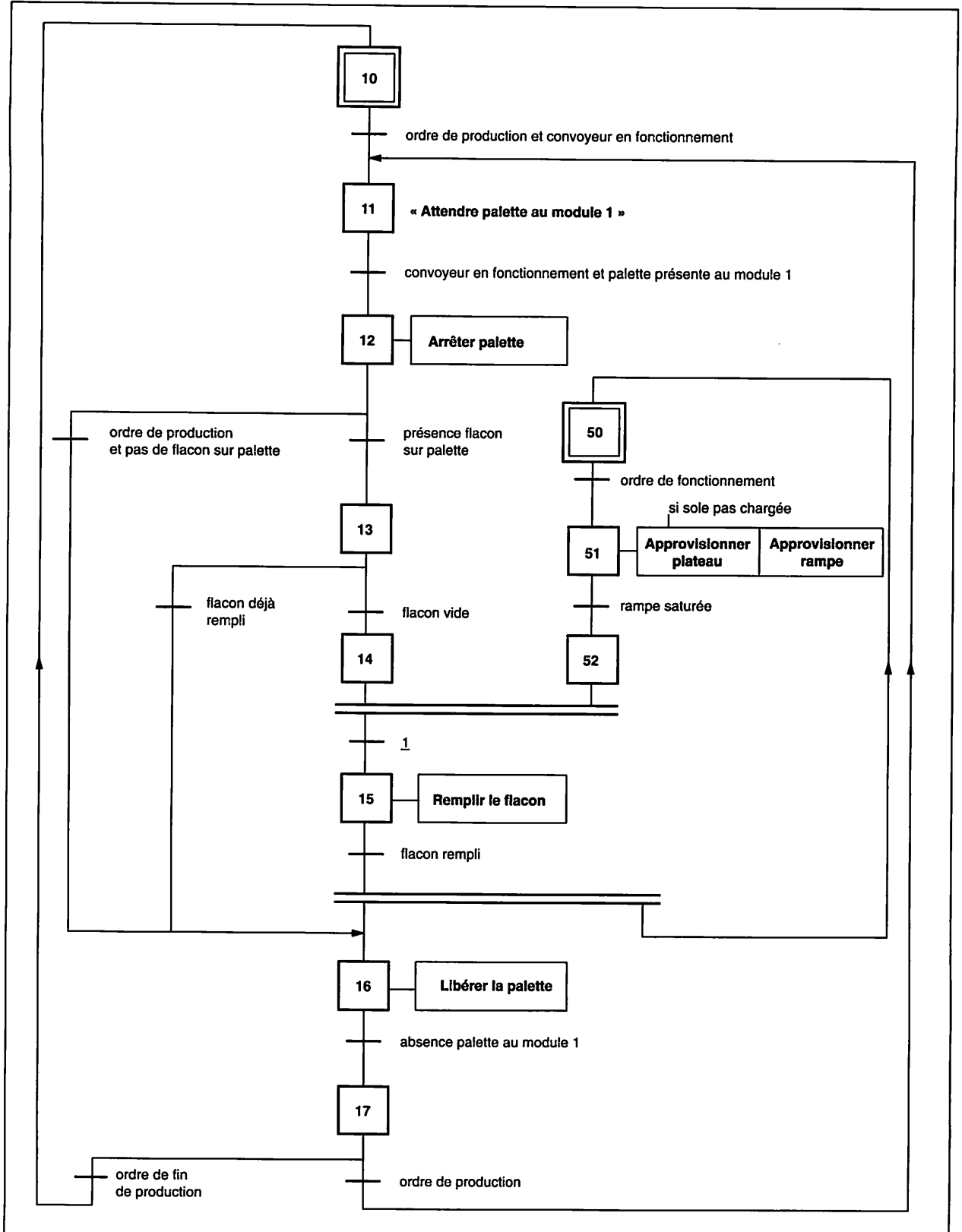


Figure FS 2.8. Description des spécifications du cycle de remplissage par grafcet.



**d) Fonction « boucher les flacons »**

Le fonctionnement du poste de bouchage est précisé par le GRAFCET, Figure FS 2.9.

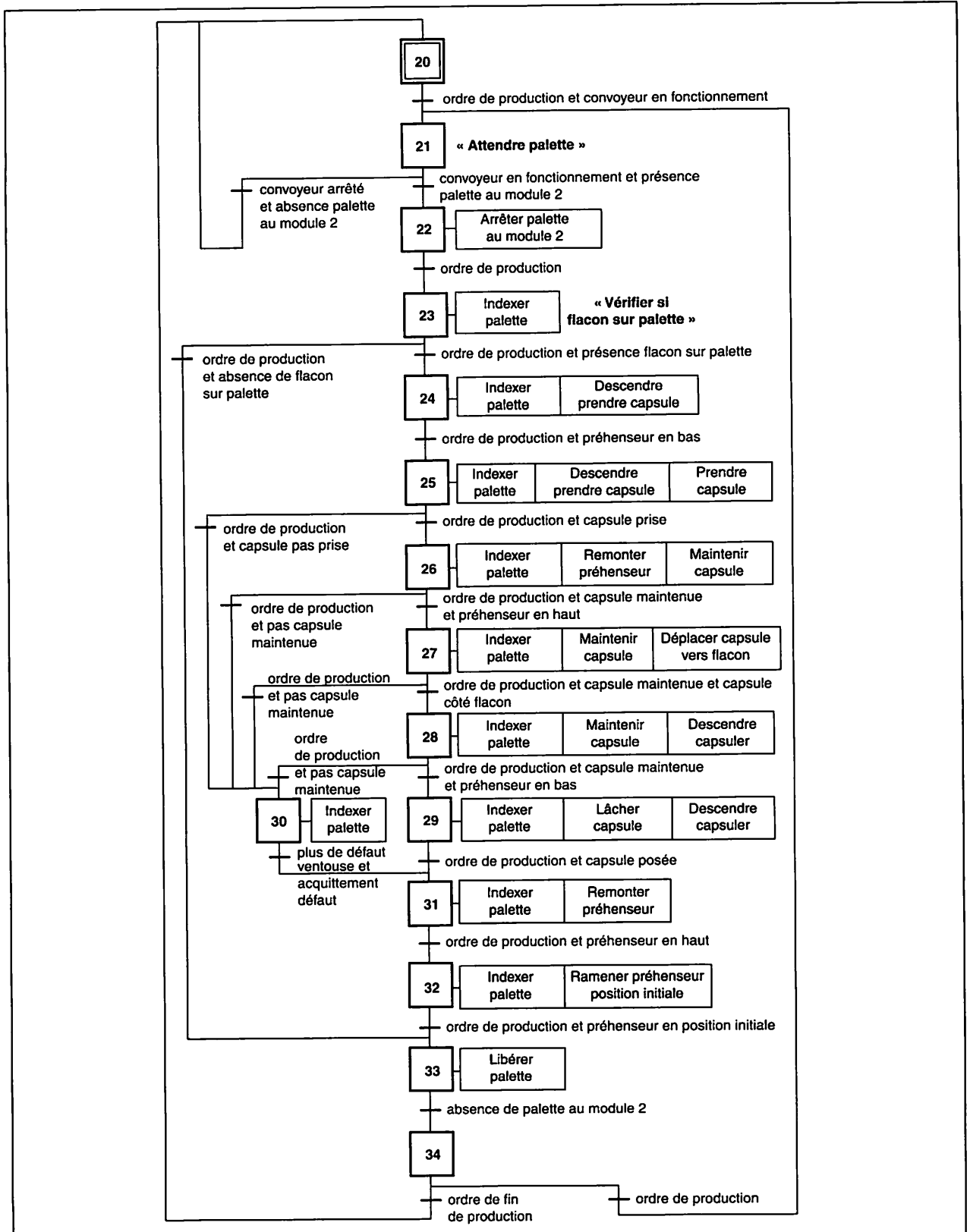
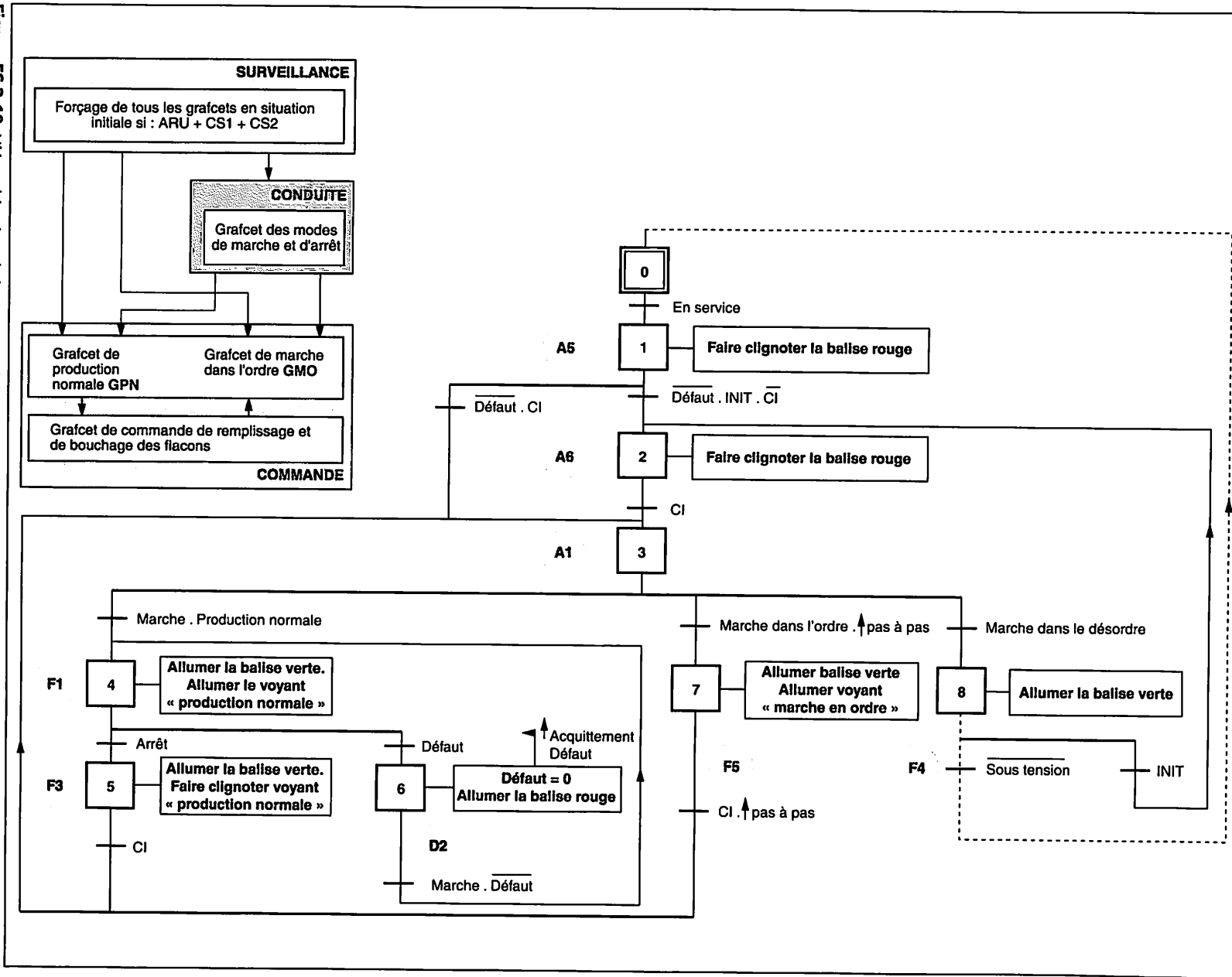


Figure FS 2.9. Grafcet de bouchage.

## 3. MODES DE MARCHES ET D'ARRÊTS

Chaque poste et le convoyeur peuvent être mis en fonctionnement séparément.  
La figure FS 2.10 décrit les modes de marche de ce système. Le GEMMA correspondant est présenté en FICHE MÉTHODE 9.

Figure FS 2.10. Hiérarchisation de la commande et grafcet des modes de marche et d'arrêt.



● Alimentation en énergie (Figure FS 2.11)

La sécurité vis-à-vis de l'alimentation électrique générale est traitée en conformité à la normalisation :

- liaison à la terre des masses métalliques;
- sectionneur (Q1) en tête de ligne 400 V CA, suivi d'un disjoncteur différentiel (Q2);
- disjoncteurs magnéto-thermiques (Q4 et Q5) sur la ligne d'alimentation du transformateur-redresseur 24 V et disjoncteur magnéto-thermique (Q6) coupant les deux lignes de sortie 24 Vcc;
- bloc disjoncteur magnéto-thermique (Q3) sur la ligne du moteur de transport (M1).

L'alimentation électrique basse tension (24 Vcc) pour la partie commande comprend deux lignes (Figure FS 2.11). L'une est en sous tension dès la fermeture du sectionneur général et alimente en particulier l'automate programmable (unité centrale et entrées). L'autre, dite « de sécurité », alimente les sorties automates. Cette seconde ligne provient du « circuit de mise en énergie » de la figure FS 2.11, construit autour d'un module de sécurité « préventa » de Schneider Electric. Ce type de circuit est présenté largement dans le chapitre 12.

Il en découle que tout défaut, tel que chute de pression pneumatique (par B0 et KA4), ouverture d'un capot (par SC1 ou SC2), arrêt d'urgence (par ARU), absence de fermeture du bouton de mise en service S2, entraîne l'ouverture des contacts des relais K1 et K2, donc la mise hors tension, de l'équipement, de la ligne (24VS), et la coupure d'alimentation en air comprimé (par l'électrovanne générale 0YV1).

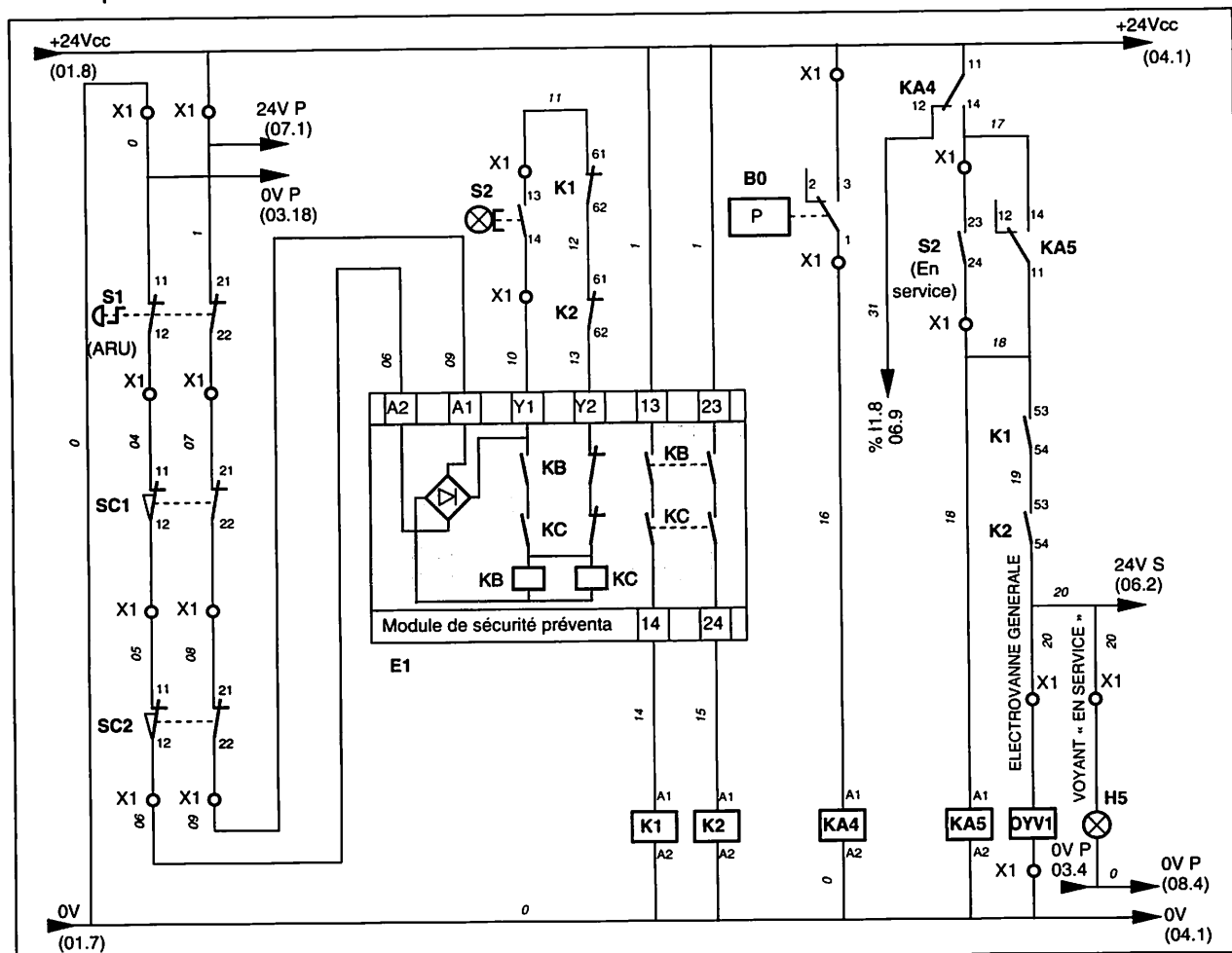


Figure FS 2.11. Circuit de sécurité (folio 3).

### III. Caractéristiques techniques

#### 1. FONCTION « ACQUÉRIR LES INFORMATIONS »

##### ● Détecteur de charge de sole (S1)

Type : proximité capacitif.

Sortie : électronique PNP compatible API.

Alimentation : 10 à 55 V CC.

Courant de sortie : 0,25 A.

Fréquence maximale de commutation : 40 Hz.

Portée : réglable de 4 à 20 mm.

Protection : IP65.

Visualisation de l'état : par diode électroluminescente.

##### ● Détecteur de présence de comprimés dans la rampe (S2)

Type : fourche photoélectrique (barrage).

Sortie : électronique PNP/NPN (compatible API).

Alimentation : 10 à 24 V CC.

Courant de sortie : 0,2 A.

Temps de réponse : 0,5 ms maximum.

Fréquence maximale de commutation : < 2000 Hz.

Portée : barrage de 2, 15 ou 30 mm de passage.

Protection : IP65.

Visualisation de l'état : par diode électroluminescente.

##### ● Détecteur de flacon rempli (S3)

Type : photoélectrique (barrage latéral).

Sortie : électronique NPN/PNP (compatible API).

Alimentation : 10 à 30 V CC (+ 0, - 10 %).

Courant absorbé : < 0,018 A.

Fréquence maximale de commutation : 500 à 170 Hz.

Portée : 8 m maximum.

Protection : IP65.

Visualisation de l'état : par diode électroluminescente.

##### ● Détecteurs de présence palette, aux postes 1 (S4) et 2 (S6)

Type : proximité inductif.

Sortie : électronique NPN/PNP (compatible API).

Alimentation : 10 à 55 V CC.

Courant de sortie : 0,4 A (0,004 A minimum).

Temps de réponse : 0,3 ms maximum.

Fréquence maximale de commutation : 1100 à 1500 Hz.

Portée nominale  $S_n$  : 2 à 4 mm.

Protection : IP67.

Visualisation de l'état : par diode électroluminescente.

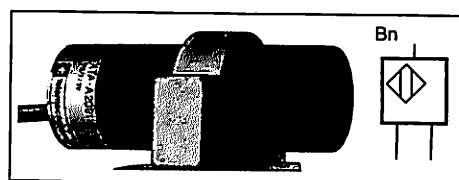


Figure FS 2.12. Détecteur capacitif de sole (Schneider).

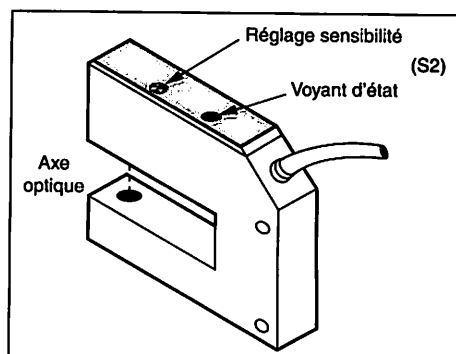


Figure FS 2.13. Fourche photo-électrique.

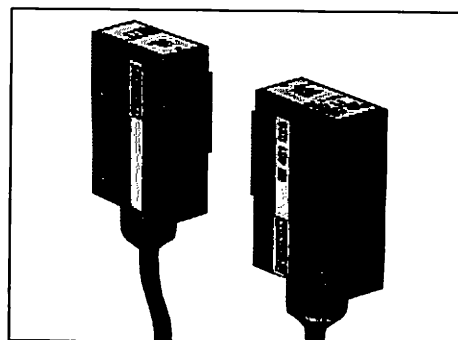


Figure FS 2.14. Barrage photo-électrique (Crouzet).

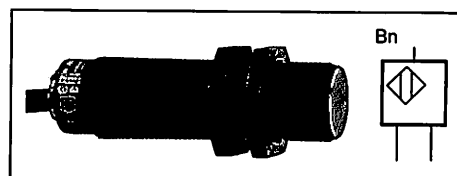


Figure FS 2.15. Détecteur inductif (Schneider).

### ● Détecteurs de présence flacon, aux postes 1 (S5) et 2 (S11)

Type : à action mécanique.

Mouvement : angulaire.

Dispositifs de commande mécanique : levier à galet.

Sortie : un contact « OF » à action brusque (inverseur).

Force minimale d'actionnement : 1 N.

Force minimale d'ouverture positive : 0,22 N.

Course d'approche : 4 mm minimum.

Course différentielle : 1,02 mm maximum.

Course totale : 7,1 mm maximum.

Tension d'isolement : 500 V.

### ● Fins de courses des vérins du manipulateur (S7 à S10)

Type : à détection magnétique avec visualisation par diodes électroluminescentes, identiques à ceux utilisés sur le palettiseur (voir FICHE SYSTÈME I – Palettiseur, paragraphe III.1).

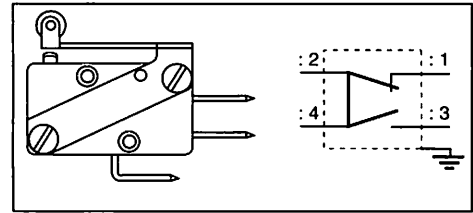


Figure FS 2.16. Détecteur à contact mécanique (microswitch)

## 2. FONCTION « DIALOGUER AVEC L'OPÉRATEUR »

Cette fonction est assurée par un pupitre (Figure FS 2.17).

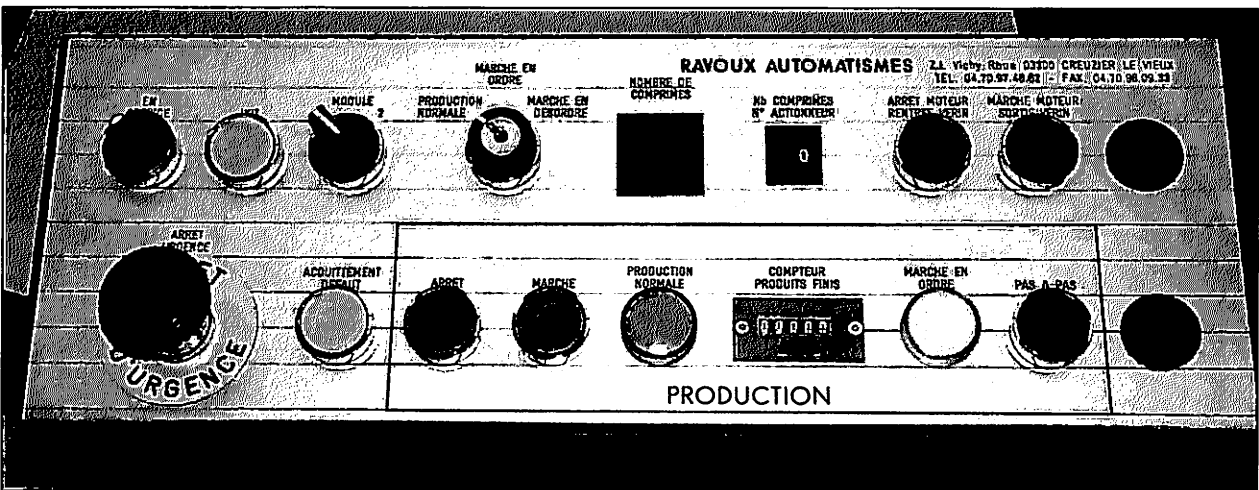


Figure FS 2.17. Pupitre de commande (doc. Ravoux).

## 3. FONCTION COMMANDER LA PUISSANCE

### a) Chaînes d'action électrique

Les actionneurs sont (Figure FS 2.18) :

- un moteur asynchrone M1 pour le convoyeur commandé par le contacteur KM1 et protégé par le disjoncteur magnétothermique Q3 et alimenté par le réseau 400 volts;
- un électro-aimant M2, actionneur monophasé, commandé par le contacteur KM2 et par un variateur de tension permettant de régler l'amplitude des vibrations et le flux de comprimés déversés dans la sole;
- un moteur à courant continu commandé par le contacteur KM3 et permettant l'entraînement de la sole en rotation à vitesse variable, par l'intermédiaire d'un variateur de vitesse.

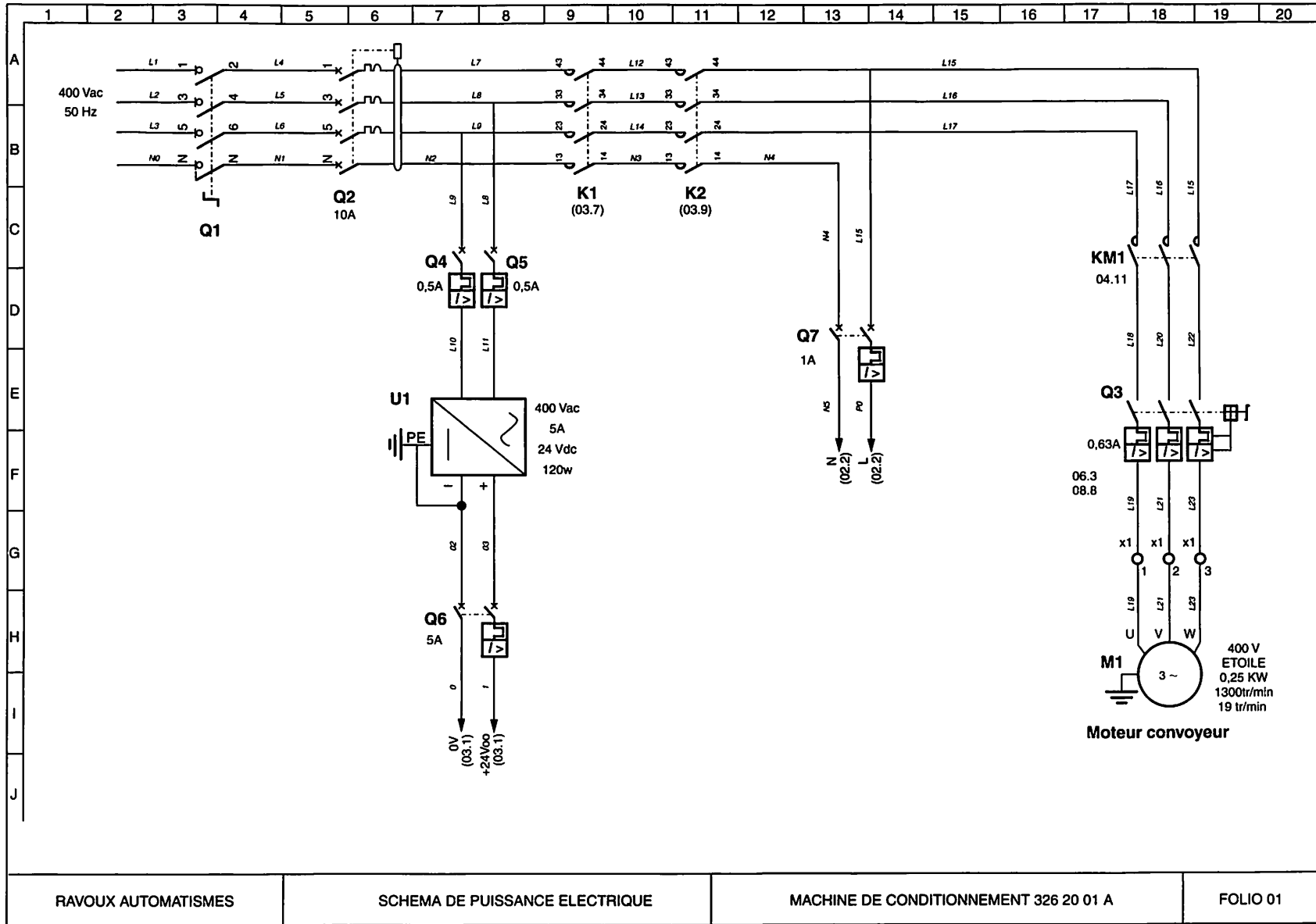


Figure FS 2.18. Schéma de puissance électrique (tête de filerie).

RAVOUX AUTOMATISMES

SCHEMA DE PUISSANCE ELECTRIQUE

MACHINE DE CONDITIONNEMENT 326 20 01 A

FOLIO 01

**b) Chaînes d'action pneumatique**

Les actionneurs, essentiellement des vérins, sont alimentés à travers les distributeurs, à partir du réseau général.

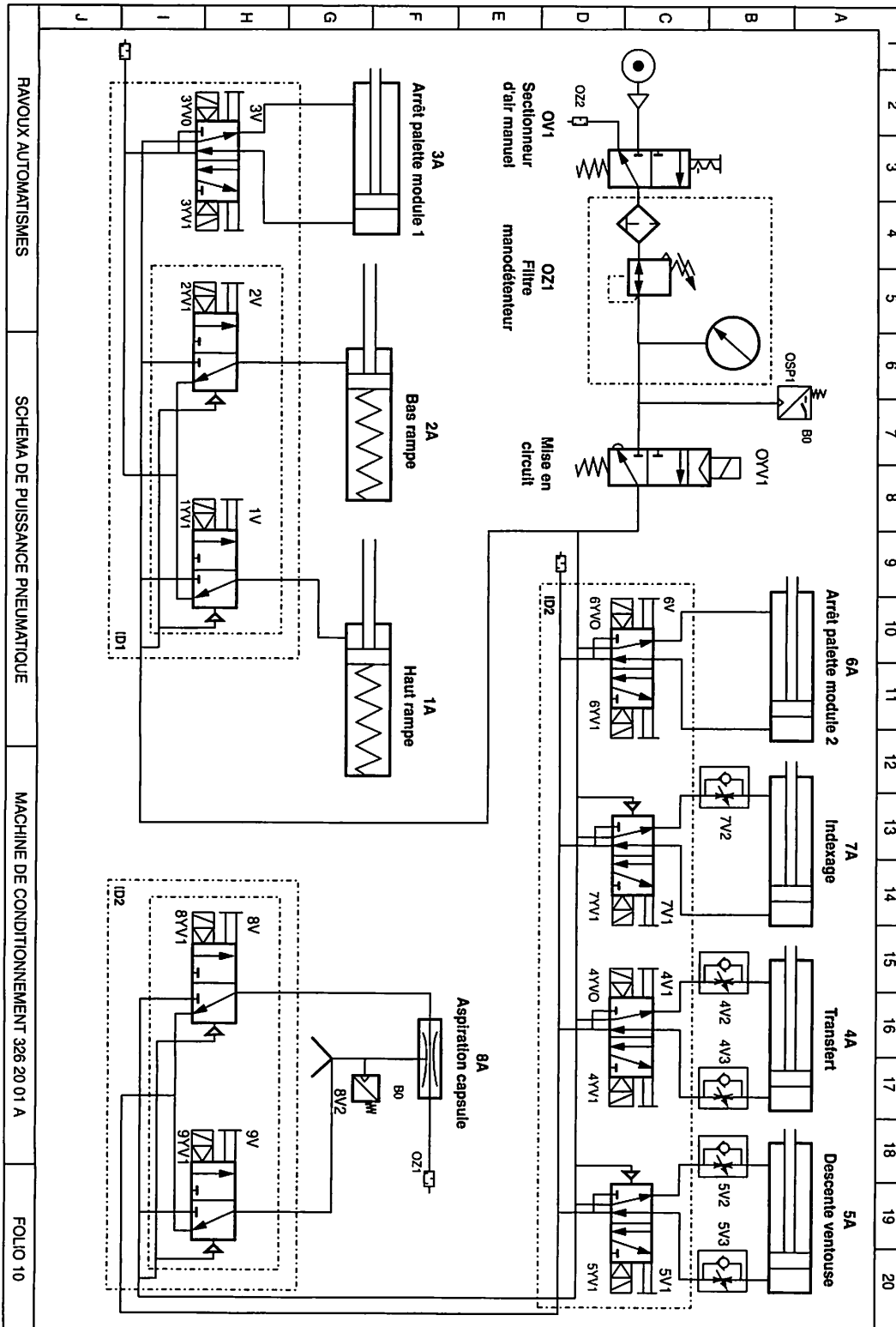


Figure FS 2.19. Schéma de puissance pneumatique.

### 4. FONCTION « TRAITER L'INFORMATION »

La machine est présentée dans sa version de base : un seul automate programmable (TSX 37), un pupitre traditionnel à boutons-poussoirs et les modèles de comportements correspondants.

Toutefois, le constructeur propose plusieurs variantes pour cette machine offrant une richesse d'études plus importante :

- ensembles opératifs complémentaires (conditionnement par manipulateurs, ...);
- pupitre opérateur évolué;
- un Automate Programmable Industriel par module;
- liaisons par réseaux.

#### a) Choix technologiques pour la partie commande

Comme beaucoup d'équipements de machines automatiques, le traitement est mixte (chapitre 8) :

- câblé pour les fonctions de sécurité, le relayage et la signalisation;
- programmé pour les fonctions de commande .

#### ● Variables utilisées par la partie câblée

Rep.	Fonction d'entrée	Rep.	Fonction de sortie
S1	Arrêt d'urgence (ARU)	0YV1	Électrovanne générale d'air
S2	Impulsion de mise en service	H1	Voyant « sous tension »
SC1	Détection d'ouverture carénage 1	H2	Voyant « balise blanche »
SC2	Détection d'ouverture carénage 2	H3	Voyant « balise verte »
		H4	Voyant « balise rouge »
		H5	Voyant « en service »
		KM1	Marche convoyeur

La figure FS 2.21 montre le relayage formant interface et utilisé pour l'alimentation des voyants destinés à la signalisation, ainsi que pour la commande du convoyeur (contacteur KM1) par un contact du relais KA1.

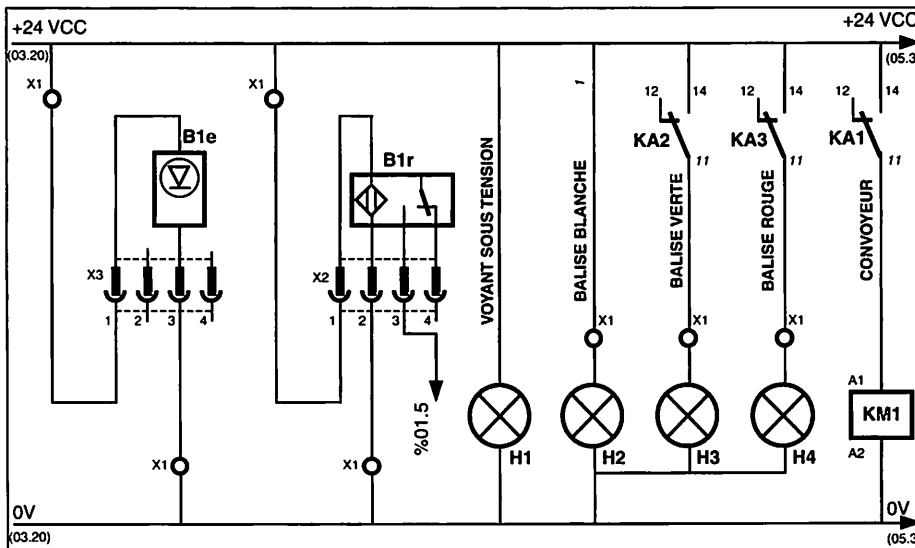


Figure FS 2.21. Signalisation et commande.

#### b) Partie programmée

Les concepteurs de cette machine ont choisi de ne pas contrôler un certain nombre de résultats d'actions, mais de se référer à leur durée d'exécution en remplaçant les informations correspondantes par des « temporisations programmées ».

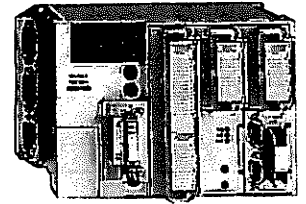


Figure FS 2.20. Automate programmable TSX 37 (Schneider).



C'est le cas des vérins d'arrêt de la palette dont la fin de sortie est simplement indiquée par l'écoulement d'un délai de 500 ms après l'émission de l'ordre de sortie (étape 12 du grafct de commande du module de remplissage, Figures FS 2.8 et 2.25, par exemple). Cette information est obtenue par déclenchement d'une temporisation (délai) à l'activation de l'étape 12, dont la fin est noté 500 ms/X12 et qui est équivalente à l'information « vérin sorti ». Il en est de même dans la commande du module de remplissage (Figure FS 2.25) pour indiquer la fin de remplissage du flacon, obtenue par l'effacement du vérin de bas de rampe et l'écoulement d'un délai de 1 s après activation de l'étape 15 (1 s/X15) et commande de rentrée du vérin par 3YV0. Dans les deux cas, il s'agit de vérins à très faible course sur lesquels l'implantation de détecteurs est très difficile.

Ce choix présente un risque, car les résultats d'actions ne sont pas vérifiés, mais supposés exister au bout d'un laps de temps donné. En contrepartie, la réduction du nombre des détecteurs installés sur la partie opérative diminue les risques de défaillances qui leur sont imputables.

On observe une autre information de même nature associée à la transition entre les étapes 51 et 52, soit 0,5 s/X51. Dans ce cas, il s'agit d'une précaution afin d'arrêter la commande du moteur de sole par KM3 dès que la rampe est saturée et qu'un délai de 0,5 s s'est écoulé. Ceci afin d'éviter de maintenir la rotation de la sole même après que la rampe ait été remplie.

Enfin, sur le grafct de commande du module de remplissage (Figure FS 2.25), il apparaît une condition particulière (B2) associée à l'action KM2. Cette écriture signifie que, bien que l'étape 51 soit active, l'ordre d'activer KM2 ne sera donné que si B2 = 1. Il s'agit d'une action conditionnelle associée à une étape.

#### ● Affectation des entrées et sorties de l'A.P.I.

Rep	Informations d'entrée	AUTOMATE	Fonction de sortie	Rep
	En service (présence 24Vcc)	%I1.1	%Q2.0 Allumer balise verte	KA2
Q3	Disjoncteur moteur	%I1.2	%Q2.1 Allumer balise rouge	KA3
B2	Charge de sole	%I1.3	%Q2.2 Non utilisée	
B3	Saturation rampe	%I1.4	%Q2.3 Allumer voyant « production normale »	H6
B1r	Flacon vide	%I1.5	%Q2.4 Allumer voyant « marche dans l'ordre »	H7
B4	Présence palette au module 1	%I1.6	%Q2.5 Actionner compteur de produit fini	P1
S3	Présence flacon au module 1	%I1.7	%Q2.6 Non utilisée	
B0	Manque pression d'air	%I1.8	%Q2.7 Commander la marche du convoyeur	KA1
B5	Présence palette au module 2	%I1.9	%Q2.8 Commander la marche du vibreur	KM2
S4	Présence flacon au module 2	%I1.10	%Q2.9 Commander la marche du moteur de sole	KM3
B6	Présence vide	%I1.11	%Q2.10 Non utilisée	
B7	Vérin de transfert sorti	%I1.12	%Q2.11 Commander la rentrée du vérin haut de rampe	1YV1
B8	Vérin de transfert rentré	%I1.13	%Q2.12 Commander la rentrée du vérin bas de rampe	2YV1
B9	Ventouse en bas	%I1.14	%Q2.13 Commander la sortie du vérin d'arrêt de palette module 1	3YV1
B10	Ventouse en haut	%I1.15	%Q2.14 Commander la rentrée du vérin d'arrêt de palette module 1	3YV0
S5	Marche (convoyeur)	%I1.16	%Q2.15 Commander la sortie du vérin de transfert	4YV1
S6	Arrêt (convoyeur)	%I1.17	%Q2.16 Commander la rentrée du vérin de transfert	4YV0
S7	Acquittement défaut	%I1.18	%Q2.17 Commander la descente de la ventouse	5YV1
S8	Marche dans le désordre	%I1.19	%Q2.18 Commander la sortie vérin d'arrêt de palette module 2	6YV1
S8	Production normale	%I1.20	%Q2.19 Commander la rentrée du vérin d'arrêt de palette module 2	6YV0
S9	Module 1/2	%I1.21	%Q2.20 Commander l'indexage de la palette	7YV1
S10	Initialisation (INIT)	%I1.22	%Q2.21 Commander l'aspiration de la capsule	8YV1
S11	Pas à pas	%I1.23		
S12	Marche sortie	%I1.24		
S13	Arrêt entrée	%I1.25		
S14A	Roue codeuse 2 <sup>0</sup>	%I1.26		
S14B	Roue codeuse 2 <sup>1</sup>	%I1.27		
S14C	Roue codeuse 2 <sup>2</sup>	%I1.28		
S14D	Roue codeuse 2 <sup>3</sup>	%I1.29		

● Câblage des entrées et sorties de l'A.P.I.

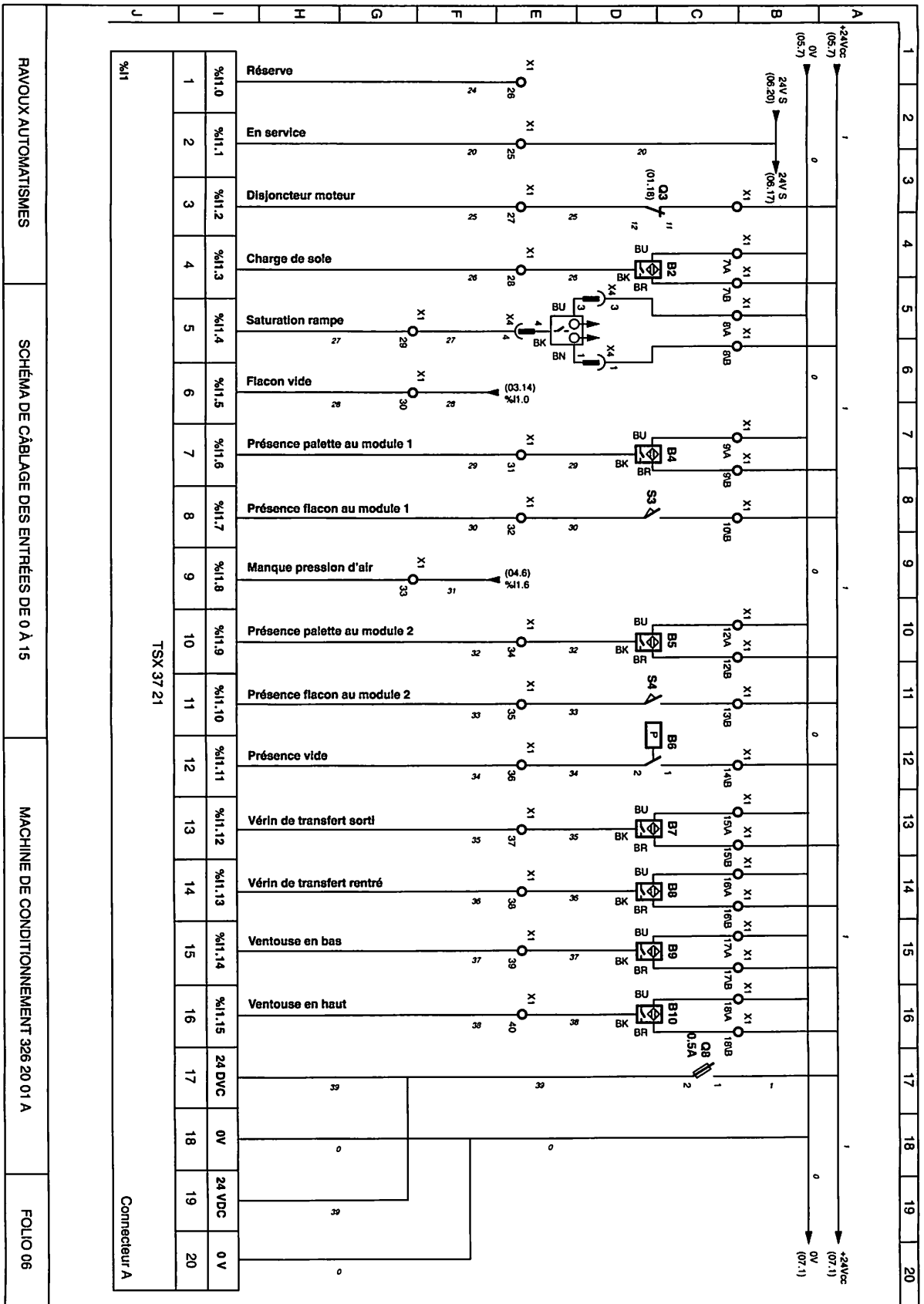


Figure FS 2.22. Schéma de câblage des entrées automate 0 à 15 (folio 06).

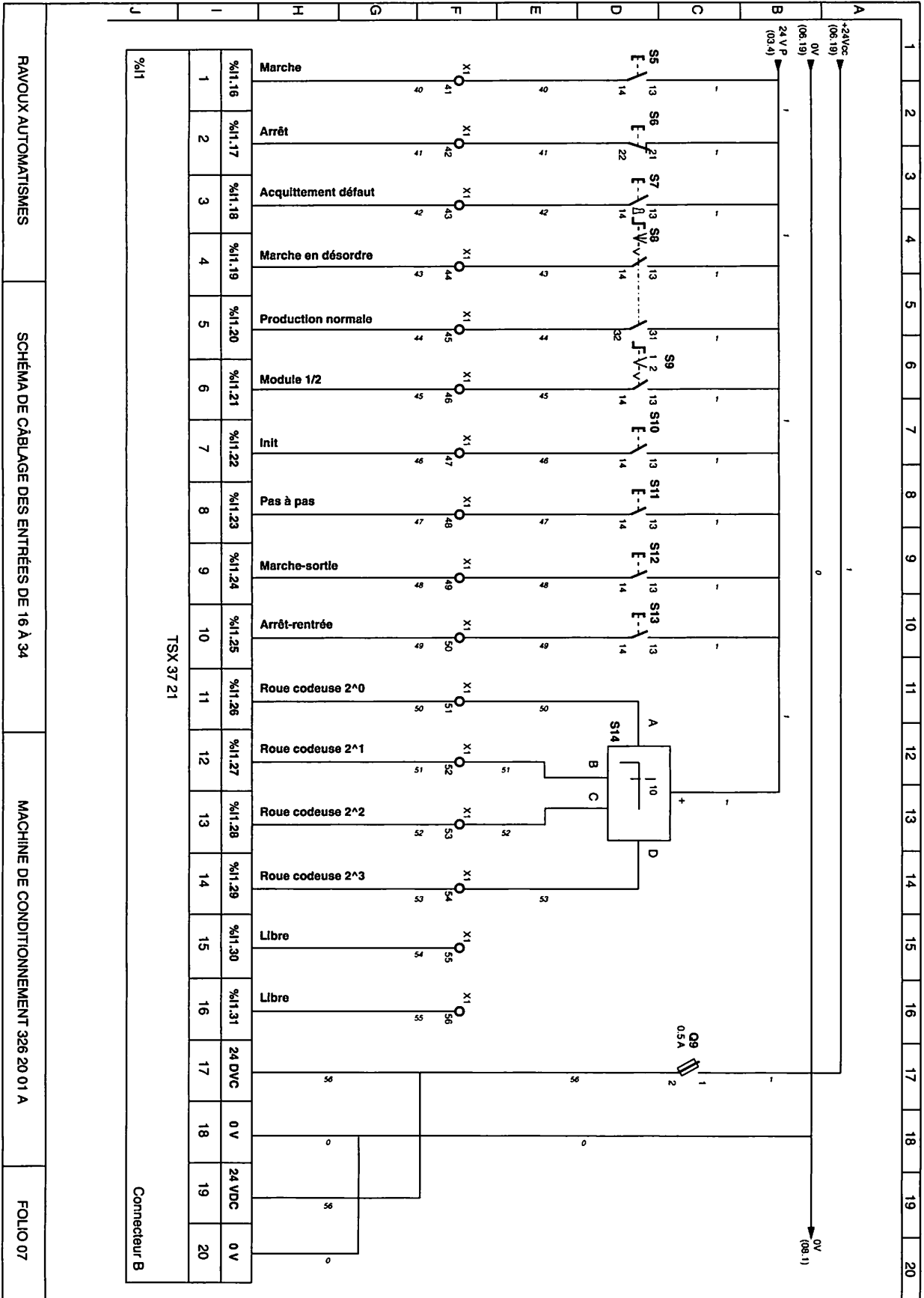


Figure FS 2.23. Schéma de câblage des entrées automate 16 à 31 (folio 07).

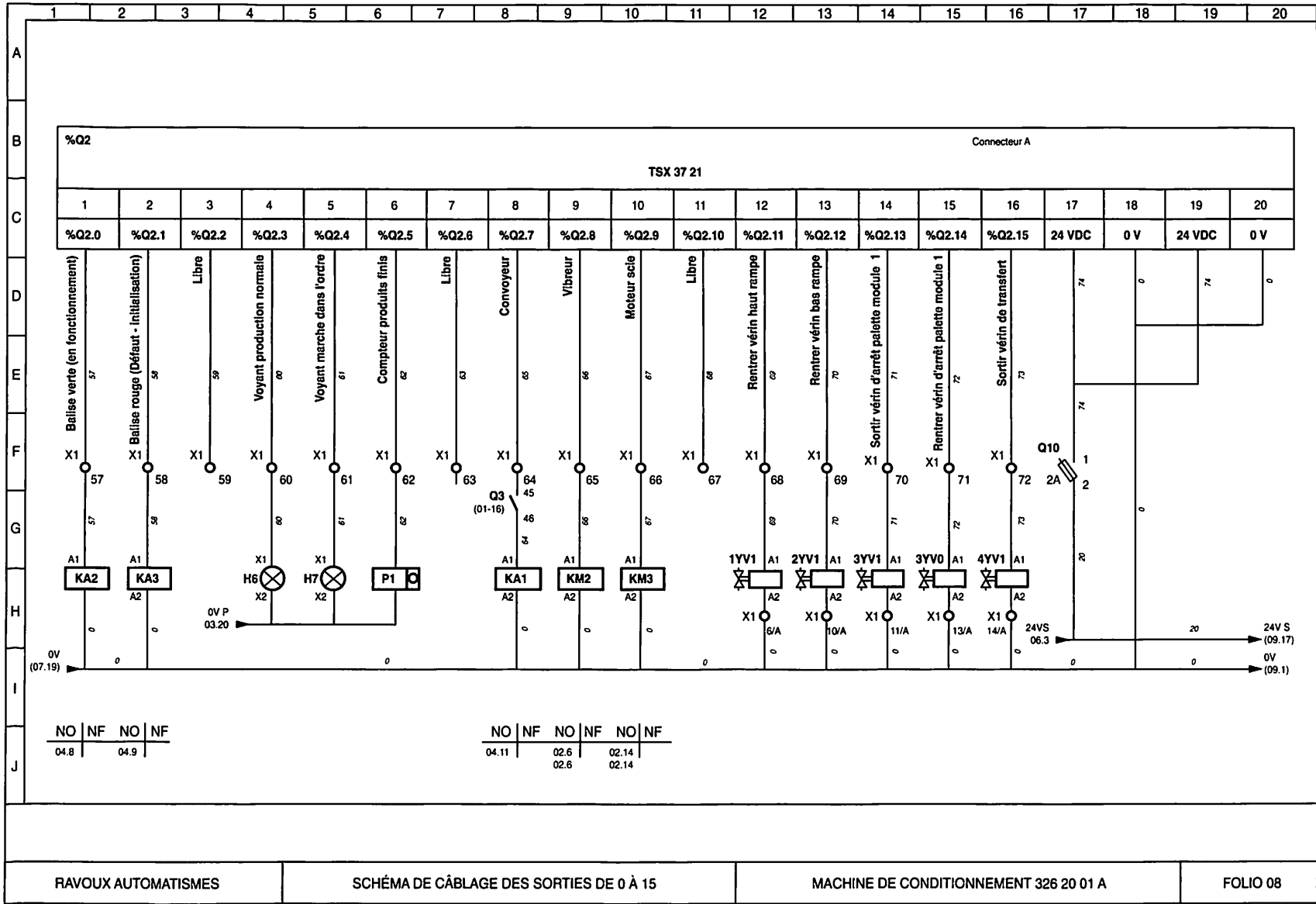


Figure FS 2.24. Schéma de câblage des sorties automate 0 à 15 (folio 08).

● Poste de remplissage

La figure FS 2.25 représente le grafcet du poste de remplissage, élaboré selon un point de vue réalisateur, avec une description d'un niveau préactionneur et complété de spécifications opérationnelles concernant les modes de marche.

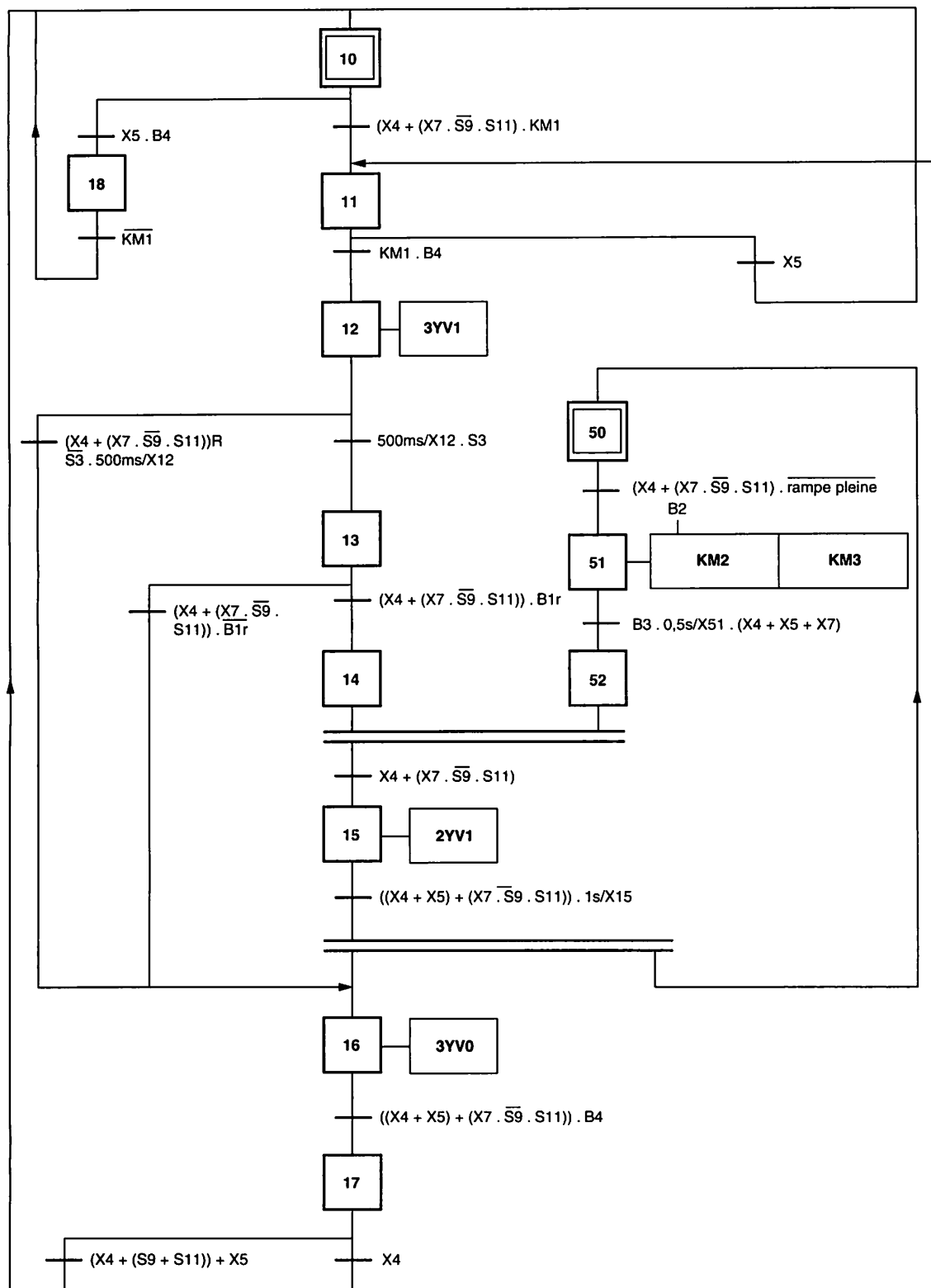


Figure FS 2.25. Grafcet de commande du module de remplissage.

● Programmes automate du poste de remplissage

Le choix d'un appareil Schneider Electric TSX 37 nécessite de suivre les règles et les langages (dans ce cas PL7) définis par le constructeur. Toutefois, la norme IEC 61131-3 tend à normaliser les langages de programmation des automates programmables industriels (voir chapitre 8). Le grafcet, Figure FS 2.26, prend en compte les particularités du choix de l'automate TSX 37 (affectation des variables, etc.).

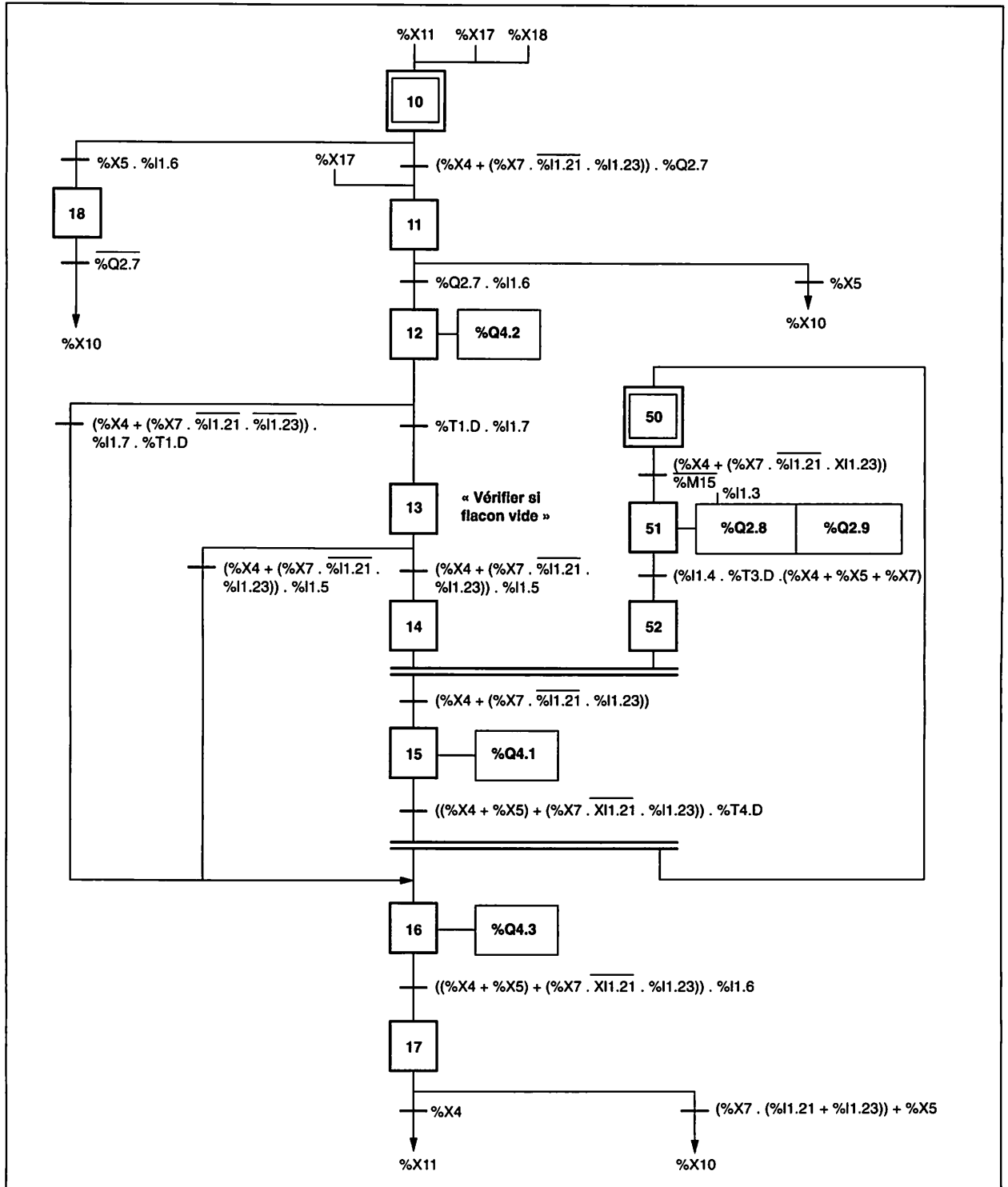


Figure FS 2.26. Grafcet de commande PL7 du module de remplissage.

Le programme est organisé en trois parties exécutées dans l'ordre :

- la zone mémoire dite « Préliminaire », combinatoire, qui traite de l'élaboration des variables d'entrées, ou auxiliaires ainsi que les opérateurs comme les temporisateurs, les comparateurs, etc.);
- la zone mémoire dite « Chart », langage graphique inspiré du grafcet (normalisé sous le vocale SFC : Sequentiel Function Chart);
- la zone mémoire dite « Postérieur », combinatoire qui traite principalement de l'élaboration des variables de sorties.

● **Partie dite « préliminaire »**

La forme de langage utilisée est la forme graphique dite du LADDER. Le principe s'apparente à celui de la logique câblée (mise en série pour le ET, mise en parallèle pour le OU).

Le programmeur dispose d'une liste de variables auxiliaires (ou internes) repérées % M qu'il affecte à sa convenance (voir encadré « allocation des variables externes »).

Ainsi, la variable % M0 caractérise que les conditions initiales de la machine sont présentes (Figure FS 2.27). Elle traduit l'expression :

$$CI = (\overline{\%I1,6} \cdot \%M1 + \%I1,6 \cdot \%I1,7 \cdot \%I1,5 \cdot \%M1) \cdot \%I1,13 \cdot \%I1,15 \cdot \overline{\%I1,9}$$

**Allocation des variables internes (extrait)**

- %M0 = Conditions initiales.
- %M1 = Mémoire vérin d'arrêt palette demi sorti.
- %M2 = Flacon Capsulé et comptabilisé.
- %M4 = Mémoire défaut .
- %M5 = Mémoire défaut vide.
- %M6 = Défaut convoyeur.
- %M7 = Défaut vide.
- %M8 = Défaut approvisionnement comprimés
- %M24 = Rentrer vérin haut de rampe.
- %M25 = Rentrer vérin bas de rampe.
- %M26 = Descendre ventouse.
- .....

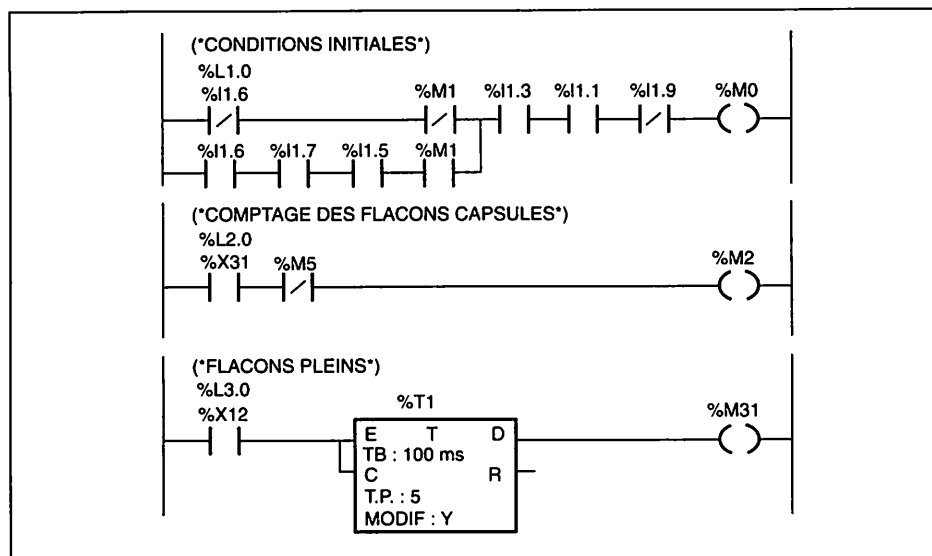


Figure FS 2.27. Extrait du programme « préliminaire » (MAST-PRL).

● **Partie dite « chart »**

C'est la traduction graphique de la structure du grafcet qu'elle reprend sous une forme semblable hormis les actions (Figure FS 2.29).

Les points carrés noirs indiquent la présence d'un réseau caractérisant les conditions logiques associées à la réceptivité.

La figure FS 2.28 montre la programmation de la réceptivité associée à la transition entre l'étape 10 et l'étape 11.

Elle exprime la condition : étape 4 active (graphe des « modes de marches et d'arrêts ») ou étape 7 active Et pas S9 (%I2.1) Et front montant de S11 (%I2.3), le tout avec la condition KM1 (%Q2.7). On notera le choix du programmeur de se limiter à la présence du niveau logique 1 sur la sortie %Q2.7, en faisant l'hypothèse, fréquemment vérifiée, mais pas toujours, que le convoyeur fonctionne alors.

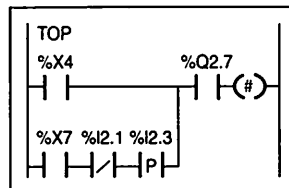


Figure FS 2.28. Extrait du programme « chart » (programmation de la réceptivité associée à la transition entre 10 et 11).

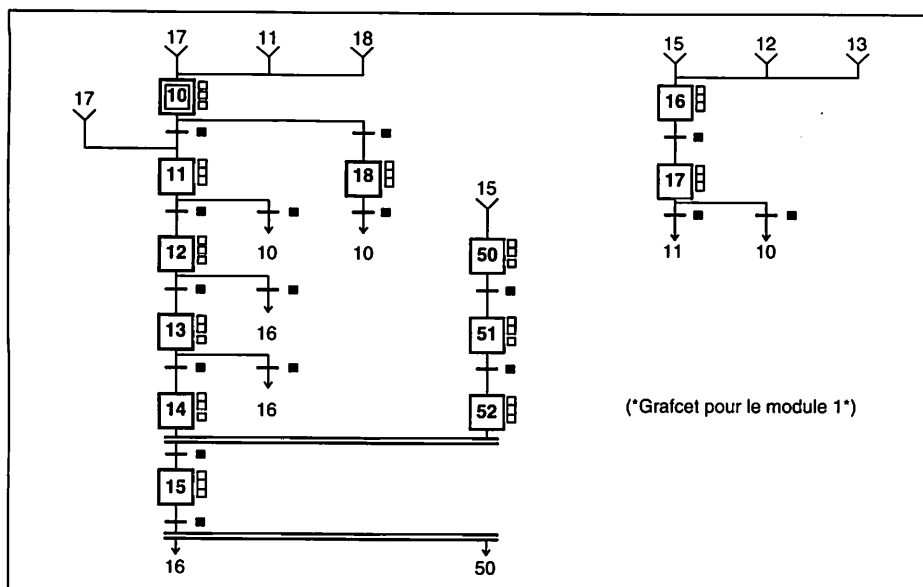


Figure FS 2.29. Extrait du programme « chart ».

● Partie dite « postérieur »

Cette partie traite de l'assignations des sorties et permet l'ajout de conditions supplémentaires. Ainsi on voit sur la figure FS 2.30 que la sortie %Q2.0 (balise verte « en fonctionnement ») est commandée par les étapes 4, 5, 7, 8 du graphe de modes de marches et d'arrêt, à la condition de ne pas être en étape 30 (grafcet du module 2 : défaut de capsule) et que la variable %M4 soit absente (pas de défaut).

Noter qu'il s'agit d'une interprétation du programmeur, qui ne figure pas explicitement dans les modèles de comportements. Ces procédures sont à utiliser avec précautions. Acceptables dans des cas simples, elles peuvent notablement compliquer l'appréciation du comportement du fait du caractère non univoque des écritures trop dépendantes des habitudes de chacun.

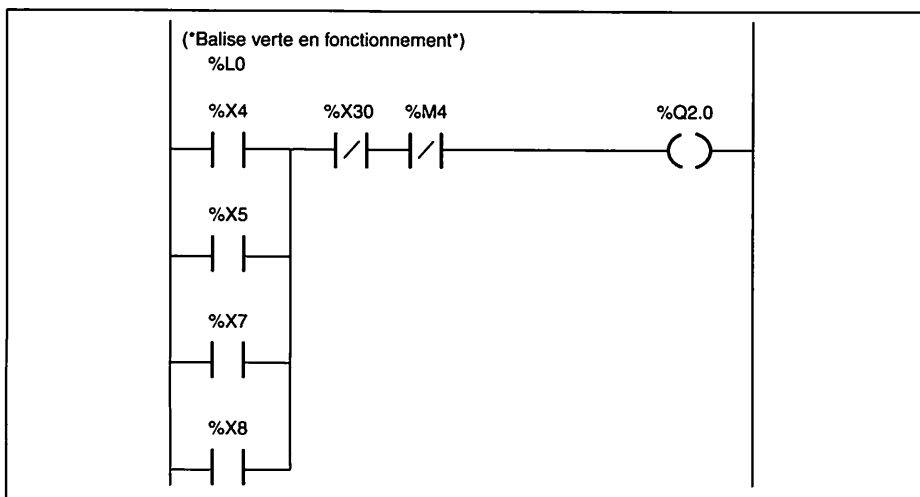


Figure FS 2.30. Extrait du programme « postérieur » (MAST-POST).