



**TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **S7241 V1**

Date de publication :
10 juin 2007

GRAFCET - Structuration des descriptions. Applications

Cet article est issu de : **Automatique - Robotique | Automatique et ingénierie système**

par **Jean-Jacques DUMÉRY**

Résumé La structuration du langage de spécification GRAFCET, assistée ou non par des méthodologies adaptées, peut utiliser des macro-étapes, réaliser une partition en grafcets partiels ou intégrer des notions de hiérarchie par forçage de situation ou encore utiliser des étapes encapsulantes. Les approches de conception se font souvent par points de vue successifs, permettant de retenir les trois objectifs de modélisation du comportement couramment employés. Quelques applications sont proposées comme la gestion d'un approvisionnement de mélangeur et le séchage de fil teint et bobiné.

Abstract The structuring of the GRAFCET specification language, whether assisted or not by adapted methodologies, may use macro-steps, create a partial GRAFCET partition or integrate hierarchy concepts by situation clamping, or use encapsulating steps. Design approaches are often made by successive points of view, making it possible to retain the three objectives of behavior modeling currently employed. A few applications are proposed, such as for controlling a mixer feeder and drying dyed and wound yarn.

Pour toute question :
Service Relation clientèle
Techniques de l'Ingénieur
Immeuble Pleyad 1
39, boulevard Ornano
93288 Saint-Denis Cedex

Par mail :
infos.clients@teching.com
Par téléphone :
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **18/07/2022**

Pour le compte : **7200082629 - cesi // hery ANDRIANKAJA // 195.25.86.152**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

GRAFCET

Structuration des descriptions. Applications

par Jean-Jacques DUMÉRY
Docteur de l'École Centrale Paris

1.	Structuration des descriptions par niveaux de description	S 7 241 - 2
1.1	Utilisation de macro-étapes.....	— 2
1.2	Partition d'un grafcet en graflets connexes et partiels	— 3
1.3	Structuration par forçage de situation d'un grafcet partiel.....	— 5
1.3.1	Représentation graphique	— 5
1.3.2	Forçage et règles d'évolution	— 5
1.4	Utilisation d'étapes encapsulantes	— 5
2.	Descriptions par points de vue.....	— 6
2.1	Commande du procédé.....	— 6
2.2	Commande des organes.....	— 6
2.3	Commande programmée.....	— 7
2.4	Niveaux de décision	— 7
3.	Applications	— 7
3.1	Gestion d'un approvisionnement de mélangeur	— 7
3.2	Séchage de fil teint et bobiné	— 9
3.3	Cellule robotisée de soudage	— 11
3.4	Transfert de palettes dans l'industrie automobile	— 13
	Références bibliographiques	— 16

L'étude du langage de spécification GRAFCET pour diagrammes fonctionnels en séquence fait l'objet de deux dossiers. Le lecteur doit donc consulter également le fascicule [S 7 240] qui complète le présent dossier.

1. Structuration des descriptions par niveaux de description

L'un des avantages principaux de la révision de la norme CEI 60848 [1] est de disposer de moyens pour structurer la spécification. Cette structuration, assistée ou non par des méthodologies adaptées, peut se limiter à une partition du grafcet ou utiliser des macro-étapes, intégrer des notions de hiérarchie par forçage ou encore utiliser l'encapsulation.

Certaines de ces notions (macro-étape et forçage), apparaissant dans diverses publications, étaient utilisées par la communauté mais elles n'étaient pas normalisées.

Les représentations de type macro-étapes, partition de grafcet et étapes encapsulantes ont pour avantages :

- d'obtenir des représentations homogènes du comportement facilement concevables ou analysables ;
- de pouvoir décomposer la description globale en un ensemble de documents fonctionnels de format réduit (A4 par exemple) ;
- d'expliciter par une approche progressive, la compréhension des différents fonctionnements ;
- de faciliter la mise à jour des documents.

La notion de forçage est plus souvent réservée à l'expression de contraintes liées aux modes de marche et d'arrêt (forçage et figeage de situations par exemple).

1.1 Utilisation de macro-étapes

Pour améliorer leur compréhension, les descriptions élaborées sous forme de grafquets, qui contiennent de nombreuses séquences et étapes, peuvent intégrer avantageusement des macro-étapes qui permettent une **abréviation d'écriture** de grafquets. Il s'agit d'exprimer une fonction à remplir sans se soucier de tous les détails superflus de fonctionnement, les détails étant repris dans l'expansion de la macro-étape concernée.

Une **macro-étape** est une représentation unique d'une partie détaillée de grafcet, appelé **expansion de la macro-étape**.

La macro-étape ne possède pas toutes les propriétés des autres types d'étapes, car seule l'étape de sortie de son expansion valide ses transitions aval.

L'expansion d'une macro-étape M_i est une partie de grafcet munie d'une étape d'entrée E_i et d'une étape de sortie S_i (i étant le repère de la macro-étape).

L'étape d'entrée E_i devient active lorsque l'une des transitions amont de la macro-étape est franchie. La macro-étape M_i est active lorsque l'une au moins des étapes de son expansion est active.

Dans l'exemple de la figure 1, lorsque la transition (1) est franchie, simultanément l'étape d'entrée $E2$ et la macro-étape $M2$ sont activées. La situation évolue alors dans l'expansion, $M2$ restant active. Lorsque l'étape de sortie $S2$ est activée, la transition (2) devient franchissable. Elle est alors franchie car la réceptivité associée est toujours vraie, $M2$ et $S2$ sont alors désactivées simultanément.

Remarques : l'expansion d'une macro-étape peut comporter une ou plusieurs étapes initiales (figure 2). Il est recommandé que ces étapes initiales ne soient pas l'étape d'entrée ou de sortie.

L'expansion d'une macro-étape peut comporter une ou plusieurs macro-étapes. Pour éviter les incohérences, les repères numériques de ces macro-étapes seront pris dans l'ordre croissant (figure 3).

La figure 4 donne une macroreprésentation d'une application de perçage/taroudage.

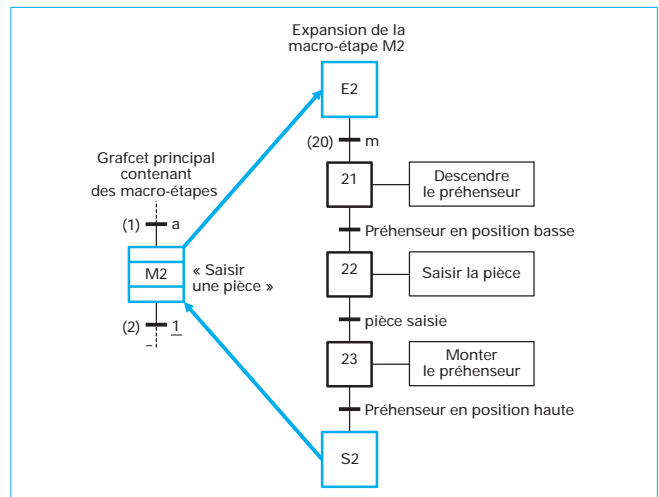


Figure 1 – Exemple d'une macro-étape et de son expansion

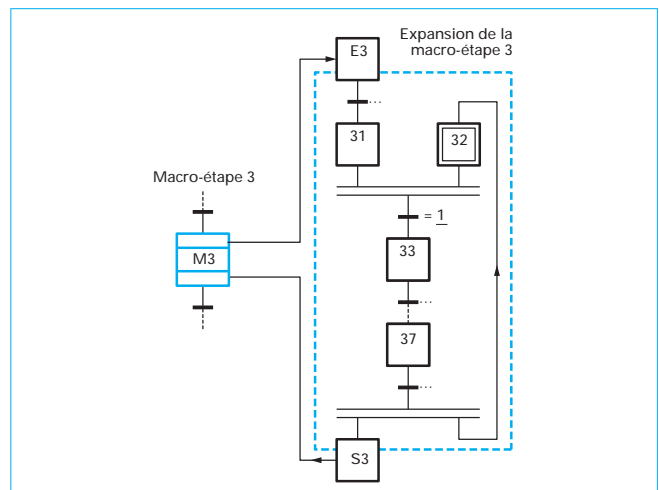


Figure 2 – Représentation d'une macro-étape

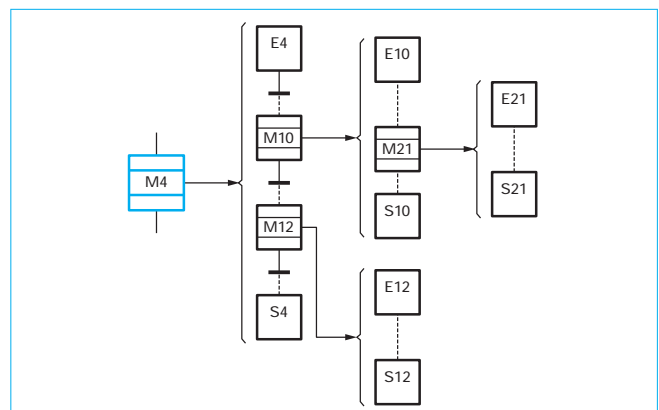


Figure 3 – Niveaux successifs de plusieurs macro-étapes

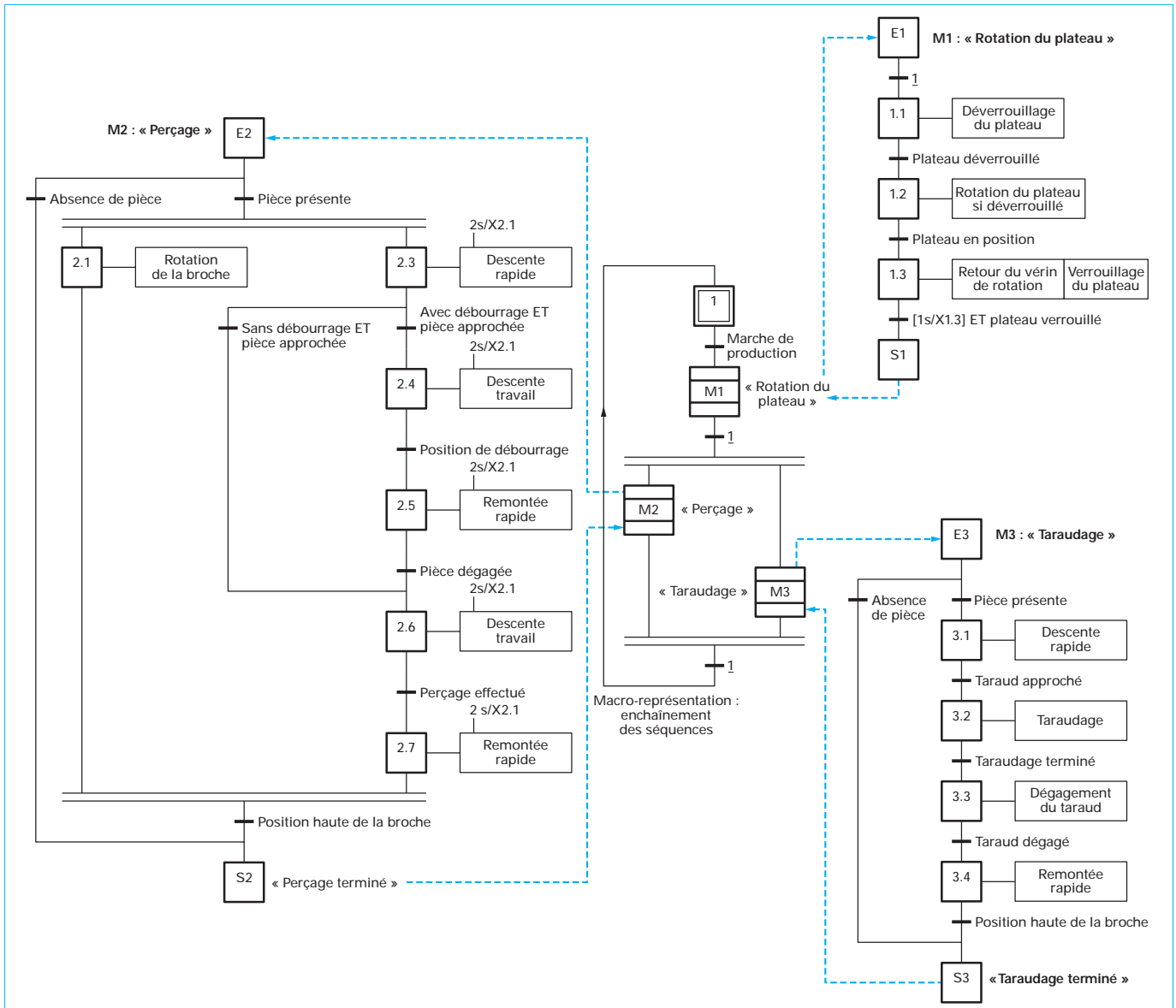


Figure 4 – Macroreprésentation du comportement d'une unité de perçage/taraudage

1.2 Partition d'un grafcet en grafkets connexes et partiels

Dans le cas d'une application complexe, il est très rare de pouvoir décrire l'ensemble du comportement de la partie séquentielle du système de commande à l'aide d'un seul grafcet. Les spécificateurs utilisent souvent une possibilité qui consiste à réaliser une partition du grafcet en grafkets assurant une fonction particulière dans l'automatisme :

- gestion de la sûreté de fonctionnement ;
- surveillance ;
- gestion des modes de marche et d'arrêt ;
- gestion d'interfaces de dialogue homme-machine ;

- coordination de tâches pour optimiser des temps de cycle ;
- gestion de la commande d'une tâche particulière dévolue à un poste ...

Remarque : la méthode utilisée pour réaliser cette partition fait partie du savoir-faire des concepteurs de grafkets. Le langage de spécification GRAFCET décrit uniquement les concepts de grafcet global, de grafcet connexe et de grafcet partiel (encadré 1) nécessaires à la description du résultat de la partition.

Dans le cas où la spécification des modes de marche et d'arrêt a été réalisée à l'aide du GEMMA [3], la partition en grafkets peut s'appuyer sur celui-ci.

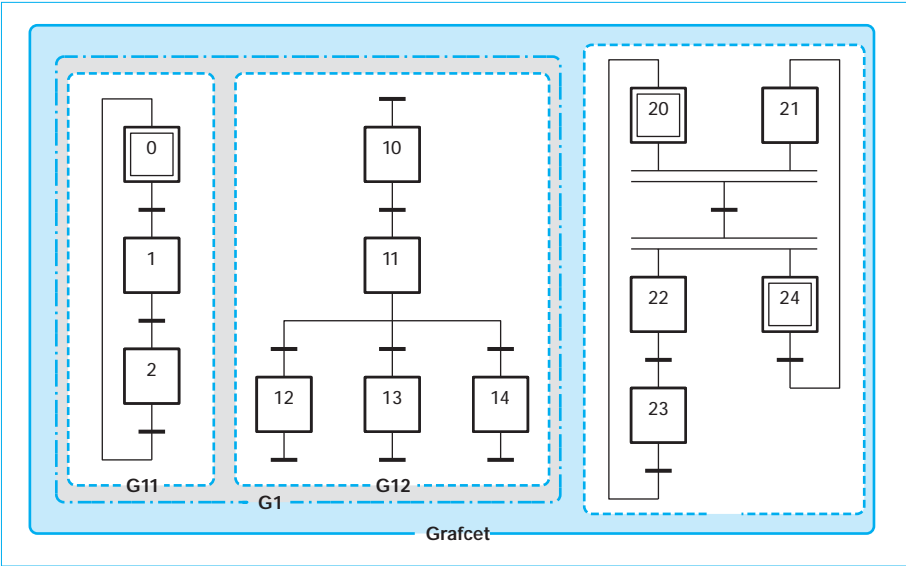


Figure 5 – Exemple de partition d'un grafcet global

Encadré 1 – Définition des différents concepts de grafquets

- **Grafcet connexe** : un grafcet connexe est une structure de grafcet telle qu'il existe toujours une suite de liens (alternance d'étapes et de transitions) entre deux éléments quelconques, étape ou transition, de ce grafcet.
- **Grafcet partiel** : constitué d'un ou plusieurs grafquets connexes, un grafcet partiel résulte d'une partition, selon des critères méthodologiques, du grafcet global décrivant le comportement de la partie séquentielle d'un système.
- **Grafcet global** : le grafcet global est l'ensemble des grafquets décrivant le comportement du système isolé.

L'exemple de la figure 5 (où seule la partie structure a été représentée) illustre une partition d'un grafcet global en deux grafquets partiels G1 et G2, le grafcet partiel G1 étant lui-même partitionné en deux grafquets connexes G11 et G12.

Une partition du grafcet global étant réalisée, il est possible de coordonner les différents grafquets par l'intermédiaire de variables logiques d'étape.

Dans l'exemple de la figure 6, il s'agit de lancer simultanément le cycle de deux chariots grâce à une action sur un bouton poussoir m, les deux chariots étant en position initiale (a1 = a2 = 1). Chaque chariot réalise un aller à sa propre vitesse. L'autorisation de retour est donnée respectivement par b1 et b2.

Une partition en un grafcet permettant la coordination des tâches de chaque chariot et en deux grafquets caractérisant le fonctionnement respectivement du chariot 1 et du chariot 2.

La situation initiale est {100, 10, 20}. Les conditions de départ de cycle (m.a1.a2) étant remplie, le grafcet de coordination évolue et l'étape 101 est activée (l'étape 100 est désactivée). Dans les deux grafquets de tâche, les étapes 11 et 21 sont activées simultanément (les étapes 10 et 20 sont désactivées). La nouvelle situation du grafcet global sera donc {101, 11, 21}. Les étapes 13FIN et 23FIN ont été créées pour informer le grafcet de coordination de la fin de chacune des tâches. La réceptivité /X101 (qui sera vraie dès que l'étape 101 sera désactivée) permet à chaque tâche de revenir en situation initiale après que le grafcet de coordination soit revenu à l'étape 100.

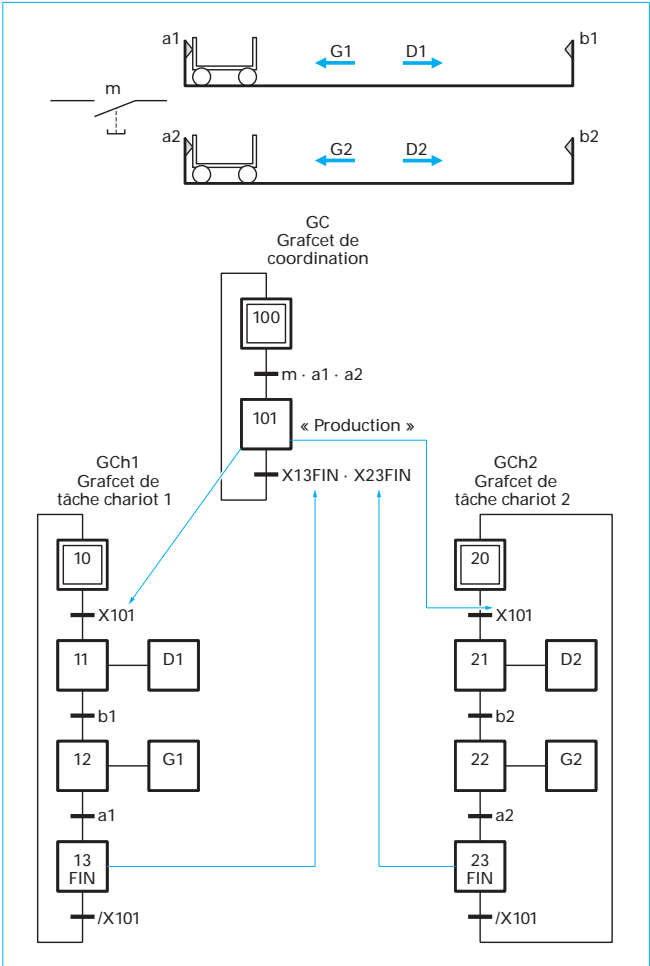


Figure 6 – Exemple d'une partition en grafquets coordonnés

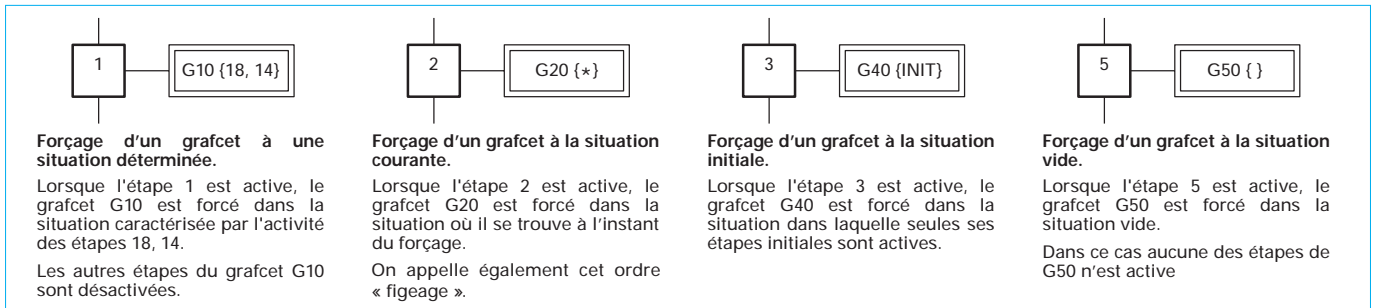


Figure 7 – Les ordres de forçage

1.3 Structuration par forçage de situation d'un grafcet partiel

Il est possible de structurer la spécification de la partie séquentielle d'un système par les modes de marche et d'arrêt et dans ce cas les ordres de forçage peuvent être utiles. Ces ordres permettent d'imposer une situation spécifique à un grafcet donné, à partir de la situation d'un autre grafcet. Associé à l'activité d'une étape d'un grafcet hiérarchiquement supérieur (par exemple : un grafcet de surveillance qui, dans une situation donnée, impose une situation à un grafcet de conduite), l'ordre de forçage est un ordre interne qui permet d'imposer une situation à un grafcet hiérarchiquement inférieur.

Les évolutions des grafquets se font d'une situation à une autre en suivant des liaisons orientées et par application des règles d'évolution. Les ordres de forçage et de figeage permettent d'imposer un changement de situation à un grafcet partiel qu'il aurait été difficile de décrire par des liaisons.

1.3.1 Représentation graphique

Pour le différencier d'une sortie (externe), l'ordre de forçage (interne) est représenté dans un double rectangle associé à l'étape pour le différencier d'une action (figure 7).

1.3.2 Forçage et règles d'évolution

La notion de hiérarchie propre à l'ordre de forçage lui donne un caractère prioritaire par rapport aux règles d'évolution.

Cela peut se traduire par les règles suivantes.

Règle F1 : le forçage est un ordre interne dont l'exécution est prioritaire sur l'application des règles d'évolution.

Règle F2 : le grafcet forcé ne peut pas évoluer tant que dure l'ordre de forçage, on dit alors que le grafcet est figé.

Remarques : l'utilisation des ordres de forçage dans une spécification implique une structuration hiérarchique en grafquets partiels telle que, tout grafcet partiel forçant soit de niveau hiérarchique supérieur à celui de tous les grafquets partiels forcés.

La cohérence de la hiérarchie impose donc qu'aucune application d'un ordre de forçage ne soit possible d'un grafcet vers un grafcet de niveau hiérarchique supérieur.

Le grafcet de la figure 8 permet la gestion d'un défaut dans l'installation présentée à la figure 6. La détection d'un défaut par la partie commande provoque l'évolution vers la situation {201} dans ce grafcet partiel. Les ordres de forçage associés permettent alors le figeage des grafquets de tâche des chariots 1 et 2 dans la situation en cours (le grafcet de coordination GC est par voie de conséquence également figé). En cas de disparition du défaut et de validation par un utilisateur, le cycle peut reprendre à partir de la situation figée.

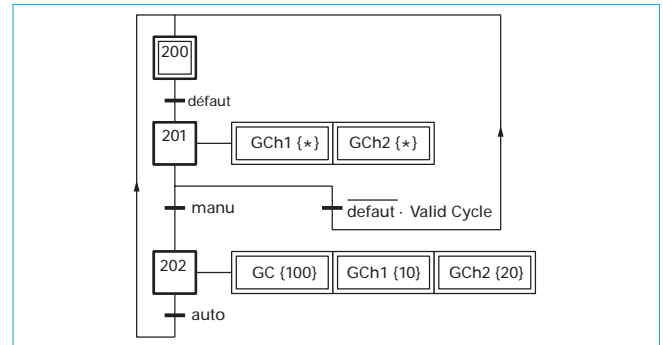


Figure 8 – Grafcet utilisant des ordres de forçage des grafquets de la figure 6

Il est important de noter que le figeage de la situation en cours n'interdit pas les actions continues associées aux étapes restant actives de se dérouler. Le spécificateur doit donc prendre des dispositions aux niveaux des sorties si cela est nécessaire.

Le passage en mode manuel (manu) provoque le forçage de la situation initiale des trois grafquets GC, GCh1 et GCh2 et donc le retour à la situation {100, 10, 20}. Aucune évolution ne sera possible dans ces trois grafquets tant que l'utilisateur n'aura pas sélectionné le mode automatique (auto).

Remarques : si les grafquets forcés sont représentés séparément dans la documentation du ou des grafquets qui les forcent, rien ne permet de le savoir, sauf annotation du spécificateur. Une vérification de cohérence s'avère nécessaire dans le cas où plusieurs grafquets partiels forcent d'autres grafquets partiels.

1.4 Utilisation d'étapes encapsulantes

Le concept d'étape encapsulante permet de structurer hiérarchiquement une description réalisée avec le langage GRAFCET. Il y a encapsulation d'un ensemble d'étapes, dites encapsulées, par une étape, dite encapsulante, si et seulement si lorsque cette étape encapsulante est active, l'une, au moins des étapes encapsulées est active.

L'étape encapsulante caractérise le résultat d'une structuration fonctionnelle et un comportement invariant à un niveau d'abstraction donné (par exemple le système est en mode production). Une étape encapsulante décrit, à un niveau d'abstraction donné et de façon agrégée, les comportements composés du niveau d'abstraction inférieur (par exemple les comportements détaillés de l'installation en mode production).

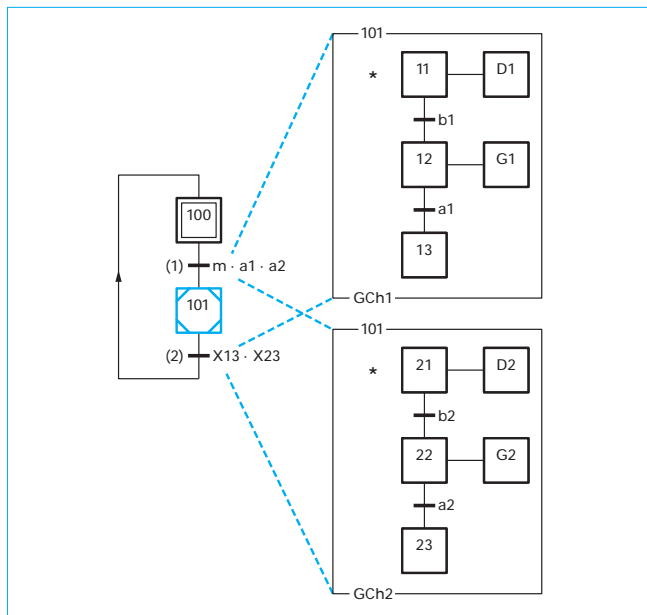


Figure 9 – Exemple de structuration par encapsulation

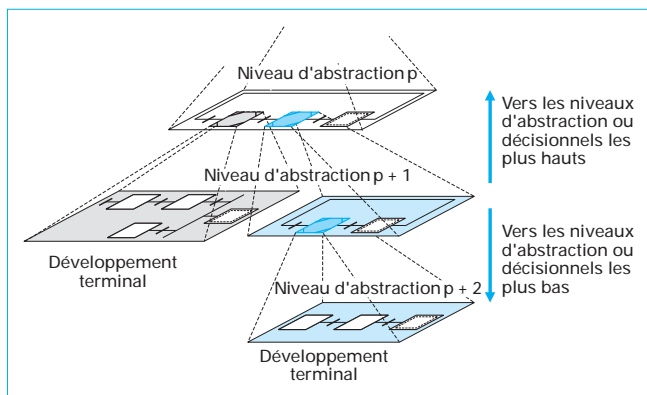


Figure 10 – Illustration de la hiérarchie d'encapsulation

Le symbole associé à une étape encapsulante se distingue du symbole étape par quatre traits obliques placés aux différents angles du carré ou du rectangle. Cette notation indique que cette étape contient d'autres étapes dites encapsulées dans une ou plusieurs encapsulations de cette même étape encapsulante. L'étape encapsulante possède également toutes les propriétés de base de l'étape.

Une étape encapsulante peut donner lieu à une ou plusieurs encapsulations possédant chacune au moins une étape active lorsque l'étape encapsulante est active, et ne possédant aucune étape active lorsque l'étape encapsulante est inactive.

Dans l'exemple de la figure 9, l'étape encapsulante 101 possède deux encapsulations GCh1 et GCh2. Après franchissement de la transition (1) l'étape encapsulante 101 est activée et les étapes marquées du symbole * appartenant à ses encapsulations sont activées. Les situations respectives des deux grafjets GCh1 et GCh2 évoluent alors librement, l'étape 101 restant active. Lorsque les étapes 13 et 23 deviennent simultanément actives, la transition (2) est franchie (la réceptivité X13.X23 devenant vraie) et l'ensemble des étapes des encapsulations de 101 sont désactivées. Les deux grafjets GCh1 et GCh2 sont donc positionnés dans la situation vide.

Cet exemple fait apparaître deux niveaux hiérarchiques de description, mais une encapsulation peut elle-même contenir une ou plusieurs étapes encapsulantes. Il est donc possible de structurer la description en 3 ou 4 niveaux de description, rarement plus dans la pratique.

La hiérarchie d'abstraction-encapsulation (figure 10) mise en évidence ci-dessus est récursive à deux niveaux : un niveau englobant p et un niveau englobé p+1.

Le niveau englobé p+1 peut être lui-même un niveau englobant pour p+2 et ainsi de suite. La récursion s'arrête lorsque le niveau englobé ne contient plus d'étape encapsulante.

Remarque : il est possible d'utiliser une étape encapsulante initiale, dans ce cas, l'une au moins des étapes encapsulées dans chacune de ses encapsulations doit être également une étape initiale.

2. Descriptions par points de vue

Au cours des différentes étapes du cycle de vie de développement d'un système automatique, de la conception générale à la réalisation, l'approche de conception de la commande est progressive et elle se fait de plus en plus en concertation avec tous les acteurs (exploitants, mainteneurs...). On parle souvent d'approche par points de vue successifs. La définition des solutions utilisées pour la partie opérative est menée parallèlement.

Ainsi, la frontière de description du comportement de la commande à décrire évolue et les entrées-sorties considérées sont caractérisées différemment selon la frontière concernée. Le point de vue dominant est celui du concepteur de la commande, même s'il est amené à intégrer d'autres points de vue dans son travail (conducteurs, régulateurs, mainteneurs, responsables d'exploitation...). Trois grands objectifs de modélisation du comportement peuvent être identifiés :

- description du comportement de la commande du procédé ;
- description du comportement de la commande d'organes de la partie opérative permettant d'agir sur le produit ou d'informer l'utilisateur ;
- description des informations et des ordres codés, élaborés par la commande programmée.

2.1 Commande du procédé

Étape du cycle de vie de développement : la conception générale.

Point de vue dominant : du concepteur de la commande.

Objectif de modélisation : décrire le comportement de la commande du procédé.

Il s'agit de décrire la gamme d'opérations permettant d'obtenir la valeur ajoutée, à partir d'informations sur l'état du produit et des opérations. Aucun effecteur, actionneur ou capteur n'est supposé connu, seule de grandes solutions techniques sont envisagées. Ce travail d'analyse s'effectue au stade de la conception générale, ou lors de la description d'un système existant pour décrire le processus général d'obtention du produit.

2.2 Commande des organes

Étapes du cycle de vie de développement : la conception générale et détaillée.

Point de vue dominant : du concepteur de la commande.

Objectif de modélisation : décrire le comportement de la commande d'organes.

Il s'agit par exemple de mouvements des effecteurs, de mouvements des actionneurs et des préactionneurs de la partie opérative permettant d'agir sur le produit ou d'informer l'opérateur (signalisation visuelle ou sonore destinée aux utilisateurs).

Selon les choix techniques effectués sur la partie opérative, on peut distinguer parfois trois niveaux de finesse dans cette analyse, même s'ils ne font pas tous l'objet d'élaboration de grafce :

- commande des mouvements des « effecteurs » : les effets successifs attendus sur le produit et la partie opérative (convoiement palettes...) sont décrits à partir d'informations sur l'état du produit et des effecteurs (palette en butée...). L'architecture générale de la partie opérative et les effecteurs sont connus, mais aucun actionneur ou capteur n'est supposé connu ;

- commande des mouvements des « actionneurs » : les comportements attendus des actionneurs (les actions : montée tige vérin, rotation moteur sens + ...) sont décrits à partir des informations logiques fournies par les capteurs et le pupitre. Les préactionneurs ne sont pas précisés, aucun élément technique n'est connu sur la partie commande ;

- commande des « préactionneurs » : les comportements successifs des préactionneurs (électrovannes, contacteurs...), donc des actionneurs. À ce moment, la partie opérative est entièrement connue.

2.3 Commande programmée

Étape du cycle de vie : la réalisation.

Point de vue dominant : du programmeur.

Objectif de modélisation : spécification programmée ou (et) de la commande.

Dans la grande majorité des applications, les programmeurs d'automates programmables industriels utilisent des ateliers logiciels conformes à la norme CEI 61131-3 [2] pour traduire la spécification grafce en langage SFC. Il n'existe actuellement aucune possibilité de conversion automatique en programme s'appuyant sur le SFC.

Pour les autres applications, le programmeur traduit le grafce global en un ensemble d'équations logiques ou d'expressions littérales permettant leur implémentation.

2.4 Niveaux de décision

Il est possible d'élaborer une typologie des entrées selon leur importance ou plutôt leur portée décisionnelle : les entrées « consignes opérateur », telles que l'arrêt d'urgence, la mise en marche ou l'arrêt n'ont pas la même importance dans la hiérarchie décisionnelle de la partie commande qu'une information issue d'un capteur fin de course permettant de passer à l'action suivante dans le cycle de fonctionnement.

La description du comportement d'une commande est très souvent structurée hiérarchiquement en fonction de cette hiérarchie décisionnelle (voir les paragraphes 1 et 3). Les différentes décisions peuvent en effet être classifiées en plusieurs niveaux selon la portée (influence sur les niveaux inférieurs) ou l'importance de l'action déclenchée (par exemple : commande d'une action, commande d'un enchaînement d'action, commande de l'inhibition de l'ensemble des actions, etc.).

Chaque niveau de décision fait appel à un ensemble d'informations mémorisées, élaborées par d'autres niveaux de décision (situations particulières, données de suivi de production...) ou issues directement du système opérant. Cette mise à disposition peut nécessiter un transfert des informations localement ou parfois à longue distance *via* des réseaux.

La hiérarchie décisionnelle la plus couramment rencontrée est la suivante :

- la **surveillance** pour assurer la sécurité des exploitants et la non-détérioration du système automatique ;
- la **conduite** pour gérer le dialogue homme-machine et pouvoir exploiter le système automatique ;
- parfois la coordination pour coordonner les fonctionnements de différentes zones de productions dans les industries manufacturières ;
- et la **commande de base** pour générer les ordres destinés aux actionneurs.

3. Applications

3.1 Gestion d'un approvisionnement de mélangeur

L'exemple proposé (figure 11) est extrait d'une partie d'un système d'approvisionnement d'un mélangeur pour alimenter un four de fabrication de verre à bouteille.

Le cycle de production du système (figure 12) démarre si les deux chariots « A » et « B » sont en référence (soit respectivement

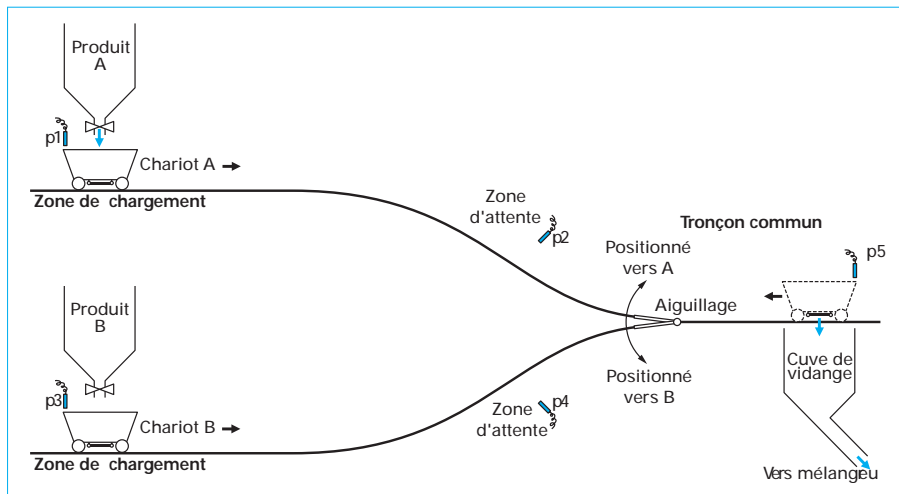


Figure 11 – Système d'approvisionnement d'un mélangeur

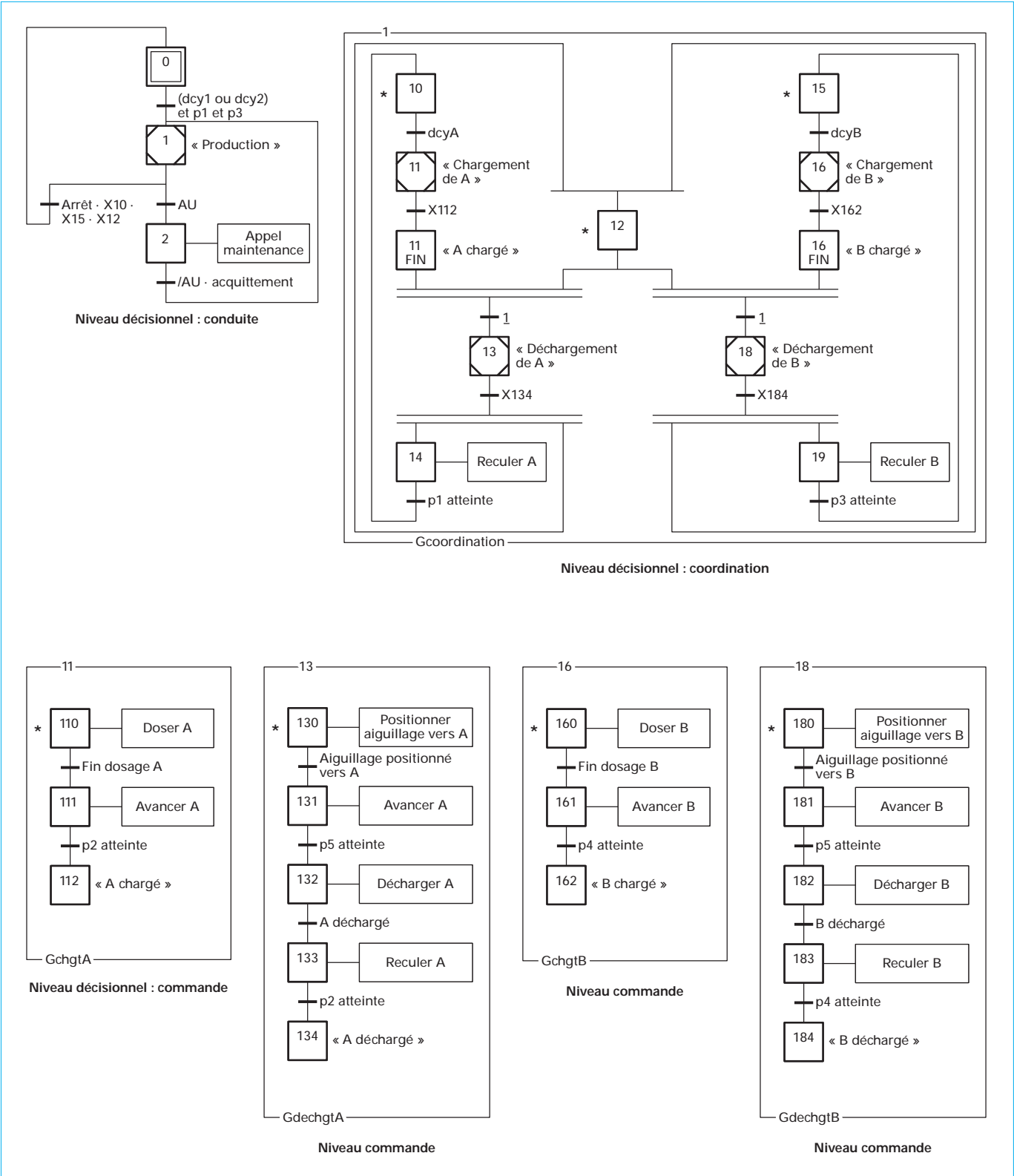


Figure 12 – Grafcet global structuré par encapsulations du système d’approvisionnement d’un mélangeur

à l'arrêt et en position « p1 » et « p3 ») et si un opérateur actionne l'un des deux boutons poussoirs « dcyA » ou « dcyB ». Les cycles de fonctionnement des deux chariots sont alors lancés simultanément dans cette première phase de production.

Le cycle d'un chariot peut être décrit de la manière suivante :

- doser et charger un produit « A » (ou « B ») ;
- avancer le chariot « A » (ou « B ») ;
- si la position d'attente « p2 » (ou « p4 ») est atteinte et que le tronçon commun est déjà occupé alors arrêter et attendre qu'il soit libre, sinon poursuivre le cycle ;
- sur le tronçon commun avancer jusqu'à « p5 » puis décharger le produit ;
- reculer alors jusqu'à « p1 » (ou « p3 ») pour ramener le chariot en référence.

Le cas où les deux chariots parviendraient simultanément en « p2 » et « p4 » n'est pas envisagé.

Lorsque les deux chariots sont revenus en référence, l'opérateur peut utiliser indifféremment l'un des deux chariots ou les deux chariots à la fois. Il s'agit de la deuxième phase de production.

Il est possible d'arrêter le système lorsque les deux chariots sont revenus en position de référence en actionnant un bouton poussoir « arrêt ».

Par ailleurs, une action sur un bouton poussoir « AU » permet un arrêt immédiat du système en vue d'assurer la sécurité. Quelle que soit la situation en cours, tous les états actifs dans les développements sont alors désactivés. Après avoir actionné le bouton poussoir « acquittement », la deuxième phase de production peut reprendre.

3.2 Séchage de fil teint et bobiné

Le support présenté est un système de séchage de bobines de fils de différentes matières textiles dans une usine de fabrication de fil (notamment coton et acrylique). La fabrication du fil à partir de balles de coton nécessite l'utilisation de nombreux procédés, notamment : nettoyage, cardage, peignage, étirage, bobinage, teinture et séchage.

La teinture est un procédé chimique permettant de fixer les molécules de colorant sur la fibre coton ou synthétique pour obtenir le coloris désiré. Les bobines de fils sont teintées dans des autoclaves de teinture, cette phase d'une durée de deux à douze heures étant suivie d'un séchage.

Le type de séchoir utilisé (figure 13) est dit séchoir à chaleur indirecte. En effet, un échangeur air-vapeur permet à un flux de vapeur à 125 °C de céder une quantité de chaleur à l'air en circulation dans le séchoir. La vapeur n'est donc pas en contact direct avec la matière textile. L'air ainsi réchauffé, mis en circulation permanente grâce à un ventilateur, permet d'évaporer l'eau contenue dans la matière textile. L'air humide en sortie de cuve est envoyé dans un échangeur air-eau à nid-d'abeilles pour être refroidi (condenseur). Les performances du séchoir se caractérisent par le volume d'eau par unité de temps ainsi condensée.

L'ensemble des bobines de fil sont considérées sèches lorsque la différence entre la température d'entrée d'air dans la cuve de séchage et la température de l'air en sortie de cuve devient inférieure à un seuil fixé en général à 4 °C.

Le séchoir utilisé fonctionne sous une pression de référence de 5 bar, sa capacité maximale est de 540 bobines d'une masse unitaire de 850 g.

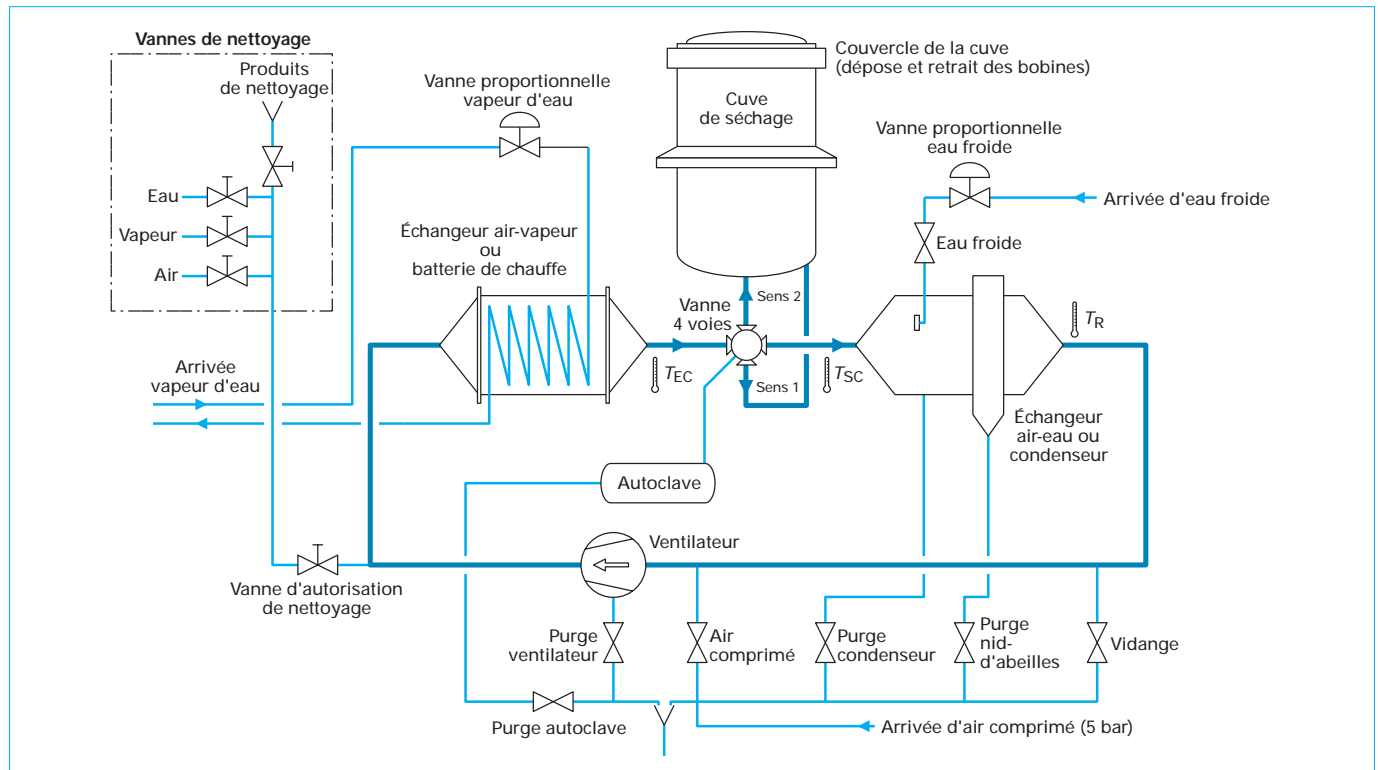


Figure 13 – Système de séchage de bobines de fils

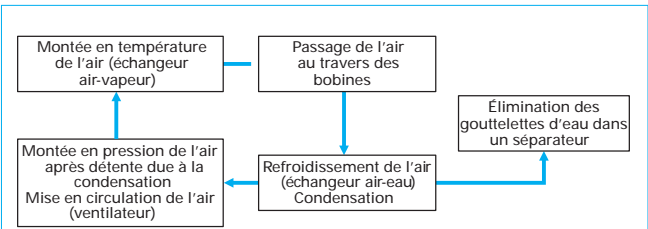


Figure 14 – Cycle en plusieurs phases

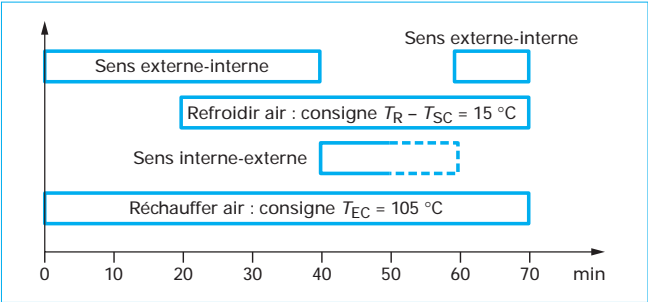


Figure 15 – Programme du coton teint pour une durée moyenne de séchage

Le séchage s’effectue en plusieurs phases (figure 14) :

- **phase d’extraction** : de l’air comprimé (5 bar), mis en circulation grâce au ventilateur, est envoyé dans la cuve par l’intermédiaire de la vanne 4 voies (figure 13) dans le sens 1 extérieur-intérieur. Ce flux d’air permet d’évacuer mécaniquement 10 à 20 % de l’eau contenue dans les bobines ;
- **phase de séchage** : durant cette phase, l’air mis en circulation grâce au ventilateur circule en permanence dans le sens 2 intérieur-extérieur par l’intermédiaire de la vanne 4 voies.

Pour chaque type de textile séché, il existe un programme d’extraction-séchage (coton teint, coton blanc, coton + acrylique, acrylique, etc.). L’opérateur doit avoir validé le programme (exemple : coton teint) par un bouton poussoir « valid » pour lancer un cycle de séchage. Au début du cycle de séchage (date 0 du diagramme de la figure 15), l’air circule à travers les bobines de fil de l’extérieur vers l’intérieur pour faciliter l’extraction mécanique de l’eau.

Le sens de circulation de l’air est alors inversé (intérieur vers l’extérieur) grâce à la vanne 4 voies à commande logique. Alors commence le séchage proprement dit.

Ce séchage (sens interne-externe), dure jusqu’à ce qu’une certaine différence de température entre l’entrée et la sortie de la cuve soit obtenue ($T_{EC} - T_{SC} = 4\text{ °C}$). Ce seuil doit être atteint durant au moins 30 s pour être pris en compte, sinon un temps maximal limite la durée de séchage (25 min dans le cas du coton teint). Si ce même seuil est atteint rapidement, le séchage sera maintenu durant au moins 15 min.

T_{EC} : température à l’entrée de la cuve de séchage.
 T_{SC} : température à la sortie de la cuve de séchage.
 T_R : température à la sortie du refroidisseur - condenseur.
 $XF1_S$: variable logique associée à une étape d’un grafcet de conduite en phase de séchage GCS (figure 16).

On remarquera que le grafcet partiel GF1_S proposé (figure 17) est composé de deux grafcets connexes. L’un d’entre eux permet l’élaboration de la condition « seuil atteint durant au moins 30 s ».

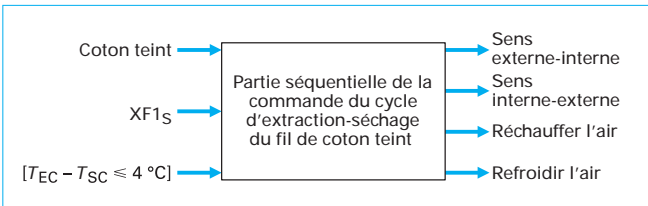


Figure 16 – Entrées-sorties logiques de la partie séquentielle de la commande du cycle d’extraction-séchage

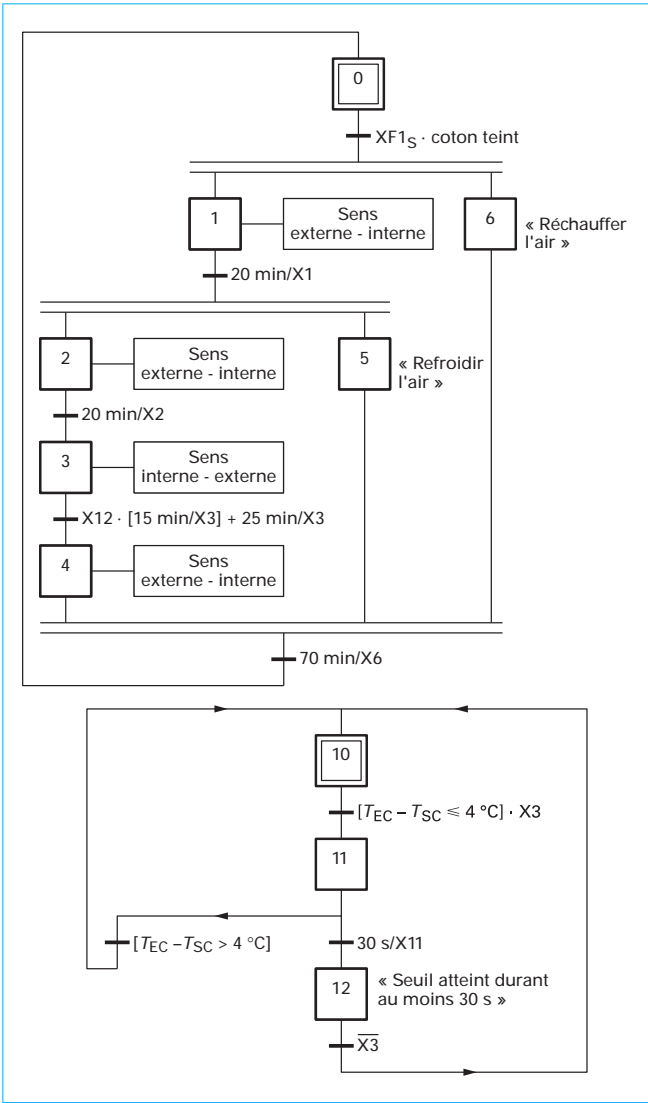


Figure 17 – Cycle d’extraction-séchage du fil de coton teint : grafcet partiel GF1_S

Durant les phases de séchage, des résidus de matière textile s’accumulent dans le séchoir, causant ainsi un encrassement et réduisant le débit du réchauffeur (échangeur air-vapeur) ainsi que du condenseur (échangeur air-eau). Pour dissoudre les résidus, une phase de nettoyage est nécessaire après environ cent cycles

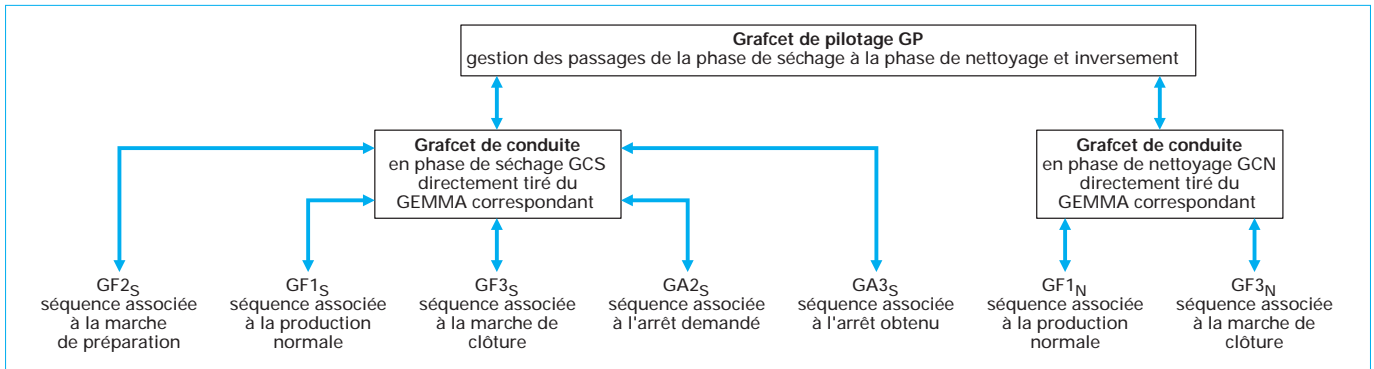


Figure 18 – Structure fonctionnelle de la commande retenue

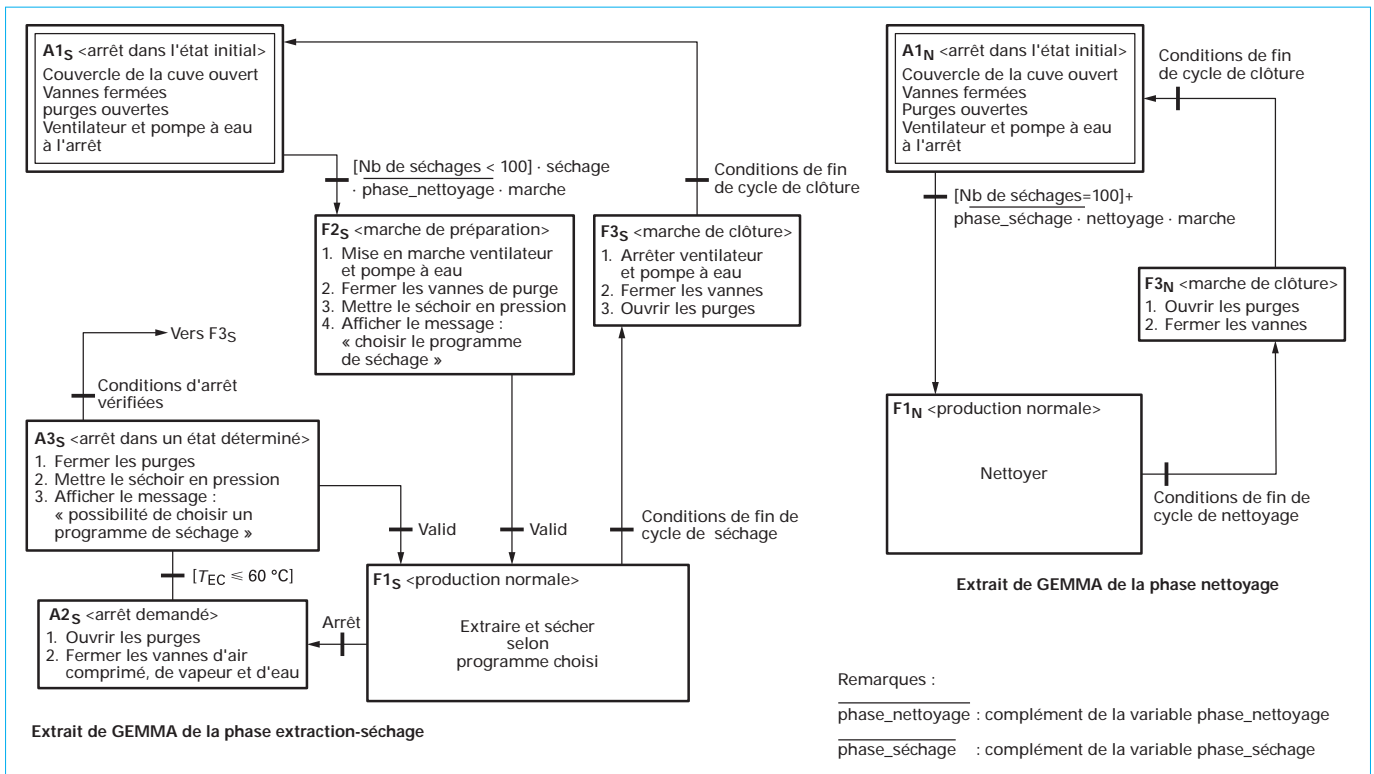


Figure 19 – Extraits du GEMMA [3] (Guide d'étude des modes de marche et d'arrêt) de l'installation

d'extraction-séchage. Cette phase de nettoyage peut également être réalisée sous certaines conditions à la demande de l'opérateur.

La structure du modèle de commande de la figure 18 a été utilisée.

Les grafcecs GCS et GCN sont construits à l'aide des deux extraits de GEMMA [3] (figure 19). Le grafcet de pilotage GP est présenté à la figure 20.

3.3 Cellule robotisée de soudage

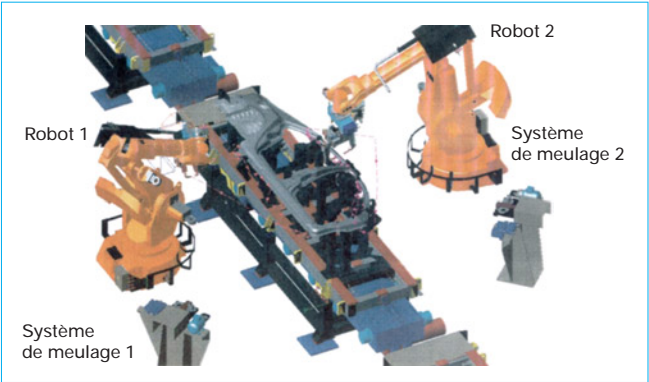
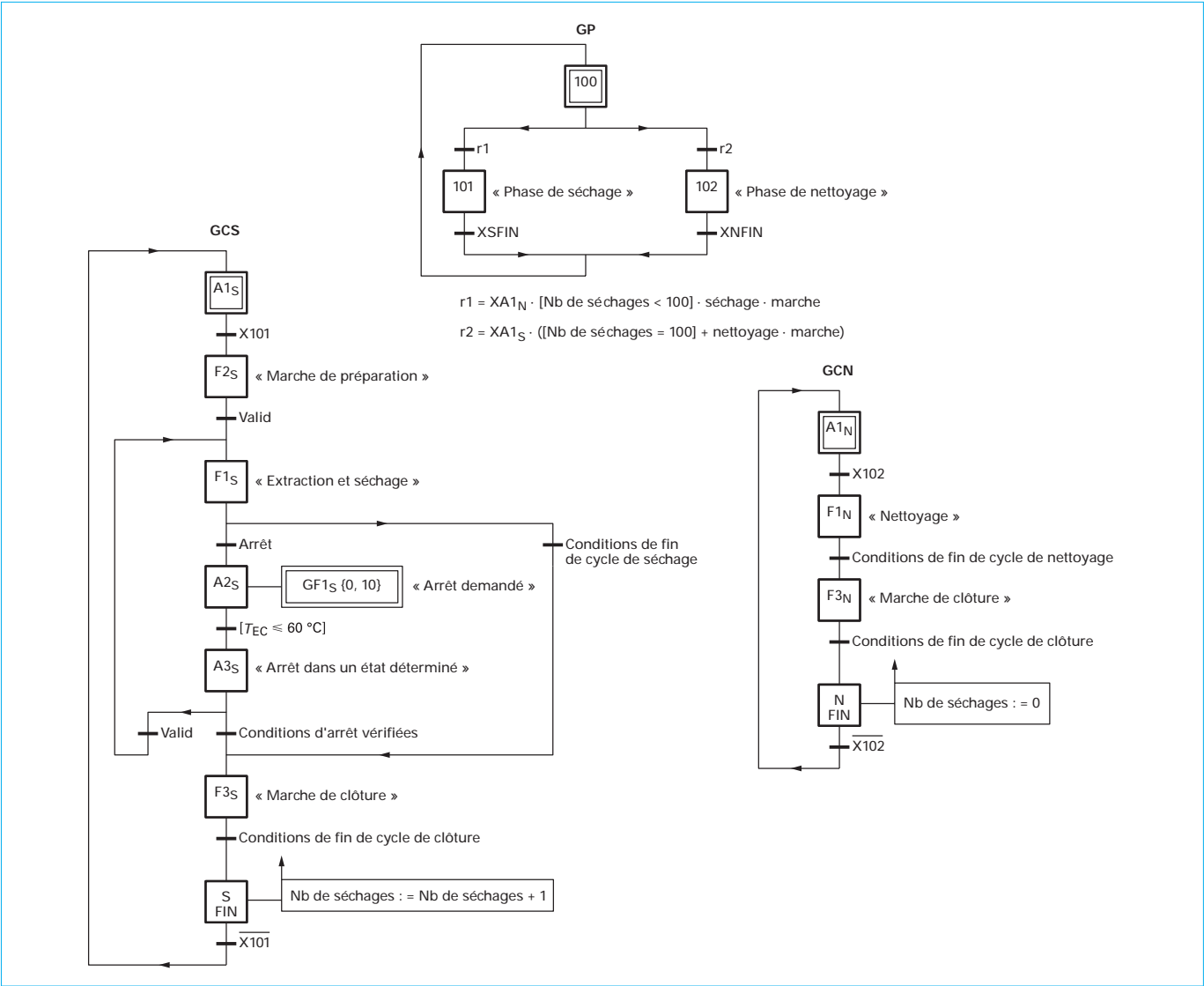
Le système considéré est une cellule de soudage robotisée dont la fonction est de réaliser le soudage par points de tôles automobiles. Cette cellule est installée sur une chaîne linéaire, le transfert d'une

cellule à l'autre s'effectuant au moyen de tables élévatrices à rouleaux.

La cellule comporte (figure 21) :

- une table élévatrice à rouleaux supportant la pièce à pointer et permettant son transfert ;
- deux robots 6 axes équipés chacun d'une pince de soudage ;
- deux systèmes de rodage et de changement d'électrodes usagées ;
- les armoires de commande et la connectique associée (non représentées).

Les opérations étant achevées sur toutes les cellules, les transferts des pièces d'une cellule à la suivante s'effectuent alors simultanément. Les durées des opérations sur les différentes cellules



sont optimisées, la cellule la plus lente imposant son rythme à l'ensemble de la chaîne.

La structure de la commande retenue pour gérer la ligne de production étudiée est la suivante :

- une partie commande locale par cellule, gérant les cycles de soudage par points ainsi que les rodages et les changements d'électrodes ;
- une partie commande de niveau décisionnel supérieur, donnant une autorisation de fonctionnement à chaque cellule après avoir fourni l'information de fin de transferts simultanés et recevant le compte-rendu de la partie commande locale « cellule prête ».

Le cycle de fonctionnement de la cellule est détaillé dans l'encadré 2.

Le grafcet de coordination des tâches de la cellule est donné par la figure 22.

Encadré 2 – Cycle de fonctionnement de la cellule

Les phases principales du cycle de fonctionnement de la cellule sont les suivantes.

■ Transferts simultanés

Toutes les tables élévatoires de la ligne sont pilotées simultanément, provoquant les transferts des pièces de la cellule précédente à la cellule suivante. Lors de la descente des tables élévatoires, les pièces se calent précisément en s'indexant par gravité sur des systèmes à cônes. Les transferts effectués et les pièces en position sur leur support dans chaque cellule, les cycles de pointage peuvent commencer (l'information « autorisation de fonctionnement » provenant de la partie commande de niveau supérieur est indispensable pour le départ des cycles). Durant la phase de transferts simultanés les robots sont en position de référence.

■ Cycle de soudage par points

Les deux robots, partant de leur position de référence, effectuent chacun leur cycle de manière indépendante, les trajectoires étant disjointes. Le robot 1 (à gauche sur la figure 21) effectue 9 points de soudure et le robot 2 (à droite sur la figure 21) en effectue 6. Lorsque toutes les cellules ont achevé leur cycle, les transferts simultanés peuvent avoir lieu.

■ Rodage des électrodes

Les phénomènes électriques et physico-chimiques au contact de la pièce provoquent une détérioration rapide de l'état de la surface des électrodes qui entraîne une diminution de la qualité de la soudure. Pour restaurer la surface en bout d'électrode, on procède à un rodage, chaque rodage enlevant environ 0,5 mm de matière sur l'électrode. La procédure de rodage est lancée automatiquement au bout de 90 points de soudure.

Sa description simplifiée est la suivante :

- déplacement de la pince du robot vers une meule (système de meulage 1 ou 2 suivant robot) ;
 - meulages successifs des deux électrodes (points de passage P1 et P2) ;
 - retour du robot en position de référence (point Pref).
- Après chaque rodage, il est nécessaire d'effectuer une prise d'origine des pinces, la longueur des électrodes ayant été modifiée.

La position des électrodes est mesurée par un resolver monté sur l'arbre du moteur de la pince. Ce capteur ne fournit une information absolue que sur un tour du moteur qui correspond à un petit déplacement des électrodes. Un comptage des tours permet de connaître la position des électrodes, mais nécessite une prise d'origine à chaque mise en service ou à chaque modification de longueur des électrodes (par rodage ou changement d'électrodes).

Changement d'électrodes : lorsque une électrode est usée (soit après 10 rodages en tout par électrode) il faut procéder au changement des électrodes. De la même manière que pour le rodage, une procédure de changement d'électrodes est lancée automatiquement. Après chaque changement d'électrodes, il est nécessaire d'effectuer une prise d'origine des pinces.

■ Prise d'origine pince

Le robot étant en position de référence (point Pref), le cycle est le suivant :

- fermeture pince en vitesse lente ;
- montée en effort jusqu'à une valeur Fini ;
- initialisation de la mesure de position ;
- ouverture pince en vitesse rapide.

Deux compteurs ont été utilisés par robot :

- pour le robot 1 : C1 compte les cycles de soudure et C3 compte les rodages successifs ;
- pour le robot 2 : C2 compte les cycles de soudure et C4 compte les rodages successifs.

Les quatre compteurs sont initialisés lors de la première mise en route.

Le robot 1 effectue un rodage tous les 10 cycles et un changement de ses électrodes tous les 100 cycles, tandis que le robot 2 effectue un rodage tous les 15 cycles et un changement de ses électrodes tous les 150 cycles. Ces opérations, qui ne peuvent pas s'effectuer en temps masqué (robots en référence lors des transferts simultanés), allongent la durée de certains cycles : par exemple, pour les 100 premiers cycles, on aura :

- cycles 10, 20, 40, 50, 70 et 80 : rodage des électrodes du robot 1 seul ;
- cycles 15, 45 et 75 : rodage des électrodes du robot 2 seul ;
- cycles 30, 60 et 90 : rodage des électrodes du robot 1 et du robot 2.

Le grafcet proposé utilise le parallélisme interprété (dans certaines conditions, certaines transitions qui suivent immédiatement l'étape initiale peuvent être franchies simultanément). Une autre solution pouvait consister à séparer la commande en deux grafquets distincts, chacun étant chargé de la gestion de chaque robot.

3.4 Transfert de palettes dans l'industrie automobile

La ligne générique d'assemblage présentée, utilisée dans l'industrie automobile, est constituée d'un ensemble de postes totalement

ou partiellement automatisés, reliés par des convoyeurs. Dans la configuration étudiée, les rouleaux des convoyeurs tournent en continu et à la même vitesse.

À l'intérieur de chaque poste, un convoyeur équipé d'un élévateur (système parfois remplacé par un injecteur) permet d'amener une palette dans la zone de travail de la machine d'assemblage puis de l'évacuer de cette zone. La figure 23 illustre le principe de fonctionnement du système mis en œuvre.

Dans le cas d'une ligne d'embellage de moteur, le travail effectué au niveau d'un poste peut consister à réaliser la mise en place du vilebrequin dans le bloc moteur. Les palettes qui supportent les blocs moteurs sont acheminées par un convoyeur à rouleaux vers un dispositif élévateur qui isole l'ensemble {palette, bloc moteur} de la ligne de transfert. Après la mise en position de cet ensemble, le travail d'assemblage dans la machine peut commencer. La trajectoire complexe de dépôt du vilebrequin induit un temps de travail important dans la machine, ainsi le gain de temps ne peut se faire que sur le transfert. La recherche d'une meilleure productivité passe par une gestion efficace des durées des différentes phases de transfert et de travail.

Parmi les convoyeurs utilisés, certains permettent le transfert des palettes dans les machines, d'autres assurent la fonction d'accumulation (zone tampon). Chaque palette entraînée parcourt en moyenne 1 m en 6 s.

La gestion du flux de palettes est basée sur la définition de différentes zones de transfert et de travail (figure 23). Toute palette présente dans l'une des zones ZT_{n-1} , ZA_n , ZP_n ne peut être libérée que si la zone immédiatement suivante n'est pas occupée. Les zones ZA_n , ZP_n et ZE_n sont considérées occupées dans les cas précisés dans le tableau 1.

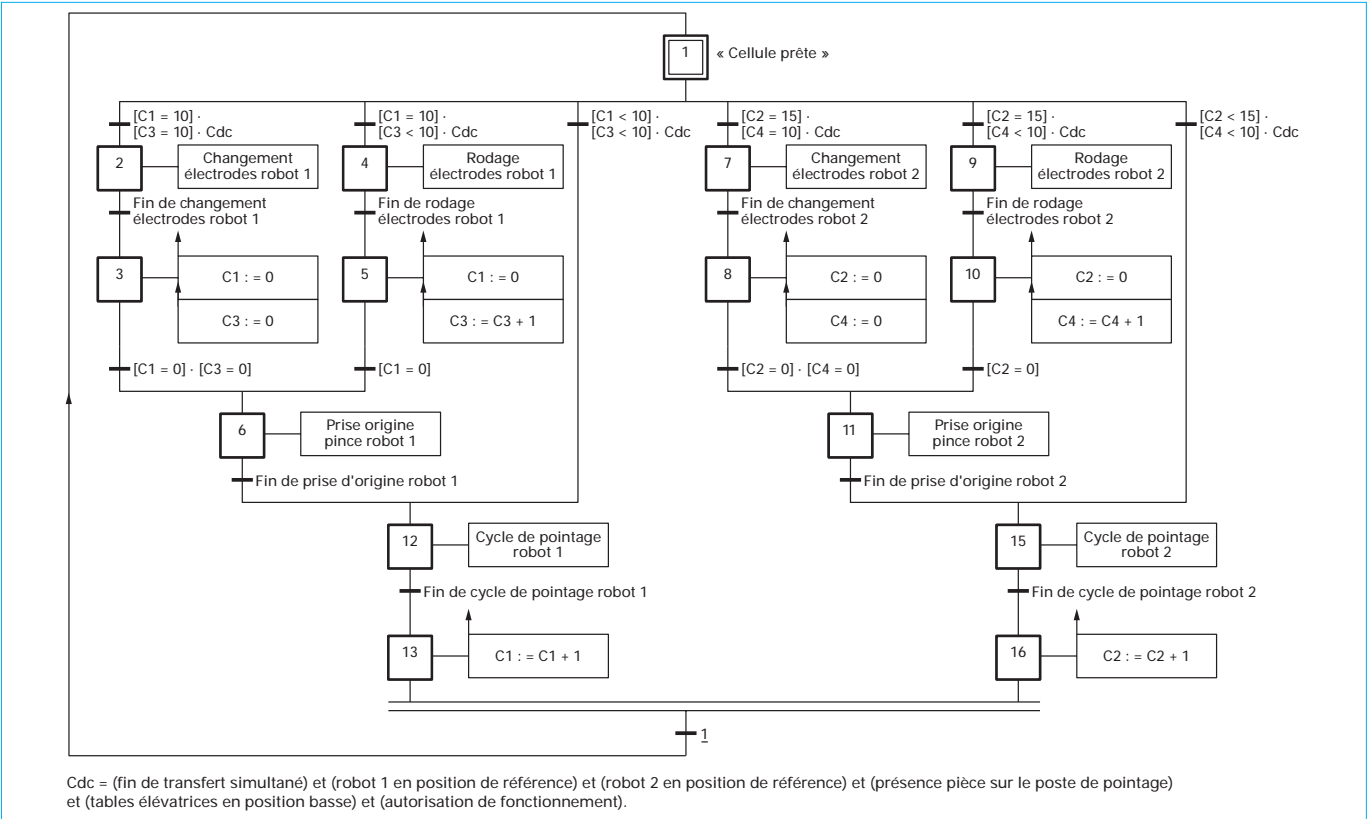


Figure 22 – Grafcet de coordination des tâches de la cellule

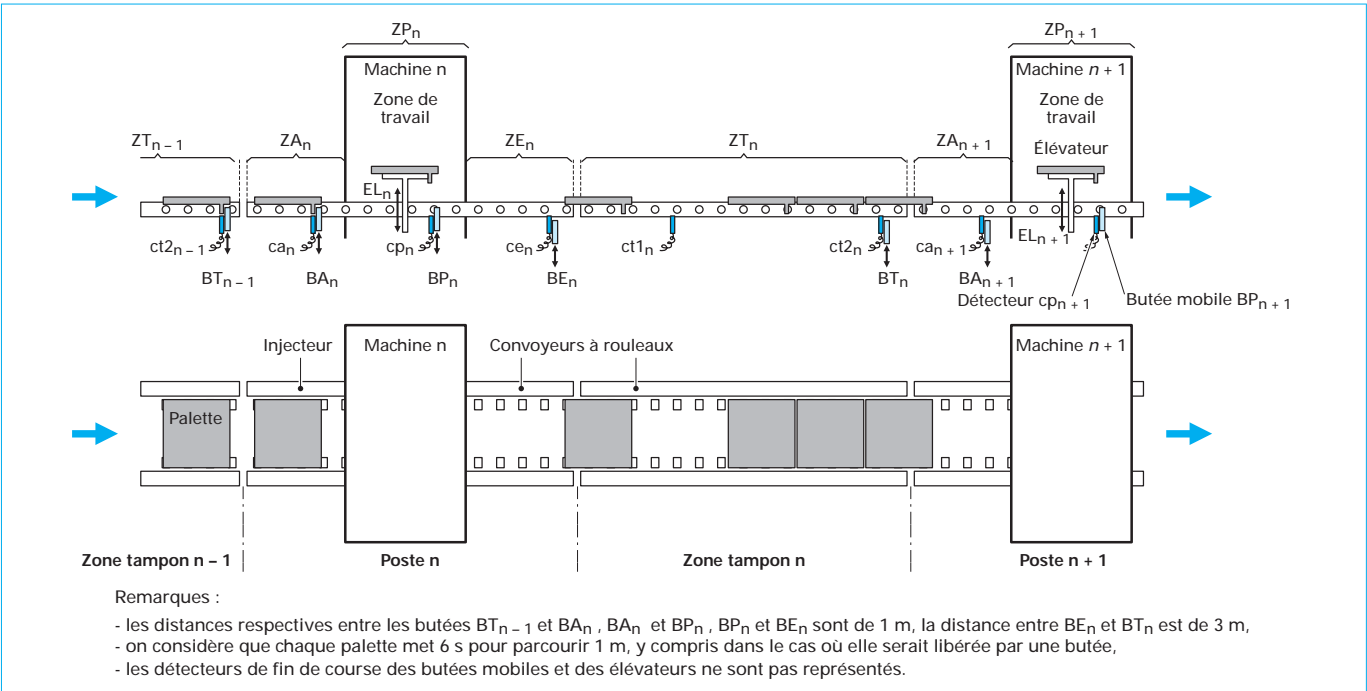


Figure 23 – Schéma de principe du système de transfert de palettes

Tableau 1 – Zones de transfert et de travail considérées occupées

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

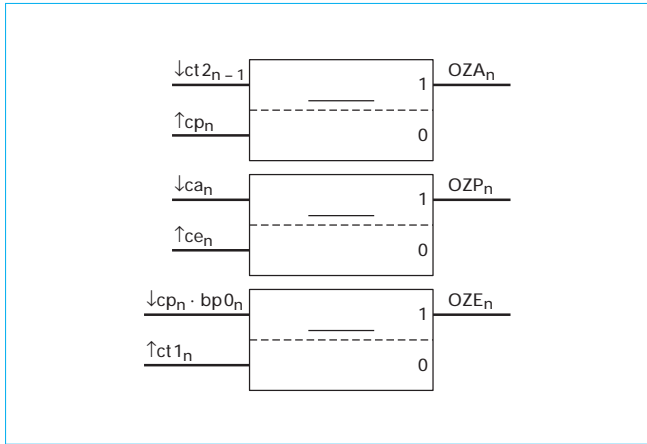


Figure 24 – Construction des variables logiques caractéristiques de l'occupation des zones

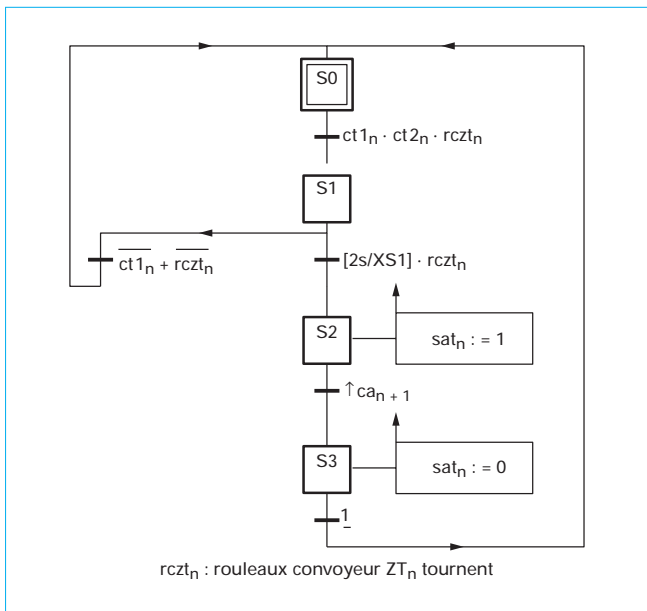


Figure 25 – Élaboration de l'information sat_n

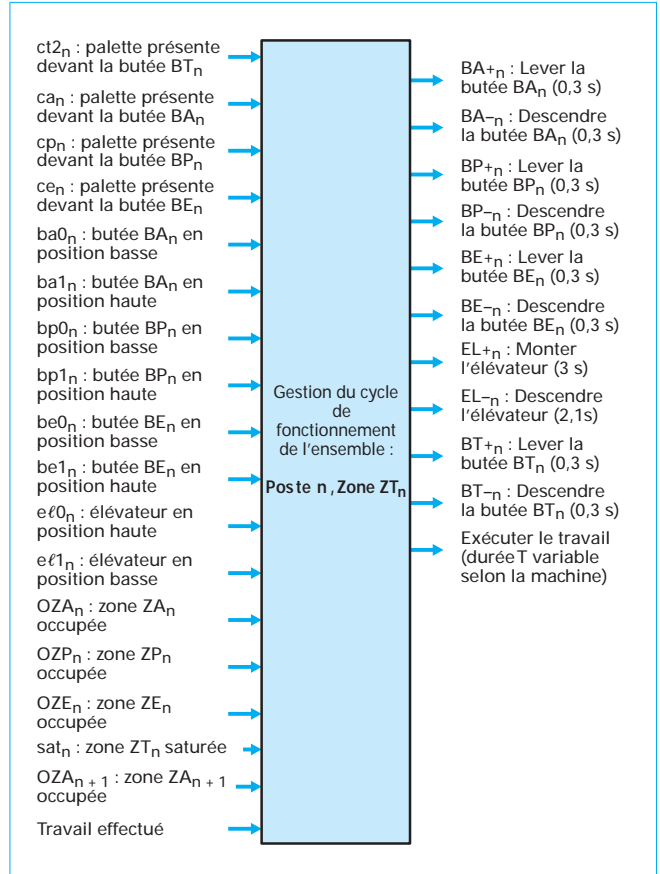


Figure 26 – Bilan des entrées-sorties de la commande séquentielle de l'ensemble {poste n, zone tampon ZT_n }

Des variables booléennes caractérisant respectivement les occupations des zones ZA_n , ZP_n , ZE_n ont été élaborées à l'aide d'opérateurs mémoires (figure 24) :

Il est nécessaire de vérifier $bp0_n$ pour éviter d'effectuer la mise à 1 de l'information OZE_n lors de la montée de l'élévateur $EL+n$.

La zone ZT_n est une zone tampon. Elle permet l'accumulation de 4 palettes. On considère que cette zone est saturée ($sat_n = 1$) lorsque quatre palettes sont immobilisées pendant une durée supérieure ou égale à 2 s dans ZT_n ($ct1_n = ct2_n = 1$) alors que les rouleaux du convoyeur tournent. La variable sat_n repassera à l'état 0 lorsqu'une palette, après avoir été libérée de la zone ZT_n , atteindra la zone ZA_{n+1} .

L'information sat_n a été élaborée avec le grafcet de la figure 25.

Après avoir abaissé la butée BP_n , la palette libérée se dirige vers la zone ZE_n . Dès que le capteur ce_n détecte l'arrivée de cette palette dans la zone ZE_n , la butée BP_n est relevée. Après avoir réalisé un bilan des entrées et des sorties (figure 26) de la partie séquentielle de l'ensemble {poste n, zone tampon ZT_n }, un grafcet partiel composé de quatre grafcets connexes a été élaboré (figure 27).

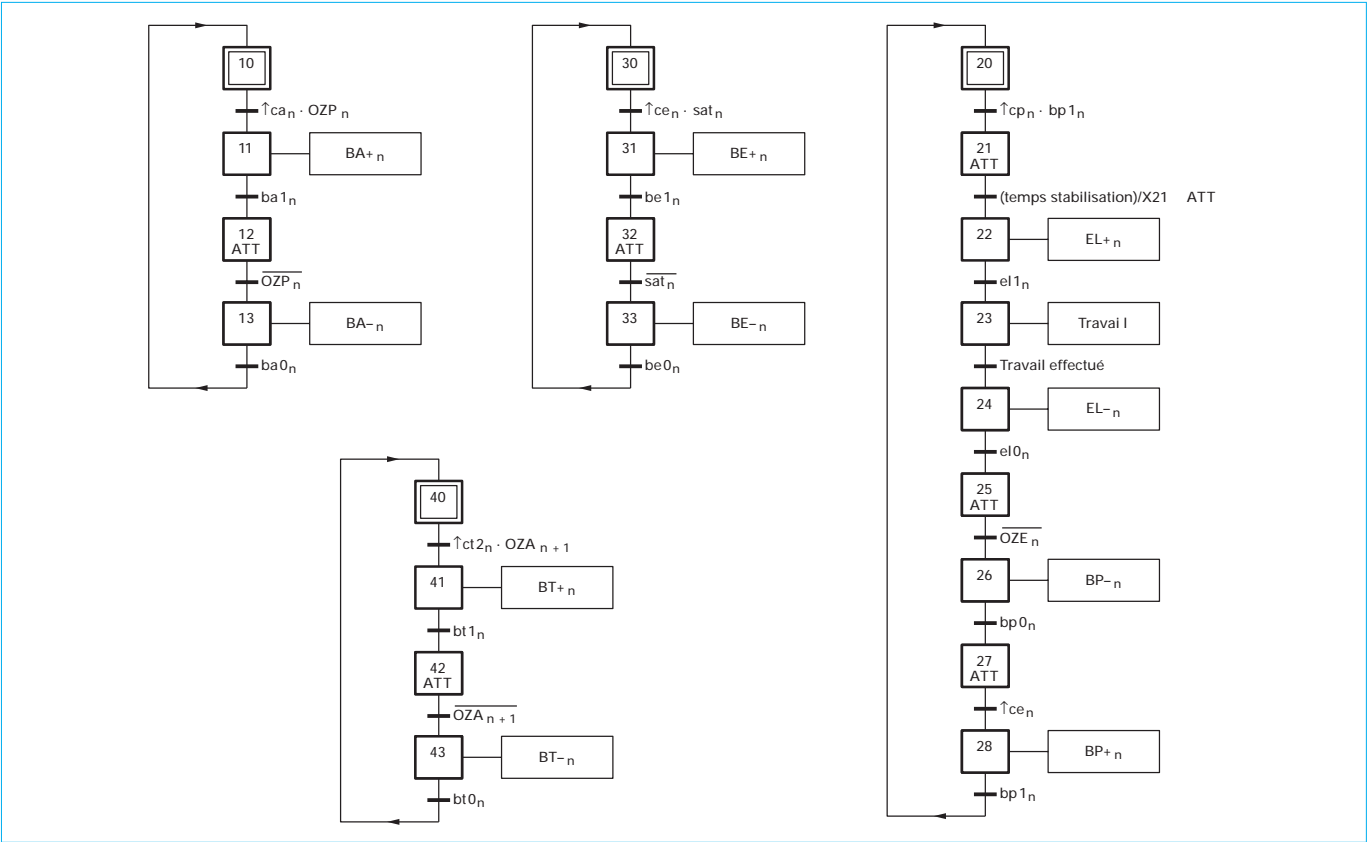


Figure 27 – Fonctionnement de l'ensemble {poste n, zone tampon ZT_n}

Références bibliographiques

- [1] CEI 60848, Langage de spécification GRAFCET pour diagrammes fonctionnels en séquence. Édition 2 (2002).
- [2] CEI 61131-3, Automates programmes – Partie 3 : langages de programmation, janv. 2003.
- [3] GEMMA : Guide d'étude des modes de marche et d'arrêt. Édité par l'ADEPA (organisme de conseil en organisation industrielle).

GAGNEZ DU TEMPS ET SÉCURISEZ VOS PROJETS EN UTILISANT UNE SOURCE ACTUALISÉE ET FIABLE

Techniques de l'Ingénieur propose la plus importante collection documentaire technique et scientifique en français !

Grâce à vos droits d'accès, retrouvez l'ensemble des **articles et fiches pratiques de votre offre**, **leurs compléments et mises à jour**, et bénéficiez des **services inclus**.



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS



MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- + de 350 000 utilisateurs
- + de 10 000 articles de référence
- + de 80 offres
- 15 domaines d'expertise

- ☐ Automatique - Robotique
- ☐ Biomédical - Pharma
- ☐ Construction et travaux publics
- ☐ Électronique - Photonique
- ☐ Énergies
- ☐ Environnement - Sécurité
- ☐ Génie industriel
- ☐ Ingénierie des transports
- ☐ Innovation
- ☐ Matériaux
- ☐ Mécanique
- ☐ Mesures - Analyses
- ☐ Procédés chimie - Bio - Agro
- ☐ Sciences fondamentales
- ☐ Technologies de l'information

**Pour des offres toujours plus adaptées à votre métier,
découvrez les offres dédiées à votre secteur d'activité**

Depuis plus de 70 ans, Techniques de l'Ingénieur est la source d'informations de référence des bureaux d'études, de la R&D et de l'innovation.

www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com

LES AVANTAGES ET SERVICES compris dans les offres Techniques de l'Ingénieur

ACCÈS



Accès illimité aux articles en HTML

Enrichis et mis à jour pendant toute la durée de la souscription



Téléchargement des articles au format PDF

Pour un usage en toute liberté



Consultation sur tous les supports numériques

Des contenus optimisés pour ordinateurs, tablettes et mobiles

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Impression à la demande

Commandez les éditions papier de vos ressources documentaires



Alertes actualisations

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

ILS NOUS FONT CONFIANCE



www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com