

I . PRESENTATION DU CONTEXTE

1 - NECESSITE D'UN LANGAGE COMMUN

Cet ouvrage est essentiellement consacré à la conception des machines de production. La réalisation d'un équipement industriel fait intervenir plusieurs services d'une même entreprise (méthodes, atelier de production, maintenance, service commercial, ergonomie...) et souvent plusieurs entreprises (le client, l'intégrateur, les sous-traitants...) Or, chacun a son expérience, ses habitudes, son savoir-faire et surtout son propre jargon.

En voici une illustration très simple. Pour utiliser un vocabulaire courant, on peut dire que la figure A-1 représente un *objet*. Un concepteur y voit cependant un *cylindre* en référence à sa géométrie, ou un *axe*, un *manchon* ou encore un *arbre* en référence à sa fonction. Pour un fabricant, c'est une *pièce*. Dans le domaine de la gestion de production, on parle d'*article* (élément de base d'une nomenclature). C'est pourtant le même *objet* pour tous : des malentendus peuvent donc nuire au bon déroulement d'un projet.

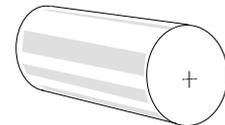


figure A-1

De plus, vers les années 70, la complexité croissante des automatismes industriels nécessite de nouveaux outils de modélisation. Sous la direction de Michel Blanchard, le groupe *Systèmes Logiques* de l'AF CET a répondu à ce besoin en créant en 1975 le Grafcet, dont le principe et le graphisme sont inspirés des Réseaux de Petri (1962, par Carl Adam Petri, mathématicien allemand). Dès alors, Jean-Paul Frachet a constitué le groupe de travail *Equipements de Production Automatisée* au sein de l'ADEPA afin de développer le Grafcet et de le promouvoir dans l'enseignement et l'industrie. Une démarche similaire a eu lieu simultanément en Allemagne pour aboutir à la norme DIN 40719.

A l'origine, le Grafcet est donc un outil de communication qui s'attache exclusivement à la description fonctionnelle des automatismes.

- Il a été normalisé en France en juin 1982 (NF C 03-190). En 1985, le GREPA a publié de nouveaux concepts.
- Une norme européenne a été consacrée au Grafcet (CEI 848 de 1988) sous la dénomination *diagramme fonctionnel pour systèmes de commande* ou *function chart for control systems*.
- La norme française a été revue suite à l'approbation internationale en donnant lieu à la norme UTE C 03-190 de novembre 1990, puis au complément UTE C 03-191 de juin 1993.
- La version française de septembre 1995 (NF C 03-190) est la plus récente.

Le concept Grafcet a été intégré dans la norme européenne sur les langages de programmation des automates sous la dénomination *SFC : diagramme fonctionnel en séquence* ou *sequential function chart* (CEI 61131-3 de juillet 1993, version française NF EN 61131-3 de novembre 1993).

Avant cette normalisation, les constructeurs avaient déjà proposé leurs propres solutions, très spécifiques, pour permettre la programmation sous représentation Grafcet. Maintenant, tous les automates se réfèrent à la norme CEI 61131-3. Cependant, les interfaces utilisateurs et les caractéristiques intrinsèques des automates sont toujours spécifiques à chaque constructeur, et les applications restent incompatibles d'une marque à l'autre.

Décliné en plusieurs niveaux, à la fois outil de modélisation et support pour la programmation, le Grafcet garantit aujourd'hui la transmission correcte des informations entre toutes les parties prenantes d'un projet d'automatisme, de la spécification à l'exploitation et à la maintenance, en passant par la réalisation.

2 - DECOUVERTE DU GRAFCET

Pour les lecteurs qui découvrent l'existence du Grafcet, voici une première approche de cet outil à travers la modélisation progressive d'un exemple simple. On suppose que *le système existe déjà* et qu'on peut donc en observer sa structure matérielle et aussi son fonctionnement.

Le système étudié est un cas industriel classique : un cycle de trempe (figure A-2).

2 - 1. Description de la machine

a) Description par une figure

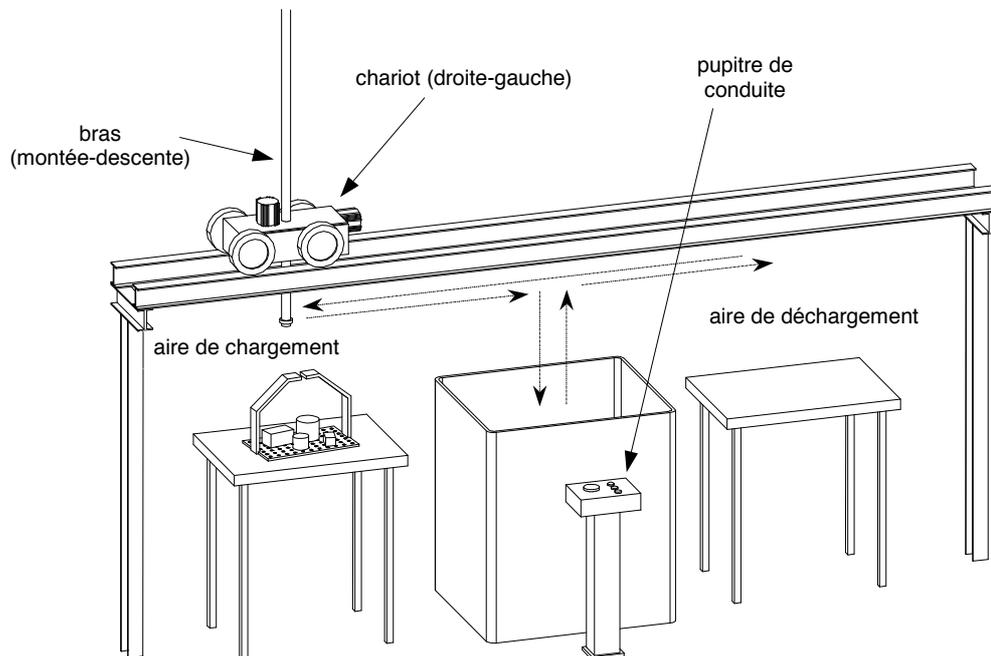


figure A-2

b) Description par un texte

Un opérateur installe un plateau qui contient des pièces à tremper sur le bras d'un chariot mobile. Il appuie ensuite sur le bouton *départ* installé sur un pupitre de conduite. Le chariot se déplace vers la droite jusqu'au bac de trempe. Le bras descend et plonge les pièces dans le liquide qui opère le traitement souhaité. Au bout de 8 minutes, le bras remonte. Puis le chariot se déplace de nouveau vers la droite et s'immobilise au-dessus de l'aire de déchargement. Un voyant clignote pour avertir l'opérateur que le cycle de trempe est terminé (l'opérateur peut avoir quitté ce poste pour effectuer un autre travail). Dès que l'opérateur a

déposé le plateau de pièces traitées, il appuie sur le même bouton *départ*, ce qui provoque cette fois le retour du chariot en position de chargement. Un nouveau cycle peut être demandé.

c) Description par une liste succincte

- L'opérateur installe le plateau et appuie sur le bouton *départ*.
- Le chariot se déplace jusqu'au bac.
- Le bras descend.
- Au bout de 8 minutes, le bras remonte.
- Le chariot se déplace jusqu'à l'aire de déchargement.
- Un voyant clignote, l'opérateur enlève le plateau et appuie sur le bouton *départ*.
- Le chariot revient en position de chargement.

Conclusion

Aucun des moyens de représentation ci-dessus ne suffit à lui seul à décrire le système.

- La figure ne décrit que très globalement l'installation. Elle peut être développée en un schéma technologique pour une connaissance plus fine des organes mis en oeuvre. Les dessins techniques de même que les schémas électro-pneumatiques et les nomenclatures apportent tous les détails quant à sa structure matérielle. Mais les mouvements ne peuvent être que devinés, et son fonctionnement n'est exprimé d'aucune manière.
- Le texte précise le fonctionnement du système, mais sa compréhension repose entièrement sur la figure. De plus, il doit être rédigé dans un langage qui ne laisse place à aucun doute. Cette rédaction est un exercice bien plus difficile que ce qu'on peut penser a priori.
- La liste est plus simple à rédiger *tant que l'évolution du système est linéaire*. Mais l'efficacité d'un tel document peut être compromise si plusieurs séquences sont exécutées simultanément, ou si des séquences sont exécutées dans certaines conditions seulement.

2 - 2. Construction intuitive à travers l'exemple

Malgré ses limites, la liste est un bon moyen de présenter simplement l'aspect dynamique du système. Mais pour que ce type de représentation puisse être généralisé, certaines règles doivent être observées. Ce chapitre permet de les découvrir progressivement.

a) Liste détaillée

La liste précédente, assez succincte, peut être complétée pour que tout ce qui se passe y figure d'une manière explicite.

(Le lecteur est vivement invité à rédiger sa propre liste et ensuite seulement à la comparer à celle proposée ci-dessous : on remarquera la difficulté à bien scinder, et quelquefois à combiner, les différentes « choses » qui se produisent, même dans un cycle aussi simple que celui-ci).

- L'opérateur installe un plateau.
- L'opérateur appuie sur le bouton *départ*.
- Le chariot se déplace vers la droite.
- Le chariot arrive au-dessus du bac.
- Le bras descend.
- Le bras arrive en position basse.
- Une temporisation de 8 minutes commence.
- Les 8 minutes sont écoulées.
- Le bras remonte.
- Le bras arrive en position haute.
- Le chariot se déplace vers la droite.
- Le chariot arrive au-dessus de l'aire de déchargement.
- Un voyant clignote, l'opérateur enlève le plateau.

- L'opérateur appui sur le bouton *départ*.
- Le chariot se déplace vers la gauche.
- Le chariot arrive au-dessus de l'aire de chargement.

b) Frontière entre opérateur et système

Les gestes de l'opérateur ne doivent pas tous être considérés de la même manière. Par exemple, la proposition *l'opérateur installe un plateau* n'a en soi aucune influence sur le fonctionnement du système alors que la proposition *l'opérateur appuie sur le bouton départ* constitue une cause de son évolution.

Puisque la liste représente le fonctionnement du système, on ne prend pas en compte les gestes de l'opérateur qui n'ont pas d'influence sur son évolution : dans cet exemple, il s'agit de la mise en place et de l'enlèvement du plateau.

c) Distinction entre action et réceptivité

L'étude porte sur la machine et non sur l'opérateur. Par conséquent, une action est l'effet d'un ordre émis par la machine et non par l'opérateur : le chariot se déplace *parce que* le système en a donné l'ordre (il s'agit bien d'une action produite par le système), alors que le fait d'appuyer sur le bouton départ n'est *pas* une action du point de vue du système (bien au contraire, il s'agit d'une information qu'il reçoit de son environnement).

Une telle information constitue une condition d'évolution. Elle permet au système de changer d'état (exemple : *si* le chariot arrive au-dessus du bac, *alors* il s'arrête et le bras descend). Du fait que les conditions d'évolution peuvent être très variées, le terme générique de *réceptivité* permet de les désigner quelle que soit leur nature.

d) Liste complète

On propose, provisoirement, de distinguer les actions et les réceptivités par une typographie différenciée (par exemple : actions en gras, réceptivités en italiques fins).

- *L'opérateur appuie sur le bouton départ.*
- **Le chariot se déplace vers la droite.**
- *Le chariot arrive au-dessus du bac.*
- **Le bras descend.**
- *Le bras arrive en position basse.*
- **Une temporisation de 8 minutes commence.**
- *Les 8 minutes sont écoulées.*
- **Le bras remonte.**
- *Le bras arrive en position haute.*
- **Le chariot se déplace vers la droite.**
- *Le chariot arrive au-dessus de l'aire de déchargement.*
- **Un voyant clignote.**
- *L'opérateur appuie sur le bouton départ.*
- **Le chariot se déplace vers la gauche.**
- *Le chariot arrive au-dessus de l'aire de chargement.*

Le point essentiel est de constater l'alternance entre les actions et les réceptivités.

e) Apport d'éléments graphiques et d'un vocabulaire approprié

- Les actions sont encadrées et les tirets qui les précèdent sont supprimés. Par contre, les tirets en face des réceptivités sont renforcés et appelés *transitions*. Le texte peut être condensé (figure A-3-a).
- A chaque action est associée une *étape*, représentée par un carré. Les étapes peuvent être numérotées afin de faciliter leur repérage et elles sont reliées entre-elles par des *liaisons orientées* (figure A-3-b).

L'alternance entre les actions et les réceptivités se traduit par l'alternance entre les étapes et les transitions. Cette caractéristique est en partie à l'origine du mot Grafcet (GRAPhe Fonctionnel de Commande Etapes-Transitions).

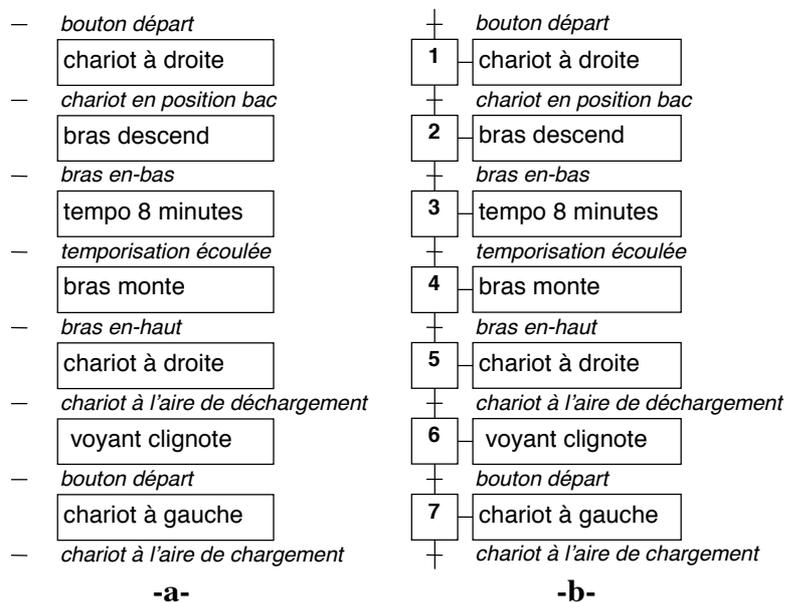


figure A-3

La figure A-3-b est cependant incomplète. En particulier, elle n'exprime pas le fait que les séquences peuvent se succéder les unes aux autres, et suggère *implicitement* le moment du début de la séquence (en-haut de la figure), ce qui est imprécis. Une analyse plus détaillée permettra de compléter ce diagramme afin d'aboutir à un grafcet complet.

f) Analyse de l'évolution du grafcet

L'action qui est produite à un instant donné est celle qui est associée à l'étape dite *active*. Le changement d'état du système est donc représenté par le changement de situation du grafcet, la situation d'un grafcet caractérisant l'ensemble des étapes qui sont actives à l'instant considéré. Ainsi, le passage d'une étape vers l'étape suivante se fait par franchissement de la transition qui les sépare.

En fait, *une transition est franchie lorsque l'étape qui la précède est active et que la réceptivité qui lui est associée est vraie*.

Par conséquent, le grafcet de la figure A-3-b doit comporter une étape *au-dessus* de la première transition pour que celle-ci puisse être franchie.

Par ailleurs, si aucune étape n'est active à la mise sous tension, aucune transition ne peut être franchie : aucune étape ne peut être activée et à fortiori, aucune action ne peut être produite. L'activation d'une étape supplémentaire (0 sur la figure A-4) peut être obtenue automatiquement dès la mise sous tension : il s'agit d'une étape initiale, représentée par un carré double. La possibilité de répétition du cycle est symbolisée par la liaison entre les étapes 7 et 0. Les règles d'évolution du Grafcet sont détaillées au § II.1 - 1.

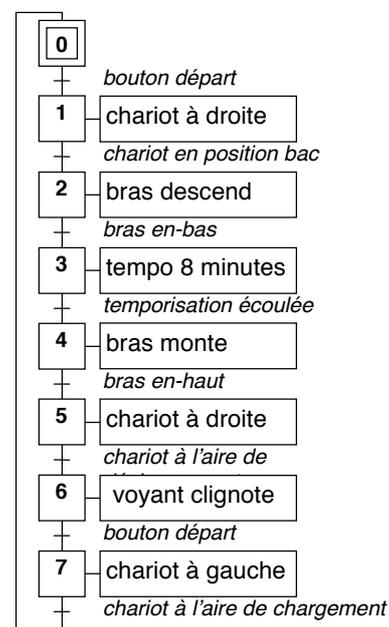


figure A-4

g) Notion d'automatismes combinatoires

Soit une action produite exclusivement par une combinaison de variables, par exemple une sonnerie déclenchée par l'un des deux boutons poussoirs situés aux deux entrées d'une maison. Le relâchement du bouton arrête la sonnerie.

L'équation logique de la sonnerie est :

$$\text{sonnerie} = \text{bouton 1 } \textit{ou} \text{ bouton 2}$$

On parle d'automatisme combinatoire car la sonnerie est produite par *combinaison* de variables.

h) Notion d'automatismes séquentiels

- Au niveau des actions

Dans l'exemple du poste de trempe, l'action *chariot à droite* ne dépend pas seulement des variables, mais dépend également de l'état courant du système : *chariot à droite* est produit par la variable *bouton départ* si le chariot se trouve en situation initiale (étape 0) ou bien par la variable *bras en-haut* si le bras vient de monter (étape 4). Cette proposition logique ne décrit toutefois que le début de l'action, ce qui peut s'écrire d'une manière symbolique :

$$\text{début chariot à droite} = [\text{bouton départ } \textit{et} \text{ étape 0}] \textit{ou} [\text{bras en-haut } \textit{et} \text{ étape 4}]$$

L'action se poursuit jusqu'à satisfaction de :

$$\text{fin de chariot à droite} = [\text{chariot en position bac } \textit{et} \text{ étape 1}] \textit{ou} [\text{chariot à l'aire de déchargement } \textit{et} \text{ étape 5}]$$

En fait, l'action dure tout le temps d'activation de l'étape 1 *ou bien* tout le temps d'activation de l'étape 5. L'équation de *chariot à droite* peut donc s'écrire plus simplement :

$$\text{chariot à droite} = [\text{étape 1}] \textit{ou} [\text{étape 5}]$$

- Au niveau des réceptivités

Toujours dans l'exemple du poste de trempe, on constate par ailleurs que le bouton *départ* n'a pas le même effet selon l'état du système.

- Si le chariot est en position de chargement, le fait d'appuyer sur le bouton *départ* provoque le déplacement du chariot vers la droite.
- S'il est en position de déchargement et qu'on appuie sur ce *même* bouton, le chariot se déplace vers la gauche.
- Dans toutes les autres situations, si le bras est au fond du bac par exemple, l'appui sur le bouton en question ne provoque *aucun* effet.

On parle d'automatismes séquentiels car les situations sont organisées en séquences : les actions sont le résultat de situations successives et le rôle des réceptivités dépend de la situation courante.

i) Ecriture des équations des sorties

On appelle *équations des sorties* les propositions logiques qui définissent la production des actions.

Dans l'exemple de la figure A-5, l'action A1 est produite si l'étape 2 *ou* si l'étape 3 est active. On écrit donc :

$$\text{A1} = [\text{étape 2}] \textit{ou} [\text{étape 3}]$$

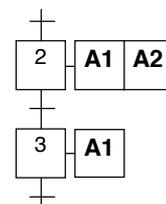


figure A-5

Il est incorrect par contre de combiner toutes les actions qui sont produites par une même étape. Exemple :

~~étape 2 = [action A1] et [action A2]~~

- En effet, les fonctions logiques permettent de combiner des variables d'entrée mais ne sont pas destinées à effectuer des affectations multiples.
- Par ailleurs, le signe = peut prêter à confusion car il n'indique pas explicitement le sens de lecture d'une équation logique, qui, comparativement à l'algèbre des nombres réels, est significatif. De ce fait, on préfère souvent le signe ← qui est sans ambiguïté :

A1 ← [étape 2] ou [étape 3]

Cette expression montre très clairement que l'activation des étapes 2 ou 3 entraîne la production de l'action A1. Par convention, l'écriture d'une telle équation se fait plus rarement de la gauche vers la droite.

3 - INDICATIONS POUR LA MISE EN OEUVRE

Ce paragraphe situe succinctement la place du Grafcet dans l'univers complexe que constitue un système automatisé de production afin que le lecteur puisse ensuite aborder les manuels de programmation des automates.

3 - 1. Architecture générale d'un système automatisé

Le cycle de trempe décrit plus haut ne peut se dérouler d'une manière automatique que si la machine :

- comporte un certain nombre de constituants,
- gère elle-même les interactions des constituants,
- dialogue avec son environnement.

On appelle cet ensemble *système de production automatisée* (figure A-6).

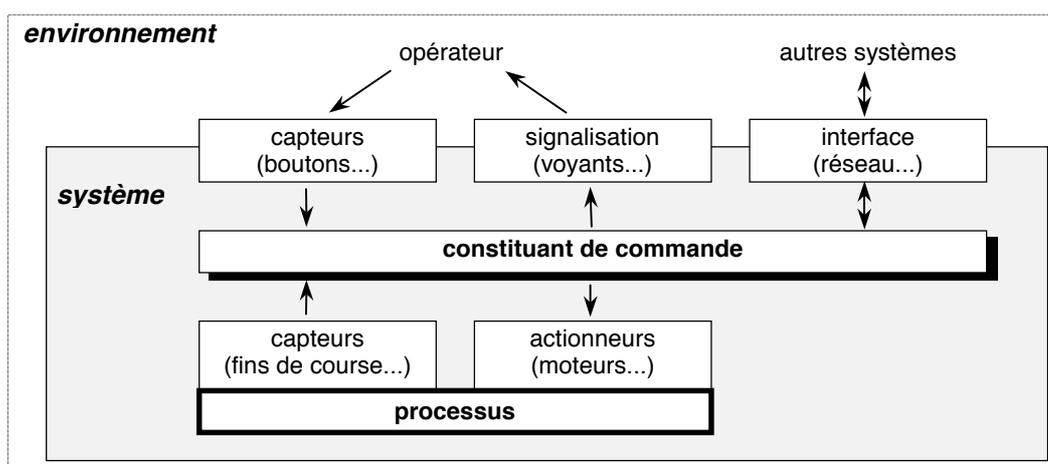


figure A-6

3 - 2. Technologie du constituant de commande

a) Solutions câblées

Les fonctions de commande peuvent être réalisées par des composants logiques élémentaires de type électrique, pneumatique, électronique ou plus rarement fluide. Ces

composants sont à relier entre-eux par des liaisons physiques (fils, tubes, circuit imprimé) selon le problème à résoudre. Chaque problème nécessite donc un schéma spécifique. Celui-ci peut être élaboré par des méthodes d'analyse diverses : tableaux de Karnaugh, méthode en cascade, etc. La reconfiguration du coffret de commande est une opération longue et délicate si des modifications ou des ajouts s'avèrent nécessaires. Composants évolués, les séquenceurs permettent de simplifier l'étude et le câblage des systèmes séquentiels en permettant en outre une meilleure évolutivité des machines. Ils sont disponibles dans les différentes technologies. Les solutions câblées ne représentent plus qu'une part infime des réalisations mais restent performantes dans des domaines particuliers : les temps de réponse sont très courts, et en ambiance explosible la sécurité est optimale pour la technologie pneumatique.

b) Solutions programmées

La souplesse de la programmation permet d'adapter très rapidement le comportement des machines aux contraintes changeantes de la production, même en phase d'exploitation. La profusion des fonctions disponibles grâce à l'évolution de la micro-informatique permet en outre d'améliorer considérablement la qualité générale des machines : dialogues évolués avec l'opérateur, horodatage des événements, dialogues avec les parties commandées d'autres machines et prise en charge du positionnement précis d'un axe de déplacement ne sont que quelques exemples. Il existe 3 familles de solutions programmées, adaptées chacune à un type particulier d'application : le micro-contrôleur, l'automate programmable et le micro-ordinateur.

- Le micro-contrôleur

D'un prix d'achat très attractif, il nécessite cependant un temps (donc un coût) de développement assez conséquent. Son intérêt réside de ce fait dans les applications de série. Sa programmation est proche de celle du micro-processeur.

- L'automate programmable

D'un prix plus élevé, l'automate programmable est cependant d'un rapport performance-prix de plus en plus intéressant. Contrairement au micro-contrôleur, il ne requiert pas de développement matériel supplémentaire. Sa programmation ne nécessite qu'une formation d'environ une semaine pour un technicien. Par ailleurs, il est robuste et est conçu pour offrir une vaste gamme d'interfaces pour communiquer avec son environnement : capteurs et actionneurs, dialogues opérateurs... Pour ces raisons, il est bien adapté au milieu industriel mais est également très utilisé dans la gestion technique des bâtiments (ascenseurs, climatisation, sécurités, etc.) ou des voies de communication (la signalisation active des autoroutes par exemple est souvent pilotée par des automates industriels).

- Le micro-ordinateur

Il offre l'avantage de pouvoir traiter et de stocker de grandes quantités d'informations avec des outils standards (plate-forme Windows par exemple). Mais sa constitution ne lui permet pas de survivre dans l'ambiance agressive d'un atelier (vibrations, pollution électromagnétique, etc.). Des modèles industriels sont disponibles, mais leur prix reste encore élevé.

- Solutions hybrides

L'interpénétration des domaines de l'automatique et de l'informatique conduit aux solutions qui combinent automate et micro-ordinateur :

- soit le micro-ordinateur est complété par des cartes d'entrées-sorties industrielles et d'une carte pour automatismes séquentiels (un automate en fait),