

**HISTORIQUE ET ETAT DE L'ART DE  
L'AUTOMATISATION DE LA PRODUCTION**

*Claude Lurgeau - Ecole des Mines de Paris*

La première partie de cet article de synthèse présente succinctement l'histoire récente de l'automatisation industrielle et une échelle qualitative permettant de suivre l'évolution de l'homme dans son effort pour automatiser son travail.

La seconde partie dresse un panorama des principaux outils techniques actuels de la productique en montrant la tendance à l'intégration sous le concept CIM (Computer Integrated Manufacturing).

## 1 HISTORIQUE

### 1 - 1 L'entreprise de production : les champs d'application de la productique.

Imaginons un court instant un être intelligent, délivré de nos contraintes humaines d'espace et de temps, observant l'univers depuis quelques millions d'années. Il notera que quelque cinq milliards de sujets de l'espèce humaine ont en quelques millénaires pris le contrôle de la planète Terre, en assujettissant toutes les autres espèces et en exploitant pour leurs besoins propres les richesses minérales et végétales de la planète.

La terre et ses richesses	L'homme et ses besoins	Les secteurs d'activités humaines
<u>minéral</u> : matières premières énergie	se nourrir	agriculture, élevage, pêche, agroalimentaire
<u>vivant</u> : animal végétal	se déplacer	routes, canaux, voies ferrées, ports, gares, aéroports, automobiles, bateaux, avions, trains
	se vêtir	textile, cuir
	se loger	bâtiment
	se soigner	chimie, pharmacie, hôpitaux ...
	se distraire	sport, cinéma, arts, loisirs ...
	se former s'informer	éducation presse, télé, radio

Ainsi, on se rend compte facilement que toutes les activités humaines ont pour seul objectif de satisfaire les divers besoins de l'homme. Dans son organisation sociale, l'homme concentre son activité dans l'entreprise. L'entreprise est le lieu où se conjuguent le travail et le capital (sous forme de machines) pour produire les richesses (essentiellement les biens et les services). Ainsi le terme productique que l'on associe le plus souvent aux seules activités de production manufacturière de biens s'applique en fait à toutes les activités de l'homme.

### 1 - 2 Quelques dates récentes sur l'automatisation de la production

De nombreux ouvrages retracent l'avènement du machinisme et de l'automatisation industrielle. Nous nous limiterons à faire ressortir quelques dates et faits marquants sur les dernières décennies.

- 1949 : 1ère MOCN (Machine Outil à Commande Numérique) au MIT.
- 55-60 : Début du "process control" principalement dans les processus continus (pétrole - chimie - centrales...)
- 61 : 1er robot industriel Unimate 1 aux USA - Jo Engelberger fonde Unimation.
- 65-70 : Apparition des premiers minicalculateurs (PDD 8... PDP10) et du concept d'informatique industrielle.
- 69 : Les premiers API (Automates Programmables Industriels) aux USA (Allen Bradley - Modicon)
- 72 : Intel 4000 1er microprocesseur.
- 73 : Micral le 1er microcalculateur en France.
- 75-76 : Emergence du concept CAD-CAM aux USA.
- 79 : Ce concept est traduit par le sigle CFAO en français.
- 75-80 : Les premiers RLI (réseaux locaux industriels) homogènes ou réseaux propriétaires sont développés par les constructeurs.
- 79 : 1ère machine de vision aux USA (Automtix).  
Naissance de la "visionique".
- 81 : Emergence du concept de productique en France - mécatronique au Japon
- 82 : Apparition du concept C.I.M. (Computer Integrated Manufacturing) qui sera traduit par AIP (Automatisation Intégrée de la Production)
- 84 : Lancement du projet MAP (Manufacturing Automation Protocol) par General Motors.

### 1.3 L'échelle des degrés d'automatisation de la production

Il est difficile de comparer deux machines, deux ateliers, deux entreprises, ou deux secteurs d'activité et de dire lequel (ou laquelle) est le plus automatisé. Il n'existe pas en effet de mesure quantitative du degré d'automatisation. Une approche utilisée par les économistes est de mesurer l'intensité capitalistique c'est-à-dire le niveau d'investissement en technologie du secteur considéré. Cette approche n'est possible toutefois, que sur des macrosystèmes.

Nous proposons une échelle qualitative des degrés d'automatisation qui permet de comprendre le transfert progressif du travail entre l'homme et la machine. La première étape de ce transfert concerne le travail mécanique et résulte de la domestication de l'énergie. Cette "mécanisation de la production" a commencé de manière significative dès le 19<sup>ième</sup> siècle et on l'a qualifiée de "révolution industrielle". La seconde étape s'accomplit en ce moment en rendant les machines de plus en plus flexibles et autonomes dans leur comportement. Elle résulte de la domestication du traitement de l'information.

L'échelle proposée est inspirée des travaux de James Bright publiés en 1985. Elle intègre les progrès récents de la technologie.

#### Niveau 1 - La main

L'homme au travail sans outil (mains - pieds - bouche) :

*Tri d'objets - opération de montage, d'emballage, soufflage du verre, collecte de fruits et légumes...*

#### Niveau 2 - L'outil à la main sans force motrice

Opérations de montage, d'emballage, de peinture...

*Clés - pinces - lime - machine à écrire mécanique...*

#### Niveau 3 - Outil manuel avec force motrice

La force motrice remplace la force musculaire, mais l'opérateur continue à guider l'outil.

*Perceuse - tournevis mécanisé - tronçonneuse - machine à écrire électrique...*

#### Niveau 4 - Outil mécanisé à commande manuelle

C'est le niveau des machines-outils traditionnelles. L'opérateur ne communique plus ni l'énergie, ni le guidage. Il contrôle les déplacements et les vitesses dans certaines gammes disponibles.

*Perceuse sur colonne - fraiseuse - tour - rectifieuse - chariot élévateur - palan.*

Niveau 5 - Outil mécanisé à cycle unique figé

L'opérateur alimente la machine, la surveille et retire les pièces. Pour la première fois, la machine commande ses opérations dans tout le domaine opérationnel voulu.

*Poinçonneuse - perceuse avec ou sans débouillage - machine-outil à cycle sur came.*

Niveau 6 - Machine mécanisée à cycle linéaire complexe mais figé

Les fonctions sont identiques au niveau 5, mais le cycle formé d'un enchaînement de séquences élémentaires est plus complexe.

La pièce à ouvrager peut être fixe auquel cas les divers outils lui sont présentés au cours de diverses séquences (tour revolver automatique - machine à laver le linge ou la vaisselle - fours automatiques) ou bien les divers postes d'usinages sont fixes, disposés linéairement ou circulairement et la pièce se déplace devant les outils à chaque séquence (machines transfert).

Niveau 7 - Machines télécommandées

Ce niveau rassemble principalement les commandes à distances électromécaniques, électroniques ou hertziennes. Il autorise la centralisation des mesures et des commandes de plusieurs machines ou même d'une usine entière sur un pupitre central avec synoptique (*raffinerie - centrale thermique ou nucléaire - centre de surveillance routière ou aérienne*).

Les télémanipulateurs permettent l'intervention dans des milieux hostiles à l'homme (*nucléaire - spatial - milieu sous-marin - incendies...*).

Niveau 8 - Mise en marche automatique par introduction de l'ouvrage

La marche cycle par cycle nécessitait la présence d'un opérateur humain pour lancer chaque cycle de travail. L'automaticien peut, par des modifications mineures, assurer la répétitivité des cycles de travail et subordonner la marche de la machine à la présence de pièces ou de produit. L'opérateur humain peut alors être supprimé.

Niveau 9 - Mesure des caractéristiques du produit et séquences d'alarmes

Des capteurs adéquats (température - pression - dimension - vitesse - PH...) équipent la machine et permettent à l'opérateur un meilleur suivi de la qualité ou des conditions de fonctionnement de la machine. Un raffinement simple consiste à équiper les capteurs de butées ou plages réglables de façon à signaler à l'opérateur tout défaut dans la qualité du produit ou tout incident. L'opérateur, prévenu par une alarme, lumineuse ou sonore, ou par affichage d'un message, n'est plus tenu à une surveillance aussi attentive. Pour certaines alarmes la machine pourra s'arrêter d'elle-même.

#### Niveau 10 - Enregistrement de la production ("data logging")

Ce niveau peut correspondre à des fonctions élémentaires (comptage de pièces - comptage d'un fluide) ou peut comporter l'enregistrement dans le temps de très nombreuses caractéristiques de la production. Dans les raffineries, les centrales thermiques ou nucléaires, ce sont des centaines ou des milliers d'informations qui sont enregistrées. La machine peut se limiter à une simple acquisition de données ou mieux les mettre en forme, les traiter, faire des moyennes temporelles, des corrélations, des calculs divers et présenter un journal de bord de l'installation (calculateurs de suivi de procédés).

#### Niveau 11 - Triage automatique ou mise au rebut en fonction de la mesure d'une caractéristique

La machine d'elle-même contrôle sa production et dirige ses produits vers diverses classes, y compris le rebus ou le recyclage. Ce niveau élevé - parce qu'il y a prise de décision, le plus souvent binaire - peut être techniquement simple. Par exemple, une machine d'embouteillage qui pèse les bouteilles et élimine celles qui sont incomplètement remplies.

Les machines de conditionnement de fruits, d'oeufs... procèdent par palpation ou mesure pondérale pour classer les produits. Les automatismes de palettisation et de magasinage compteront par exemple un nombre adéquat de cartons pour constituer une palette et activeront un aiguillage de bande transporteuse vers une autre machine.

La machine peut modifier son propre cycle à partir de mesures faites sur le produit. Ce qui caractérise ce niveau, c'est l'apparition de la réinformation (boucle fermée ou "feed back") mais à partir d'informations booléennes.

#### Niveau 12 - Régulation ou asservissement d'une caractéristique

La régulation d'une caractéristique consiste à maintenir constante sa valeur malgré des perturbations aléatoires. Asservir une caractéristique c'est la contraindre à suivre une certaine loi d'évolution. Ce niveau est caractérisé par les notions de boucle fermée (feed back), mais sur des grandeurs scalaires, numériques ou analogiques, et non plus booléennes.

Dans des unités chimiques de production, des températures, des pressions, des débits, des niveaux seront ainsi maîtrisés par l'automatisme lui-même. Dans les processus mécaniques de production, ce seront principalement des positions, des vitesses, des forces ou des couples.

Le régulateur de Watt, le pilote automatique des bateaux, le thermostat d'appartement, les régulateurs de vitesse sur certaines automobiles, sont autant d'exemples simples.

L'automatisme, pour maintenir une caractéristique constante, compare la mesure effective à la grandeur de consigne souhaitée et utilise l'écart pour corriger l'erreur, non pas de manière brutale (décision binaire par action tout

ou rien), mais selon des lois plus ou moins évoluées. Le régulateur Proportionnel Intégral et Dérivé (P.I.D.) constitue l'automatisme le plus classique et le plus répandu de ce type.

On trouve à ce niveau 12 différents degrés de difficultés selon qu'une ou plusieurs caractéristiques sont contrôlées simultanément et selon leur couplage éventuel (systèmes multivariables).

#### Niveau 13 - Machines à commande numérique

Il s'agit ici de machines dont les divers degrés de liberté sont asservis et dont les points de consigne sont générés non plus par un opérateur humain, mais par un système informatique (ordinateur - calculateur de procédé - automate programmable - unité de gouverne). Le système informatique peut lui-même automodifier son programme par une boucle de réinformation au second degré. Les exemples caractéristiques sont les machines-outils à commande numérique (centre d'usinage - tour - fraiseuse - presse...).

*Pour la première fois, la machine dispose d'un langage et la fonction de l'opérateur humain se limite à la **programmation** et à la **surveillance** de la machine.*

#### Niveau 14 - Machine à apprentissage avec moniteur (robot play-back)

La description de la tâche à exécuter est trop complexe pour être décrite par un langage informatique explicite comme au niveau précédent. Par exemple, comment décrire le mouvement du bras d'un peintre qui déplace son pistolet sur une voiture ou ses pinces à souder sur une carrosserie ?

L'opérateur humain (moniteur) effectue les gestes une seule fois et les futures trajectoires de consigne des asservissements sont enregistrées en mémoire. La machine peut rejouer indéfiniment l'opération (play-back).

L'opérateur n'a plus qu'une surveillance discrète à assurer. Cependant les opérations de la machine se font dans un univers géométrique et un champ de caractéristiques bien définis.

#### Niveau 15 - La robotique intelligente

Au niveau 14, la machine travaille dans un contexte complexe mais invariant, elle n'est pas adaptative. Si elle doit prendre un objet en un point et si cet objet ne s'y trouve pas, elle effectue sa préhension dans le vide ou, au mieux, s'arrête, mais elle ne saura pas le rechercher, même s'il est très près.

A ce dernier niveau de la robotique dite "intelligente", la machine traitera des informations jusqu'ici réservées aux êtres vivants (vision - audition - toucher) et apprendra à reconnaître par elle-même et à modifier son propre comportement. De telles machines fonctionnent dans les laboratoires et certaines sont déjà en production.

### Niveau 16 - L'atelier flexible

Le concept d'atelier flexible résulte de l'insertion des machines à commande numérique et des robots dans un système de production intégrée.

Il associe essentiellement quatre fonctions :

- *la fonction production* proprement dite, assurée par des machines à commande numérique donc programmables,
- *la fonction convoyage-manutention-stockage* assurée par des éléments également programmables (chariots filoguidés - robots-magasins automatisés)
- *la fonction communication* assurée par un réseau supportant les protocoles d'échanges standards.
- *la fonction pilotage* assurée par un superviseur travaillant en temps réel

La "flexibilité" se traduit par la capacité d'adaptation du système à des changements dans la composition des objets à produire, à des modifications dans la fabrication des pièces et à la résorption des aléas du processus de production (commande - approvisionnement - délai.

L'atelier flexible intéresse l'ensemble des industries travaillant sur les petites et moyennes séries plus ou moins répétitives.

## **2 ETAT DE L'ART : LES BRIQUES DE BASE DE LA PRODUCTIQUE**

Parmi les outils de la productique il faut distinguer :

- les outils immatériels ou méthodologiques qui représentent le savoir-faire utile à la conduite des projets d'automatisation.
- les composants technologiques ou briques de base pour l'automatisation des processus.

Nous nous proposons de présenter succinctement ces derniers qu'ils soient mécaniques, électriques, ou informatiques.



### 2.1 Les calculateurs scientifiques et industriels

Il s'agit pour les premiers d'une gamme de machines informatiques allant du microcalculateur aux minis et mégaminis qui sont destinés à traiter les calculs techniques complexes : traitement de signal et identification de processus, calcul d'éléments finis, problèmes de thermique, d'optique, de génie chimique, de simulation...

Dans la production industrielle on trouvera ces machines en superviseur d'unités de production complexes ou comme structures d'accueil de gros logiciels de type CAO, gestion de production ou de simulation.

Il faut citer parmi les principaux offreurs : DEC - IBM - HP - PRIME - BULL.

Avec une puissance de calcul moindre mais plus "durcis" à l'environnement et dotés d'entrées sorties industrielles, on trouve les calculateurs de pilotage dits "calculateurs industriels". Les principaux offreurs sont sensiblement les mêmes auxquels se rajoutent les grands intégrateurs de la productique type CEGELEC, SIEMENS, TOSHIBA, ASEA...

Nous ajoutons à cette rubrique des machines informatiques pour l'industrie, les stations de travail dont le concept plus récent est né avec la CAO mais qui s'étend aux diverses fonctions du travail de l'ingénieur. On commence à trouver des stations de travail pour l'ingénieur, des postes de travail pour l'automaticien... Typiquement ces machines se composent d'une unité centrale autour des derniers microprocesseurs Motorola (famille 68\*\*\*) ou Intel (famille 80\*\*\*), d'une mémoire vive de 4 à 16 MO, d'une mémoire de masse de quelques centaines de MO, d'un écran bitmap 1000\*1000, du système d'exploitation UNIX et d'un environnement logiciel de base performant. Les pionniers de ce type de machines ont été APOLLO et SUN mais le concept a été repris par la plupart des constructeurs et particulièrement par HP, DEC, IBM, BULL, Silicon Graphics...

Il faut enfin souligner la pénétration considérable des Personal Computers (PC) d'IBM et compatibles dans l'industrie.

Au niveau des langages en dehors des développeurs qui font aujourd'hui un large usage de C, FORTRAN et même BASIC restent largement utilisés dans l'industrie, alors que ADA ne diffuse que lentement.

## **2.2 Les Automates Programmables Industriels (API)**

Apparus vers 68-69 aux USA et 70-72 en France, les API peuvent être définis comme des *"machines électroniques programmables par un personnel non informaticien, destinées à accomplir en ambiance industrielle et en temps réel des fonctions d'automatismes logiques et numériques simples et des fonctions de régulation"*.

Ces machines ont constitué le véritable levier de l'automatisation de la production.

Les principaux constructeurs en France sont TELEMECANIQUE (30 à 35 % du marché) suivi de APRIL (20 à 25 %), ALSPA. La seule production annuelle de la TELEMECANIQUE avoisine aujourd'hui 20 000 machines par an. Soulignons que APRIL et TELEMECANIQUE sont désormais regroupés au sein du groupe SCHNEIDER.

Les leaders mondiaux sont SIEMENS à égalité avec ALLEN BRADLEY, suivis de GE Fanuc, TEXAS, OMRON, MODICON...

Les ateliers logiciels pour automaticiens se multiplient : X-Tel de TELEMECANIQUE, Orphée de APRIL, Gral-2 de SYGRAL, Cadépa de EURYSIS-SGN, CJGraf de CJB AUTOMATION.

Le succès des API tient à leur robustesse et à leur simplicité d'utilisation. Ces machines ont gagné la confiance des utilisateurs en conservant le langage des automaticiens (Schémas à relais-langages booléens-grafcet), en séparant les fonctions de production des programmes - assurée par la console - et leur exécution - assurée par l'automate - et en résolvant simplement les problèmes de temps réel par un cycle de scrutation synchrone.

## **2.3 Les Réseaux Locaux Industriels (RLI)**

L'avènement des réseaux de communication entre machines hétérogènes est certainement l'une des étapes les plus marquantes dans l'évolution de l'informatique contemporaine.

Conceptuellement, le problème et l'intérêt de l'interconnexion de machines informatiques en réseaux, sont perçus au travers des grands réseaux télématiques et notamment au travers de Transpac et des applications du Minitel. Il y a une grande similitude entre les réseaux télématiques, de bureautique et de productique. Toutefois l'informatique de production se singularise à nouveau par des exigences dans la sécurité de transmission des

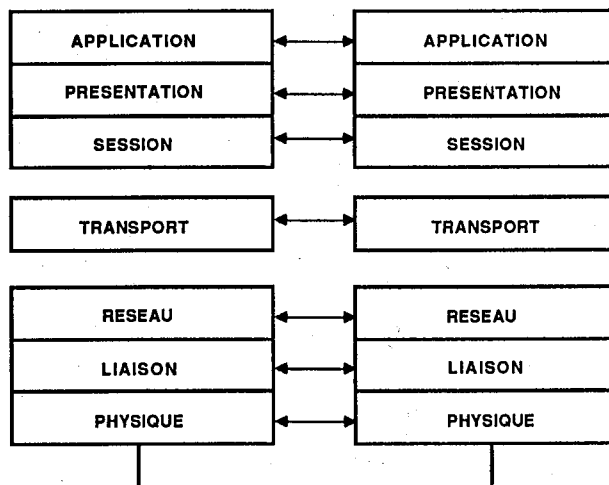
données, par des contraintes de temps réel bornant les temps d'acheminement des messages, par une grande hétérogénéité des constructeurs, des types de machines et des langages.

Au niveau technique les éléments qui déterminent un réseau sont notamment :

- le support physique (paire torsadée - câble coaxial - fibre optique)
- la technique de transmission (bande de base ou large bande)
- la topologie du réseau (étoile - anneau - bus)
- le protocole d'accès au médium (CSMA/CD ou jeton "Token")

Pendant les dix dernières années, on a vu les constructeurs développer des réseaux de communication entre les diverses machines de leurs gamme (Telway de TELEMECANIQUE, Modway de MODICON, Kbus de JS, Sicoway de CEGELEC... Ces réseaux sont qualifiés de réseaux homogènes ou réseaux "propriétaires" mais chaque introduction d'une machine d'un autre constructeur dans le réseau nécessite des développements longs et spécifiques.

L'ISO (International Standards Organisation) a proposé une normalisation de toute la problématique des échanges entre systèmes ouverts (OSI : Open Systems Interconnexion) selon une approche en sept couches.



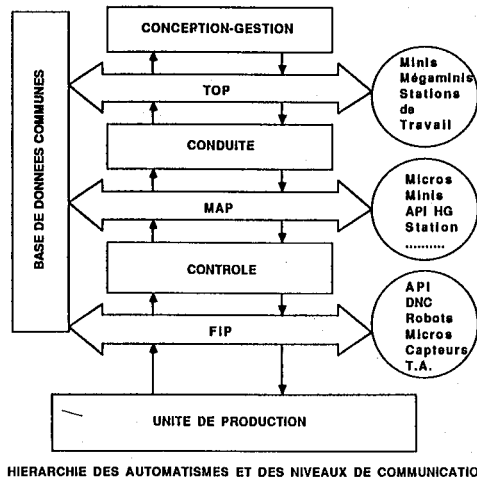
Les sept couches du modèle OSI ont pour fonctions respectives :

- . Physique : décrit les interfaces mécaniques et électriques et les protocoles d'échanges de bits.
- . Liaison : permet le transport fiable d'informations entre systèmes directement connectés.
- . Réseau : réalise l'acheminement et le routage au travers du réseau.
- . Transport : fragmente les messages pour le transport et les restitue à l'arrivée.
- . Session : fournit les outils de synchronisation et de dialogue entre les entités communicantes.
- . Présentation : se préoccupe de la syntaxe des informations échangées: messages, documents, fichiers.

Ceci a incité certains constructeurs à développer des réseaux qualifiés d'hétérogènes parce que susceptibles d'accepter des machines de types et de marques différentes. Les promoteurs de ces réseaux plus universels ont été en France APSYS avec Factor, COMPEX avec Lac, CERCI avec Arlic..

A partir de 1984, un grand mouvement de rassemblement des utilisateurs a été orchestré aux USA par General Motors sous le sigle MAP (Manufacturing Automation Protocol). Les pays européens ont emboîté le pas de cette mouvance (création de l'EMUG) et l'avènement d'une standardisation des communications en informatique de production semblait proche. En réalité ceci a conduit à une réflexion plus approfondie qui montre que les problèmes sont plus complexes... et l'idée d'un réseau de communication standard unique sur lequel on pourrait connecter des capteurs ou des actionneurs intelligents, des robots ou des automates programmables, des stations de CAO ou des terminaux d'atelier est difficilement envisageable pour des raisons à la fois techniques et économiques. MAP est actuellement figé pour quelques années à sa version 3.0.

Parallèlement le concept de bus de terrain (Field bus) s'est traduit en France par un mouvement de coopération entre de nombreux industriels au sein du club FIP (Factory Instrumentation Protocol). Les travaux du club FIP, s'appuyant sur la réalisation d'un circuit intégré FIP et sur des expérimentations en vraie grandeur à EDF, sont proposés pour normalisation au niveau international.



#### 2.4 La Conception et la Fabrication Assistée par Ordinateur (CAO et CFAO)

La CAO s'est développée originellement dans les secteurs de la mécanique et de l'électronique mais toutes les activités de création sont ou seront touchées par cette technique, notamment l'architecture, le bâtiment et le génie civil, l'électronique, le textile, le bois, l'optique, la chimie, la création artistique...

La CAO évoque le dessin et la représentation graphique des objets que l'on se propose de réaliser, mais les services rendus à l'utilisateur par un système de CAO vont bien au-delà. Par exemple, la CAO permet :

- la conception d'objets techniques de formes géométriques complexes avec calculs intégrés de résistance des matériaux, détermination de propriétés thermiques, ou électriques...
- la conception d'un circuit imprimé ou intégré avec détermination des routages pour la réalisation en mono couche ou multicouches et simulation du circuit.
- la détermination des postes de travail, des réseaux de manutention, la configuration de l'atelier et la simulation de divers aspects tels les temps de cycles, les évitements de collisions...

L'extension du même logiciel permet d'aller de la conception du produit jusqu'à la programmation des machines à commande numérique qui vont le réaliser ; on parle alors de CFAO : Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur. Par exemple, en mécanique, la chaîne CFAO recouvrira les opérations suivantes :

- Conception et dessin des pièces dans leur repère propre.
- Choix et dessin des bruts.
- Génération des gammes d'usinage.
- Vérification graphique des usinages, détermination des temps opératoires et calcul des coûts.
- Génération des programmes d'usinage en langages de haut niveau (APT, IFAPT, PROMO...), codage en langage ISO et directement en langage machine cible via les post - processeurs d'adaptation - Téléchargement des machines, exécution, relevé des paramètres réels de l'opération et enrichissement des modèles pour les usages ultérieurs.

On observe à travers cet exemple que le même produit se voit associer une représentation qui le suit au cours du processus de production.

En modélisation géométrique on distingue la modélisation 2D qui correspond à la représentation utilisée par le dessinateur travaillant de manière conventionnelle sur une planche à dessiner. En ce qui concerne la modélisation tridimensionnelle, on distingue divers niveaux de complexité des représentations :

- *le modèle "fil de fer"* pour lequel les objets sont représentés dans l'espace par les arêtes d'intersection des différentes surfaces qui les composent. Il n'y a pas de notion de matière.
- *le modèle par "facettes"* dans lequel toutes les surfaces de l'espace sont approximées par un certain nombre de facettes planes. Le principal avantage est de n'avoir à manipuler que des plans et des polygones et toute surface même sans représentation analytique est représentable.

- *l'approche par modélisation des volumes (solid modeling)*. Le principe est de modéliser des entités élémentaires (cubes, cylindres, sphères, cônes...) et d'utiliser un ensemble d'opérateurs (intersection, union, addition...) qui permet de décomposer un volume de l'espace en volumes élémentaires. Cette représentation qui intègre la notion de matière est moins encombrante du point de vue de la structure de données que la présentation à facettes, mais elle est plus restrictive quant aux types d'objets représentables.
- *la modélisation par surfaces gauches*. Si on cherche à modéliser finement des objets existants, par exemple un corps humain ou une carrosserie d'automobile, ou à concevoir un objet répondant à des critères esthétiques, les méthodes précédentes sont inopérantes. On établit un maillage serré de points sur l'objet, obtenus par machine à mesurer ou par calcul et on utilise des courbes ou surfaces définies par des fonctions polynomiales paramétriques (polynômes de BEZIER, de COONS...).

On utilise maintenant en CAO, les acquis de la synthèse d'image pour la représentation en volume, en couleur, avec effet d'ombrage des objets techniques (technique de Ray Tracing). On parle d'images réalistes qui servent désormais en esthétique industrielle et en publicité.

Le marché de la CFAO se partage en France, entre une cinquantaine de fournisseurs que l'on peut classer en :

- Constructeurs de machines informatiques structures d'accueil : IBM, PRIME, DEC, HP, SUN, BULL,...
- Fournisseurs d'ensembles intégrés : APPLICON, INTERGRAPH, CALMA, PRIME, FERRANTI, PAFEC, MATRADATAVISION, SELENIA, CN INDUSTRIE, CADKEY, CISIGRAPH, Mc DONNEL DOUGLAS...
- Constructeurs de logiciels : DASSAULT SYSTEMES, MAC DONNEL DOUGLAS, MATRA DATAVISION, XAO INDUSTRIE, CISIGRAPH, ASSIGRAPH, SERBI, CETIM, ...
- Fournisseurs de périphériques graphiques et de péri-CAO : TEKTRONIX, WESTWARD, DATATYPE, SECAPA, ...
- Fournisseurs de matériel de bureau d'étude : VESATEC, BENSON, CALCOMB, REGMA, UNIC, ...

La CFAO évolue aujourd'hui vers une adéquation plus grande aux exigences de l'utilisateur final. L'ère des grands logiciels à usage universel est révolue et les développeurs d'aujourd'hui disposent d'ateliers de génie logiciel qui leur permettent par des approches modulaires de concevoir des "progiciels métiers": poste de l'ingénieur, de l'automaticien, progiciel de schématique, de tuyauterie...

## **2.5 Les Machines à Commande Numérique**

En mécanique, l'appellation machine-outil recouvre essentiellement toute machine électromécanique de production par enlèvement de matière, capable de mettre en relation géométrique avec des positions, des vitesses, et des efforts maîtrisés une pièce à usiner et un outil de coupe. Les machines adaptées à des tâches particulières portent des noms précis tels les tours, les fraiseuses, les perceuses, les rectifieuses,... Une recherche d'universalité a permis de créer des machines polyfonctionnelles : les centres d'usinage. En 1949 est présentée au MIT la première démonstration de pilotage d'une fraiseuse par une machine informatique. Le pilotage numérique des machines va se développer et donner naissance au sigle M.O.C.N. (Machine-Outil à Commande Numérique). La France dispose d'un parc de 650 000 machines-outils environ dont 60 000 seulement sont à commande numérique.

Le concept de machine à commande numérique ne saurait toutefois se limiter au seul domaine de l'usinage en mécanique. Plus généralement, toute machine de production pilotée par un système informatique appartient à cette classe des machines à commande numérique. Leur dénominateur commun est d'être programmables. Cette caractéristique apporte une grande flexibilité dans l'usage de la machine, mais en plus de la programmation, les machines doivent satisfaire à des contraintes de communication. La machine ne travaille plus isolément mais contribue à l'ensemble du système de production.

Tous les secteurs de l'industrie font un usage abondant des machines à commande numérique, par exemple :

- les machines à bobiner les moteurs électriques
- les machines d'insertion des composants électroniques sur les circuits imprimés
- les machines de découpe des matériaux souples, cuir, textile, plastique... par laser ou jet d'eau



- les presses à mouler ou à injecter dans les industries plastiques
- une machine à imprimer ou à photocopier
- une mini chaise automatique de développement de photos
- les machines de métrologie à mesurer en trois dimensions...

La majorité des machines à commande numérique comprennent quatre sous-ensembles principaux : la machine, le directeur de commande numérique (encore appelé unité de gouverne ou contrôleur), l'armoire de puissance et le pupitre opérateur.

Une machine spéciale comme le mot l'indique est une machine de production construite en un ou quelques exemplaires pour une fonction très spécifique. La machine spéciale présente a priori une très grande productivité mais une faible flexibilité.

Les principaux constructeurs de directeurs de commande numérique au monde sont : FANUC (50 000 U/an), MITSUBISHI, SIEMENS, HEIDENHAIN (7 000 U/an).

Parmi les principaux constructeurs ou diffuseurs de machines-outils sur le marché français sont :

Centres de tournage : YAMAZAKI, COMAU, HES, GILDEMEISTER, MANHURIN, OERLIKON, SCULFORT...

Centres de fraisage : YAMAZAKI, CINCINNATI MILACRON, FOREST, GRAFFENSTADEN, HES TOYODA, MANDELLI, SAGEM,...

Machines à mesurer en tridimensionnel ou MMT : DENDIX, D.E.A., LEITZ, MAUSER, ZEISS, OLIVETTI, SAGEM, SEIV MEASURE,...

Sociétés de services en machines-outils : CN INDUSTRIE, SAPEX, CITROEN INDUSTRIE,...

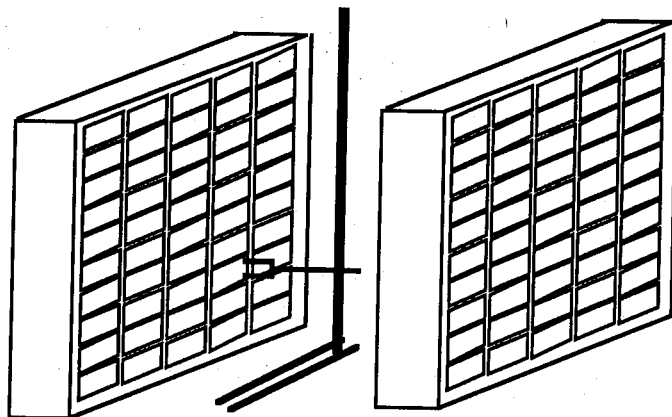
## 2.6 La "Transitique" : les fonctions Stockage, Convoyage, Manutention, Identification.

Dans un atelier de production, les matières premières, les pièces en cours de fabrication, les outils nécessaires aux diverses machines, doivent pouvoir être stockés ou amenés au bon moment et au bon endroit. L'ensemble des moyens techniques mis en oeuvre pour satisfaire ces besoins s'appelle parfois "transitique".

### 2.6-1 La fonction stockage

Le stockage concerne les matières premières, les outils, les pièces de rechange et les produits finis. Un stock est caractérisé par le nombre de références, par les quantités et par les débits des divers objets stockés. Ces données et le mode de gestion du stock permettent de déterminer le stock du point de vue statique et dynamique. L'état du stock sera connu par un système de gestion de base de données qui est l'image informatique du stock réel. Ceci impose que toutes les entrées sorties du stock soient communiqués au gestionnaire de la base soit par des procédures de saisie manuelle ou automatique. Au niveau technologique, on distingue principalement :

- les transtockeurs : Ils sont constitués par des rangées d'alvéoles, accessibles par un chariot mobile qui se déplace dans les travées en x (axe longitudinal), en z (axe vertical), et dispose d'un moyen de préhension en y (axe horizontal). Si le magasinage est automatique, le robot mobile doit être à commande numérique selon x, y, z et les divers objets doivent être conditionnés selon une présentation standard (notion de palette).



- les stockeurs rotatifs verticaux ou horizontaux : Le stockage rotatif vertical (cf. fig.) est bien adapté pour les petits objets (composants électroniques, visserie, produits pharmaceutiques, quincaillerie.). On atteint des débits d'entrées sorties de l'ordre d'une centaine à l'heure. Les stockeurs rotatifs horizontaux sont utilisés pour des objets de taille moyenne. Moins ergonomiques ils sont très utilisés aux USA et peu en France.

### **2.6-2 La fonction convoyage manutention**

La mise en relation des objets techniques à fabriquer avec les postes de production impose les déplacements des uns par rapport aux autres. Cette fonction comprend donc la prise et la dépose des objets (manutention) et leur transfert de poste à poste (convoyage).

Le degré d'automatisation de la fonction convoyage manutention s'apprécie en termes de flexibilité par rapport aux positions pour la manutention et par rapport aux trajectoires lors des transferts.

On peut distinguer :

- la manutention aérienne avec les convoyeurs à chaînes et balancelles, les chariots automoteurs sur rails aériens.
- la manutention au sol sous forme de bandes transporteuses, de bandes à rouleaux, de chariots avec conducteurs éventuellement radio-guidés, de chariots sur rails...
- les chariots automoteurs (AGV ou Automatic Guided Vehicle) : C'est la technologie la plus récente et présentant la plus grande automaticité et la plus grande flexibilité. Les chariots automoteurs constituent des robots mobiles pour lesquels les problèmes techniques à résoudre sont la localisation nécessaire au guidage, la communication, et l'autonomie énergétique.

Le guidage par fil conducteur enterré dans le sol est le plus répandu (chariots filoguidés). Le fil parcouru par un courant alternatif crée un champ magnétique capté par des bobines de guidage placées sous le chariot. Le chariot sait suivre le fil mais il ne sait pas pour autant où il se trouve dans l'atelier et ce qu'il doit faire. La fonction communication peut être assurée en modulant le signal porteur. Le circuit comprenant généralement plusieurs boucles, le chariot se trouve "désespéré" à l'approche des aiguillages, il est nécessaire de créer des

circuits virtuels en appliquant plusieurs fréquences dans le fil. La communication d'informations avec le poste de pilotage s'opère au niveau de *plots de dialogue*. Ce sont des boucles d'induction enterrées dans le sol, placées en des endroits précis sur lesquels le robot vient se positionner et dialoguer par impulsions codées avec le système de pilotage. L'autonomie énergétique est assurée par des batteries embarquées qui sont rechargées au niveau de *plots de maintenance* (biberonnage).

On signalera d'autres solutions techniques au problème de la localisation guidage. Le guidage optique ou par courants de Foucault s'apparente au filoguidage. On qualifie ces techniques de passives car la voie n'émet pas et par conséquent on ne peut l'utiliser pour la communication.

*L'odométrie* permet par intégration des mouvements du robot de connaître sa position. Cependant on se trouve en boucle ouverte et le cumul des erreurs de glissement ou de perte de pas des capteurs conduit à une localisation non fiable.

La localisation par balises infra-rouge ou par ultra-sons associée à une communication radio supprime toute installation figée au sol et devrait être appelée à se développer pour ces raisons.

Les robots automoteurs font maintenant l'objet d'une offre commerciale en plein essor. Parmi les principaux offreurs citons : Caterpillar, CRT, la Compagnie Générale de Productique (CGP), Fata, Saxby, Jungheinrich, Dermag, Lansing, Bretagne Automatismes, ...

### 2.6-3 La fonction identification

Le moyen technologique le plus répandu est le code à barres. Le code le plus connu est l'EAN qui peut coder jusqu'à 13 caractères, le code 39 (43 caractères: lettres, chiffres, caractères spéciaux). Les lecteurs sont variés entre le crayon lecteur, les lecteurs à balayage laser, les caméras. On annonce des vitesses de 200 lectures par seconde à des distances de 10 mètres avec des taux d'erreurs de un caractère pour trois millions. Les principaux inconvénients du code à barres sont la difficulté de décoder dans des environnements sales et poussiéreux, l'impossibilité de modifier les messages dont la taille est de surcroît limitée.

Les étiquettes électroniques sont une invention française. Il s'agit de plaquettes contenant une mémoire jusqu'à 2Ko, pouvant être écrite et lue par couplage inductif. La distance entre les têtes de lecture ou d'écriture fixes et l'étiquette mobile liée à l'objet à identifier, est de quelques centimètres. Les deux fabricants les plus connus sont Statec et Balogh.

## 2.7 Les robots

On peut définir un système robotique comme étant un ensemble mécanique motorisé et instrumenté dont les divers degrés de mobilité sont pilotés en position, en vitesse et éventuellement en force par une machine informatique et qui est destiné à se substituer totalement ou partiellement à l'homme dans une tâche sur un environnement physique.

L'analyse typologique de la robotique actuelle conduit à présenter quatre classes principales de systèmes robotiques :

- les manipulateurs "tout ou rien" (robots "pick and place" en anglais) sont des machines dotées de capteurs logiques et qui peuvent atteindre un nombre fini de positions dans l'espace. Leur commande est essentiellement logique et typiquement assurée par des automates programmables. Ils servent essentiellement aux fonctions de manutention, de palettisation, de chargement et de déchargement de machines.
- les télémanipulateurs sont des machines dont les divers degrés de mobilité sont asservis en position et dont les points de consigne des asservissements sont pilotés par un opérateur humain au moyen d'un pantin ou d'un bras maître (structure maître esclave). L'homme reste ici impérativement présent dans la boucle de commande mais peut être assisté par la partie informatique pour des sous-tâches répétitives ou délicates, ou par la partie énergétique par une amplification en puissance.

Les principales applications concernent les interventions dans les milieux hostiles à l'homme : nucléaire - sous-marin - spatial - incendies - manipulations de charges lourdes.

- les robots à trajectoire asservie ou robot "play back" représentent l'état de l'art de la robotique industrielle aujourd'hui et servent principalement aux opérations de soudage point par point ou à l'arc, à la peinture, la découpe, l'assemblage... Leur programmation se fait le plus souvent par apprentissage mémorisation d'une tâche à l'aide d'une boîte à boutons, suivi d'une répétition cyclique. La programmation textuelle permet d'introduire des possibilités de répétition et d'aiguillages dans la programmation des tâches. Les principaux langages de robotique sont KATEL, VAL2, AML, RAIL... La

programmation hors ligne par CAO apporte, en plus de la fonction programmation, des aides à l'implantation des systèmes robotiques, à l'évitement d'obstacles à la détermination des temps de cycles. Les principaux logiciels de CAO robotique sont CATIA, ROBOTICS, ROBOCAD.

- les robots de troisième génération qui intègrent les acquis les plus récents de la recherche se caractérisent par trois composantes principales:
  - . une composante technologique liée à la mise en oeuvre de moyens de perception évolués (vision - tactile - effort - sonore).
  - . une composante méthodologique introduisant dans la commande des systèmes robotiques les acquis récents de l'intelligence artificielle.
  - . une interaction homme machine à un niveau sémantique de plus en plus élevé.

Ces machines relèvent encore essentiellement de la recherche mais leur développement sert de moteur à l'avènement du machinisme intelligent.

Les grands constructeurs de robots dans le monde sont ABB (Asea Brown Boveri qui devient N°1 mondial après l'absorption de Cincinnati Milacron) et GMF (General Motors Fanuc). Les principaux constructeurs offreurs de systèmes robotiques français sont ACMA, AFMA, SEPRO, SORMEL, SCIAKY.

## 2.8 Les machines de vision

Les machines de vision constituent l'une des briques de base les plus récentes de la productique.

*Une machine de vision est une machine informatique dédiée composée d'un ou de plusieurs capteurs de vision, d'un environnement matériel et logiciel spécialisés et qui est destinée à se substituer totalement ou partiellement à l'homme dans une tâche où il utilise son sens visuel.*

La visionique s'est développée aux USA à partir de 78-80 et en France à partir de 82-83. Les principales applications en productique sont :

- l'inspection qui recouvre l'aspect quantitatif (contrôle dimensionnel) et l'aspect qualitatif (contrôle qualité), qui aboutit à une décision binaire d'acceptation ou de refus d'une pièce et

représente plus de 70 % des applications actuelles.

- la reconnaissance des formes avec classification : cette rubrique recouvre la reconnaissance d'objets différents par nature ou différents par leurs positions d'équilibre et la lecture optique sur divers supports et représente plus de 20 % des applications.
- le guidage et contrôle des robots dont les premières applications types sont le suivi de joint de soudure et l'évitement d'obstacles et qui avec le développement de la robotique mobile autonome devrait croître en importance.

On compte en France en 1991 plus de trente entreprises offrant des produits ou des services et près de 1000 machines installées. Citons, parmi les offreurs Allen Bradley, ITIMI, I2S, Digital Design, Dicom, Edixia, EIA, Adept, Elsag, ...

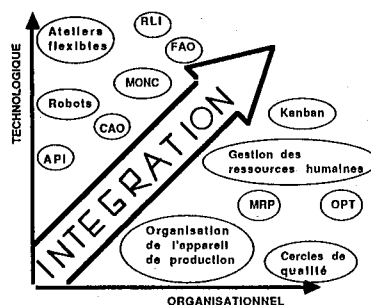
## 2.9 La Gestion de Production Assistée par Ordinateur (GPAO)

Pour augmenter la productivité d'une entreprise, on peut à priori agir sur deux leviers principaux : le technique et l'organisationnel.

Le levier technique consiste à introduire dans l'unité de production des moyens techniques nouveaux, CAO, robots, MOCN, API ...

Le levier organisationnel consiste à penser en amont l'ensemble du processus de production, à organiser au mieux l'implantation géographique des services et des machines, à gérer de manière optimale les flux de matière et d'information... et les hommes.

Certes ce n'est pas le choix de l'un ou l'autre et les deux moyens doivent être utilisés en harmonie mais il faut accorder une relative priorité à l'organisationnel sur le technique tant il serait absurde de robotiser un système de production mal organisé et mal géré.



La gestion de la production en régulant les mouvements de matières dans l'entreprise depuis l'entrée des matières premières jusqu'à l'expédition des produits finis a pour buts :

- de raccourcir les délais de fabrication
- de diminuer les stocks d'encours qui pèsent sur la trésorerie de l'entreprise
- de réduire les coûts de production
- d'améliorer la qualité

Un sur-ensemble de ces objectifs, incluant la maîtrise de la qualité et une maintenance des outils de production est résumé dans un leitmotiv connu sous le nom de règle des cinq zéros :

**"Zéro défaut - zéro délai - zéro stock - zéro papier - zéro panne"**

Au niveau pratique, la gestion de production recouvre les principales fonctionnalités suivantes :

Gestion des données techniques

fichiers articles  
fichiers des clients  
fichiers des moyens de production  
fichiers des gammes

Planification de la production

plan prévisionnel de production  
calcul des besoins  
détermination des coûts de production

Gestion des matières

gestion des stocks  
gestion des commandes fournisseurs  
gestion des commandes clients

Gestion de la fabrication

ordonnancement des tâches  
lancement des fabrications  
calculs des coûts réels.



Il ne semble pas qu'il y ait une méthode unique et générale de gérer la production d'une entreprise. En effet, les problèmes se posent de manières très différentes selon que l'on doit produire des grandes séries ou des productions unitaires, sur commande ou sur programme.

La méthode MRP (Manufacturing Resource Planning), d'origine américaine date des années 1965 et est la plus utilisée dans le monde. MRP2, la version actuelle s'efforce de répondre aux trois questions : Que produire ? Quand produire ? Combien produire ?

La méthode KANBAN promue par Toyota Motor doit son succès aux réussites de la productique japonaise.

On peut appréhender la compréhension des deux approches en disant que MRP est une méthode conceptuelle et dirigiste dans laquelle les postes de travail sont chargés à périodes fixes en fonction du planning des commandes. Au contraire en KANBAN c'est chaque poste de travail qui commande à son poste amont le remplacement des pièces qu'il consomme. On résume en disant que MRP est une méthode à flux poussé par opposition à KANBAN qui est une méthode à flux tiré.

Une autre alternative est la méthode OPT pour Optimized Production Technology, développée par Creative Output. L'idée forte est de privilégier le contrôle des flux en localisant les "goulots d'étranglement" plutôt que de focaliser l'intérêt sur les stocks.

On peut recenser plus de 160 progiciels diffusés en France. Citons quelques uns des plus connus :

- Mapics et Copics (IBM)
- IMSTD (BULL)
- Tzar (Production Systems)
- IMCS2 (NCR)
- Tolas (GSI Industrie)
- MM/PM 3000 (HP)
- Prodstar (Prodstar SA)

Au delà de MRP et de KANBAN et des progiciels, l'organisationnel rassemble tous les moyens, petits ou grands, susceptibles de contribuer à l'amélioration de la production. Citons quelques exemples :

les cercles de qualité d'origine japonaise sont une façon d'impliquer

le personnel de production dans l'amélioration des outils techniques, dans l'implantation des postes... et permettent de responsabiliser et d'intéresser le personnel.

- la TGAO ou Technologie de Groupe Assistée par Ordinateur est une technique qui consiste à rechercher dans la nomenclature des produits fabriqués par l'entreprise les relations de similitude permettant de recréer un effet de série entre différents produits pour utiliser au mieux un moyen de production. Les principaux logiciels sont Multiclass et OIR de l'Adépa.

### 2.10 La bureautique

La bureautique représente par rapport aux activités tertiaires ce qu'est la productique par rapport aux activités de production. Les distinctions entre activités secondaires et tertiaires tiennent principalement au fait que les résultats du travail de production se traduisent sous forme matérielle ou immatérielle dans l'un et l'autre cas. Néanmoins, l'objectif commun reste bien la productivité du travail.

Les outils techniques de la bureautique contribuent à accroître l'efficacité du travail y compris dans la production industrielle.

La bureautique recouvre l'ensemble des technologies qui permettent de générer de l'information, de l'échanger, de la reproduire et de la stocker.

Au niveau de la création des documents on trouve les logiciels de traitement de textes, les logiciels de dessin, les grapheurs, les tableurs, les gestionnaires de bases de données, les agendas électroniques. Les scanners et les logiciels de lecture automatique apportent une contribution à la saisie de l'information.

Au niveau de l'échange, on retrouve l'importance des réseaux de communication, qu'il s'agisse de réseaux locaux internes à l'entreprise ou des grands réseaux publics. L'échange sous forme papier (circulaire) reste important et se modernise (télécopie) mais l'échange sans support matériel (courrier électronique) devrait se généraliser.

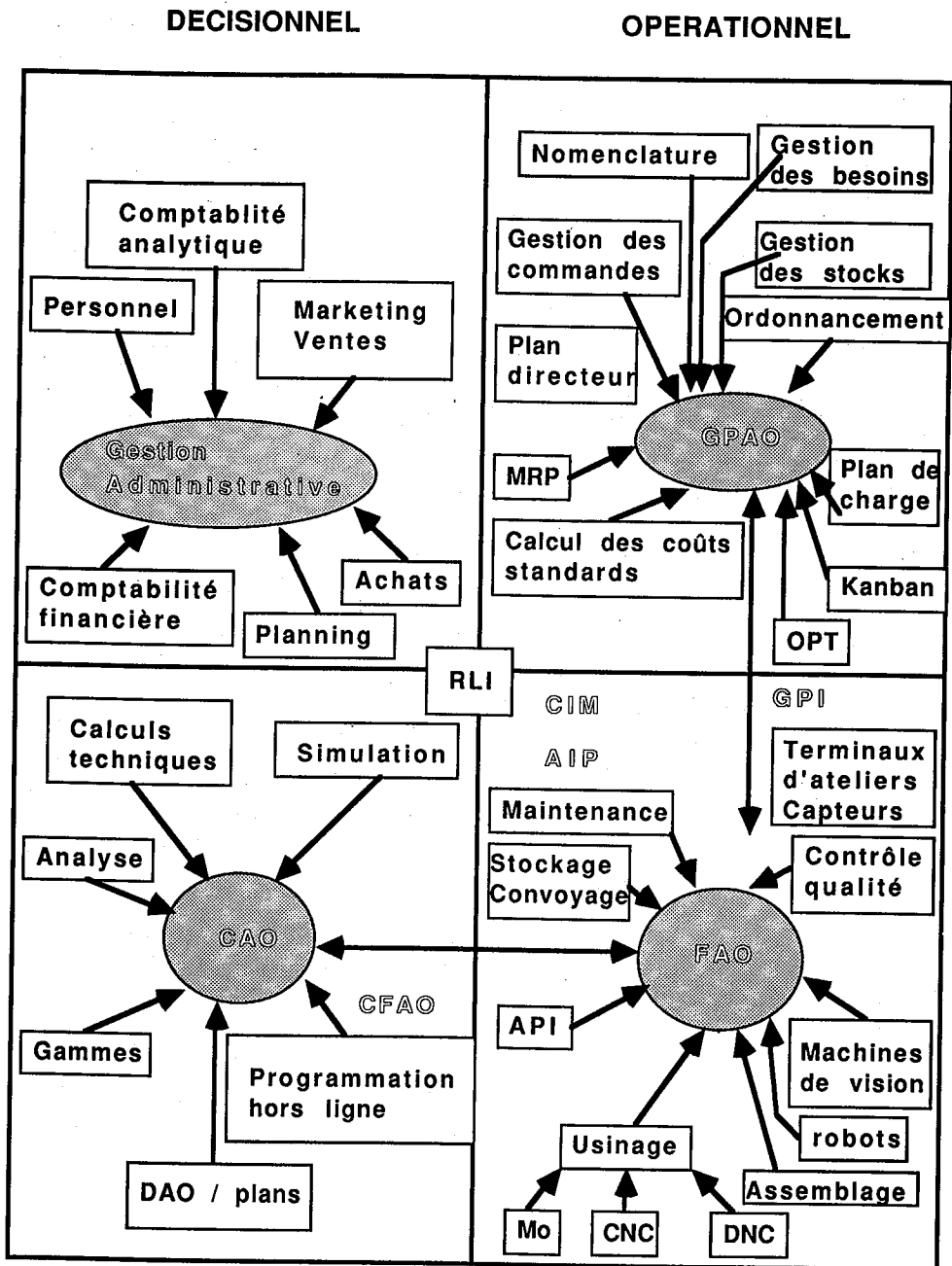
La fonction reproduction de l'information écrite atteint un haut niveau de technicité avec les machines de reprographie et de classement, les imprimantes à technologie laser...

La fonction archivage et stockage subit également de profondes mutations avec le

développement des mémoires optiques : DON (Disque Optique Numérique - CD ROM \_ Vidéodisque...).

### **Conclusion :**

Pour finir, nous illustrerons les divers concepts et l'historique de l'automatisation par le "carré magique" de la productique. L'entreprise peut être représentée par une matrice dont les deux lignes représentent l'organisationnel et le technique alors que les deux colonnes sont associées aux aspects décisionnel et opérationnel. Le coin nord-ouest du carré rassemble les diverses fonctions de la gestion administrative qui, historiquement, a été la première à être informatisée. Le coin sud-est, qui rend opérationnel la technique, concerne le coeur de la production et son informatisation est associée au sigle FAO. La jonction directe entre le sud-ouest CAO et le sud-est FAO illustre le concept de "CAD/CAM" apparu vers les années 75. La liaison entre la GPAO et la FAO traduit le concept de GPI (Gestion de Production Intégrée). Enfin, la mise en relation des quatre coins du carré magique grâce à la fonction communication (RLI), crée la synergie que les Américains ont conceptualisée sous le sigle CIM : Computer Manufacturing.



LE CARRE MAGIQUE DE LA PRODUCTIQUE