

Sciences industrielles pour l'ingénieur

1^{re} année

Classes préparatoires

Gérard Colombari

Ingénieur Arts et métiers, professeur de chaire supérieure, il enseigne en classes préparatoires au lycée Thiers à Marseille

Jacques Giraud

Ancien élève de l'École Normale supérieure de Cachan, professeur de chaire supérieure, il a enseigné en classes préparatoires et en particulier en PT* au lycée Jean-Perrin Marseille

Tous deux ont participé aux jurys de nombreux concours : CAPET, Agrégation et Grandes Écoles

Sommaire

Avant-propos.....	3
Sommaire	4

Étude des systèmes

1.	Étude fonctionnelle des systèmes.....	10
1.1.	Présentation générale	10
1.2.	Étude fonctionnelle des systèmes.....	13
1.3.	Étude structurelle des systèmes	21
Synthèse 1.	Pour faire le point des connaissances sur l'étude des systèmes	24
Méthodologie 1.	Étude fonctionnelle des systèmes.....	25

Cinématique du solide indéformable

2.	Définitions des concepts utilisés en cinématique	27
2.1.	Référentiel : l'espace-temps. Position d'un point dans un référentiel	27
2.2.	Changement d'espace.....	30
2.3.	Déplacements d'un point par rapport à un repère.....	36
3.	Outils de dérivation vectorielle utilisés en mécanique	39
3.1.	Dérivée d'un vecteur par rapport à un repère.....	39
3.2.	Dérivation composée d'un vecteur.....	41
3.3.	Composition des vitesses de rotation	42
4.	Solide indéformable	45
4.1.	Champ des vecteurs vitesse d'un milieu continu.....	45
4.2.	Solide indéformable, repères associés.....	46
4.3.	Propriétés du champ des vitesses d'un solide indéformable	47
4.4.	Composition de mouvements de solides	50
5.	Applications.....	53
5.1.	Mouvements particuliers	53
5.2.	Mouvement plan sur plan	55
Synthèse 2.	Pour faire le point des connaissances sur les concepts utilisés en cinématique	59
Synthèse 3.	Pour faire le point des connaissances sur les outils de dérivation vectorielle	60
Synthèse 4.	Pour faire le point des connaissances sur la cinématique du solide.....	61
Méthodologie 2.	Techniques de calculs : vitesses et accélérations.....	63

Modélisation cinématique et géométrique des liaisons

6.	Liaisons entre deux solides	68
6.1.	Liaisons normalisées entre solides, degrés de mobilité entre deux solides liés	68
6.2.	Paramétrage géométrique de la situation d'un solide par rapport à un autre.....	71
6.3.	Géométrie des contacts.....	71
7.	Chaînes de solides	77
7.1.	Chaînes ouvertes, fermées, complexes	77
7.2.	Liaison cinématiquement équivalente	78
7.3.	Graphe de structure	79
7.4.	Schéma cinématique	80
7.5.	Analyse géométrique d'une chaîne fermée.....	80
7.6.	Analyse cinématique d'une chaîne fermée (boucle) de solides	82
Synthèse 5.	Pour faire le point des connaissances sur la modélisation cinématique et géométrique des liaisons	83
Méthodologie 3.	Techniques de calculs : la vitesse de glissement	85

Systèmes linéaires continus invariants

8.	Introduction générale à l'automatique	87
8.1.	Introduction – Aspects généraux.....	87
8.2.	Divers systèmes automatiques – Exemples.....	89
8.3.	Historique	91
8.4.	Structure d'un système asservi.....	91
9.	Commande de système asservi ou en chaîne directe	93
9.1.	Commande en chaîne directe.....	93
9.2.	Perturbations.....	95
9.3.	Commande asservie	95
9.4.	Schéma-bloc général d'un système asservi.....	98
9.5.	Comportement dynamique	99
9.6.	Exemples de systèmes dynamiques	101
9.7.	Équations différentielles d'un système dynamique	102
10.	Outils de représentation des systèmes linéaires continus invariants	103
10.1.	Modélisation de la chaîne d'énergie d'un système asservi	103
10.2.	Entrées types (entrées canoniques).....	106
10.3.	Systèmes linéaires continus invariants	110
10.4.	Fonction de transfert	111
10.5.	Schémas-blocs	111
10.6.	Algèbre des schémas.....	114
10.7.	Schémas physique et informationnel	115
11.	Fonctions de transfert : ordre et identification	117
11.1.	Système du premier ordre	117
11.2.	Système du second ordre.....	121
11.3.	Caractérisation de la fonction de transfert d'un système	126
11.4.	Identification.....	128
12.	Performances des systèmes bouclés	133
12.1.	Caractéristiques comportementales	133
12.2.	Précision.....	134

12.3.	Rapidité	137
12.4.	Dépassement.....	138
12.5.	Influence du gain de la chaîne directe sur le comportement temporel	138
12.6.	Réponse harmonique d'une fonction de transfert du 1er ordre	139
12.7.	Étude harmonique	141
12.8.	Réponse harmonique : système du 1er ordre.....	142
12.9.	Réponse harmonique d'un système du 2e ordre	146
12.10.	Technique de tracé d'une fonction quelconque	150
13.	Étude de cas	154
13.1.	Asservissement de vitesse angulaire	154
13.2.	Asservissement de position angulaire.....	157
13.3.	Asservissement de position longitudinale (cas 1 – Mesure directe de la position)	160
13.4.	Asservissement de position longitudinale (cas 2 – Mesure indirecte de la position)	162
Synthèse 6.	Pour faire le point des connaissances sur les systèmes linéaires continus invariants ...	165
Méthodologie 4.	Pour l'étude des systèmes linéaires continus invariants	167

Statique des solides

14.	Modélisation des actions mécaniques	170
14.1.	Modélisation locale.....	170
14.2.	Modélisation globale d'une action mécanique, torseur d'effort associé.....	172
14.3.	Lois de Coulomb.....	177
14.4.	Résistance au roulement et au pivotement	178
14.5.	Liaisons sans frottement	180
15.	Isolement d'un ensemble matériel	184
15.1.	Définition d'un ensemble isolé.....	184
15.2.	Concepts d'efforts extérieurs et intérieurs.....	184
16.	Principe fondamental de la statique	186
16.1.	Équilibre d'un solide, équilibre d'un ensemble de solides	186
16.2.	Principe fondamental de la statique, théorèmes généraux	186
16.3.	Applications	188
Synthèse 7.	Pour faire le point des connaissances sur la statique.....	198
Méthodologie 5.	Pour résoudre les problèmes de statique	200

Systèmes logiques – combinatoires et séquentiels

17.	Systèmes combinatoires	202
17.1.	Algèbre de Boole, variables logiques	202
17.2.	Codage de l'information.....	207
17.3.	Tableau de Karnaugh	210
17.4.	Réalisation des fonctions logiques.....	213
17.5.	Étude de cas : système logique combinatoire.....	215
18.	Systèmes séquentiels et fonction mémoire	219
18.1.	Définition	219
18.2.	Fonction mémoire.....	221
18.3.	État interne	225
18.4.	Étude de cas : système logique séquentiel.....	226
18.5.	Chronogrammes et diagrammes des phases.....	229

19.	Systèmes séquentiels et modèle GRAFCET	232
19.1.	État interne dans le cas d'une description en GRAFCET	232
19.2.	Systèmes séquentiels abordés.....	233
19.3.	Le GRAFCET : définition	236
19.4.	Lecture d'un GRAFCET	241
19.5.	Modes de sortie	244
19.6.	Évolutions fugaces.....	245
19.7.	Réceptivités	247
19.8.	Partition d'un GRAFCET.....	249
19.9.	Étapes et transitions sources et puits	251
19.10.	Performances et qualités d'une commande séquentielle	253
Synthèse 8.	Pour faire le point des connaissances sur les systèmes logiques combinatoires	258
Synthèse 9.	Pour faire le point des connaissances sur les systèmes logiques séquentiels simples ...	259
Synthèse 10.	Pour faire le point des connaissances sur les systèmes logiques séquentiels	260
Méthodologie 6.	Systèmes combinatoires : depuis la modélisation du problème jusqu'à la réalisation de la fonction sous forme de production d'un schéma de réalisation	262
Méthodologie 7.	Systèmes séquentiels simples	263
Méthodologie 8.	Systèmes séquentiels par GRAFCET	264

Ressources mathématiques

Relatives à la cinématique du solide indéformable	265
Relatives à la statique du solide	270
Relatives à la transformation de Laplace	271

Exercices

Exercices	275
1. Machine de découpage des poutres en matériau léger (d'après sujet e3a PSI 2010).....	275
2. Pompe turbo-moléculaire (d'après Centrale PSI 2009).....	276
3. Analyse fonctionnelle d'un drone miniature (d'après sujet Mines Ponts MP – PSI 2010)	277
4. Bras télémanipulateur (d'après sujet ENS Cachan)	278
5. Robot manipulateur (d'après sujet ENS Cachan)	279
6. Prise d'outil d'une machine à commande numérique (d'après sujet ENS).....	280
7. Vitesse en coordonnées sphériques.....	280
8. Étude d'un dédimètre massique.....	281
9. Étude d'un aérogénérateur (d'après sujet ENS)	281
10. Reprendre l'exercice 6	282
11. Reprendre l'exercice 9	282
12. Simulateur de vol (d'après sujet CCP-MP 2003).....	282
13. Machine de soudage automatisée (d'après sujet e3a MP 2010)	283
14. Dispositif centreur (d'après sujet ENS Cachan).....	285
15. Porte de la Tamise	286
16. Étude du mécanisme de guidage d'un volet d'aile d'avion (d'après sujet Centrale PSI 2004).....	287
17. Banc d'épreuve hydraulique de tubes en acier (d'après sujet CCP PSI 2010)	288
18. Mécanisme de Genève.....	289
19. Ascenseur (d'après Centrale Supélec MP 2004)	290
20. Calcul de la distance, d_{si} (d'après centrale PSI 2004)	290
21. Machines d'essais de prothèses fémorales (d'après sujet SI2 Banque PT 2004)	291
22. Étude d'un roulement à rouleaux	291
23. Engrenage conique (d'après sujet ENS).....	292
24. Réducteur à billes.....	292
25. Moteur de calage sur une ligne d'imprimerie (d'après École de l'air PSI 2004)	293
26. Étude d'un réducteur épicycloïdal	293
27. Étude d'un différentiel (d'après sujet ENS).....	294
28. Transmission à variation continue Vario-Fendt (d'après CCP MP 2008)	294

29.	Étude d'une machine de déchargement voir chargement de combustible nucléaire (d'après E3A MP 2004)	297
30.	Appareil de mammographie (d'après Centrale Supélec MP 2004)	297
31.	Liaisons en série : rotule et pivot glissant	298
32.	Liaisons en parallèle – liaisons rotule et sphère cylindre	298
33.	Liaison complète isostatique	298
34.	Étude de la transmission du coude d'une orthèse d'épaule (d'après sujet Centrale PSI 2010)	298
35.	Commandes des gouvernes d'un drone (d'après Mines Pont PSI 2010)	300
36.	Machine de découpe de poutres en matériau léger : étude cinématique (d'après sujet e3a PSI 2010)	300
37.	Compresseur	302
38.	Étude du comportement cinématique d'une table élévatrice (d'après Mines AADN PCSI 2004)	302
39.	Systèmes dynamiques et perturbations	304
40.	Représentation des systèmes linéaires continus invariants, algèbre de schémas blocs	304
41.	Système du premier ordre	305
42.	Système du premier ordre	305
43.	Système du premier ordre	305
44.	Système du deuxième ordre	305
45.	Système du deuxième ordre	306
46.	Identification	306
47.	Identification	306
48.	Identification	307
49.	Étude temporelle des systèmes bouclés	307
50.	Étude fréquentielle des systèmes	308
51.	Étude fréquentielle des systèmes	308
52.	Étude fréquentielle des systèmes	308
53.	Synthèse	309
54.	Identifier une fonction de transfert du premier ordre à partir d'une réponse fréquentielle (d'après Mines DACN 2003)	310
55.	Machine d'essai de traction (d'après Mines DACN 2003)	311
56.	Systèmes linéaires continus invariants (d'après banque PT 2010)	313
57.	Optimisation de la fonction : adapter la vitesse d'avance de la poutre (d'après sujet E3A PSI 2010)	314
58.	Étude de la commande du mécanisme de transfert (d'après Mines DACN 2004)	317
59.	Étude mécanique d'un drone (d'après sujet Mines Ponts PSI – MP 2010)	318
60.	Limiteur de couple	321
61.	Machine d'essais de matériaux de prothèse (d'après sujet SI2 banque PT 2000)	321
62.	Calcul d'un accouplement conique (d'après CCP PSI 2004)	322
63.	Modélisation globale du torseur d'action mécanique dans un mécanisme vis-écrou (d'après X.ENS PSI 2004)	323
64.	Arbre de transmission	324
65.	Sous-ensemble d'une machine d'essais (d'après sujet SI2 banque BT 2000)	325
66.	Banc d'essai de moteur de véhicule (d'après CCP PSI 2004)	325
67.	Roue libre à galets cylindriques	325
68.	Chariot robotisé, destiné à poser les fibres optiques dans des canalisations cylindriques (d'après Mines Pont 2004)	326
69.	Banc d'épreuve hydraulique de tubes en acier : sections des vérins (d'après sujet CCP PSI 2010)	327
70.	Étude statique d'un mécanisme de transformation de mouvement (d'après sujet ENS)	328
71.	Étude du mécanisme de commande d'un volet d'aile d'avion (d'après sujet Centrale PSI 2003)	329
72.	Étude de la motorisation d'une table élévatrice (d'après Mines AADN PCSI 2004)	330
73.	Équilibre d'une balance	331
74.	Étude du robot de manutention Lurpa F30 (d'après sujet ENS)	331
75.	Machine de découpe de poutres en matériau léger : motorisation de l'avance (d'après sujet e3a PSI 2010)	332
76.	Mandrin à leviers trois mors (d'après sujet ENS)	334
77.	Expressions logiques	335
78.	Fonction universelle	335
79.	Fonction inhibition	335
80.	Fonction NAND	335
81.	Code binaire	335
82.	Code 3 parmi 5	335
83.	Base 10 à base 2	335
84.	Identité remarquable	335
85.	Tableaux de Karnaugh	335
86.	Équations logiques	335
87.	Équations de schémas à contacts	336
88.	Installation de limitation de puissance	336
89.	Moteur principal de machine-outil	336
90.	Éclairage d'un couloir	337
91.	Modèle Grafcet	337
92.	Modèle test n° 1	337
93.	Modèle test n° 3	338
94.	Étude d'un graphe de comptage	338
95.	Rangement de paquets sur deux niveaux	338
96.	Contrôle de la position des trains (d'après Mines Pont M-PSI 2002)	339
97.	Étude d'un système de lecture avec codes à barres (d'après Mines DACN 2003)	341
98.	Réalisation d'un miroir (d'après E3A PSI 2004)	342
99.	Système de pesée embarquée (d'après École de l'air MP 2002)	343
100.	Commande volets de protection thermique d'une fenêtre de satellite (d'après Banque PT 2003)	346
101.	Étude de la fonction « Dérouter, entraîner et stocker la bande de papier » d'une ligne d'imprimerie (d'après Centrale MP 2003)	347
102.	Robot Robuglass : réalisation de la partie commande (d'après Mines dacn 2009)	350
	Solutions des exercices	353

ÉTUDE DES SYSTÈMES

Chapitre 1. Étude fonctionnelle des systèmes

- 1.1. Présentation générale
- 1.2. Étude fonctionnelle des systèmes
- 1.3. Étude structurelle des systèmes

Synthèse 1 Pour faire le point des connaissances sur l'étude des systèmes

Méthodologie 1 Étude fonctionnelle des systèmes

1. Étude fonctionnelle des systèmes

Problématique. Les sciences industrielles pour l'ingénieur permettent l'étude des systèmes techniques industriels existants : machines, systèmes de production, etc.

Ces réalisations, objets d'étude, se distinguent par :

- 1- leur **aspect artificiel** (non naturel), ils sont le résultat d'activités humaines, ils sont voulus, réalisés et utilisés par l'homme, ils répondent à un **besoin** exprimé ou latent ;
- 2- leur **complexité croissante**, l'avènement des technologies contemporaines conduit à utiliser le point de vue systémique pour leur étude.

L'étude de ces objets dans le cadre industriel se conduit selon plusieurs points de vue :

- **fonctionnel** : on s'intéresse à ce que fait le produit, quelle fonction il remplit ;
- **structurel** : on s'intéresse à ce qui constitue le produit, ses composants et constituants ;
- **temporel** : on s'intéresse à l'évolution et aux différences de comportement du système en fonction du temps ;
- **économique** : les systèmes répondant aux besoins de l'homme existent dans un cadre concurrentiel, les aspects économiques au moins qualitativement ne peuvent être ignorés.

Les objets étudiés en sciences industrielles pour l'ingénieur (SII) sont appelés des **systèmes industriels**.

1.1 Présentation générale

1.1.1 Définition

SYSTÈME : on appelle système un assemblage, une collection organisée (possédant une structure) d'objets reliés ou branchés (en interrelation) les uns aux autres de façon à former une entité ou un tout remplissant une ou plusieurs fonctions.

Le système est un produit artificiel de l'esprit des hommes.

Remarque. Un système n'est pas un ensemble, il ne suffit pas de connaître chaque composant individuellement pour connaître le comportement global du système.

1.1.2 Exemples

Le laboratoire de sciences industrielles pour l'ingénieur contient un certain nombre de systèmes de taille et de fonctionnement compatibles avec ce lieu :

- la cordeuse de raquettes de tennis ;
- le pilote automatique de bateau NAVICO ;
- le chariot filoguidé ;
- la direction assistée DIRAVI ;
- etc.

À l'extérieur du laboratoire, un grand nombre d'objets technologiques contemporains qui nous entourent sont des systèmes que l'on peut classer par domaine d'activité.

- Système du domaine aéronautique : un avion, mais aussi à l'intérieur de celui-ci son système de navigation, son pilote automatique ; éventuellement pour un avion militaire son système d'armes, etc.
- Système du domaine automobile : une voiture ou un camion mais aussi un système de climatisation. Sur certains véhicules récents, le système de freinage

antiblocage de roue (ABR ou ABS). On peut aussi envisager le système de production qui a permis de fabriquer cette automobile, lui-même composé de sous-systèmes assurant la réalisation de chacun des constituants de la voiture. Ces équipements possèdent des systèmes informatiques de contrôle.

- Système du domaine de l'électronique grand public : les différents équipements classiques que sont les téléviseurs, les téléphones portables, les magnétoscopes, les lecteurs de compacts disques mais aussi le système d'émission et de réception par satellite des signaux vidéos.

Le monde contemporain accumule les objets artificiels conçus par l'homme dont certains, plus récents, ne sont plus seulement des objets inertes comme des tables, des chaises ou des stylos et du papier mais des objets dotés de comportement comme un téléphone portable, un four à micro-ondes automatique ou un magnétoscope.

Il est donc important et intéressant d'analyser et de comprendre la nature et les caractéristiques de ces systèmes appelés à être de plus en plus nombreux dans notre environnement professionnel mais aussi personnel.

1.1.3 Contexte de l'étude

L'étude des systèmes et des outils nécessaires à cette étude est liée à l'histoire de chacun de ces systèmes dont le point de départ est l'analyse du besoin et la conclusion la mise au rebut.

Il faut distinguer deux états principaux d'un système :

- un système est *postulé*, les outils de description permettent de définir le système, de le modéliser tel qu'il sera ;
- un système est *existant*, les outils permettent de modéliser le système pour le comprendre et l'analyser, en vue de l'améliorer par exemple.

Trois points de vue sont retenus pour aborder le système, ce qui donne trois dualités d'étude souvent retenues en terme d'évaluation (figure 1.1).

- Les **fonctions** remplies par le système : ce pourquoi il a été conçu et réalisé. En partant du plus général (fonction principale) vers le plus particulier (fonctions élémentaires), un degré de finesse de description est à choisir (les fonctions sont à l'origine de la création du système).
- La **structure** ou **organisation** qui décrit le système tel qu'il est, c'est-à-dire une association de constituants. Le degré de finesse de la description est là aussi un paramètre délicat à préciser par l'utilisateur de l'outil.
- L'**évolution** ou le **comportement**, c'est-à-dire la manière dont il réagit (ou agit) à la suite d'une modification de son environnement par exemple. Le paramètre important est alors le temps.

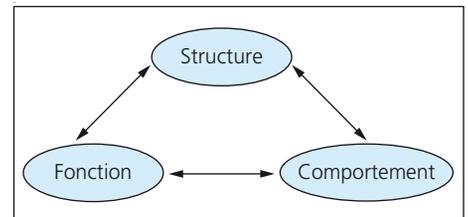


Figure 1.1 Trois points de vue et trois dualités

Chacun de ses trois aspects fait appel à des outils de description spécifiques.

L'**évolution** ou **comportement** des systèmes est représentée par les outils de la mécanique et de l'automatique sous forme d'expressions mathématiques fonctions du temps.

La **structure** est décrite au moyen de schémas structurels ou organiques propres à chaque technologie (mécanique, électrique, etc.) de réalisation utilisée.

L'**étude fonctionnelle des systèmes** se conduit de manière spécifique au moyen d'outils de description tels que FAST et SADT.

L'étude fonctionnelle fait l'objet de ce chapitre.

1.1.4 Cycle de vie d'un système

Afin de présenter les liens qui existent entre un système, son environnement et les différents intervenants sur ce système, il est classique de représenter la vie de ce système sous la forme d'un « V » (vé) ou plus précisément d'une « racine carrée » (figure 1.2).

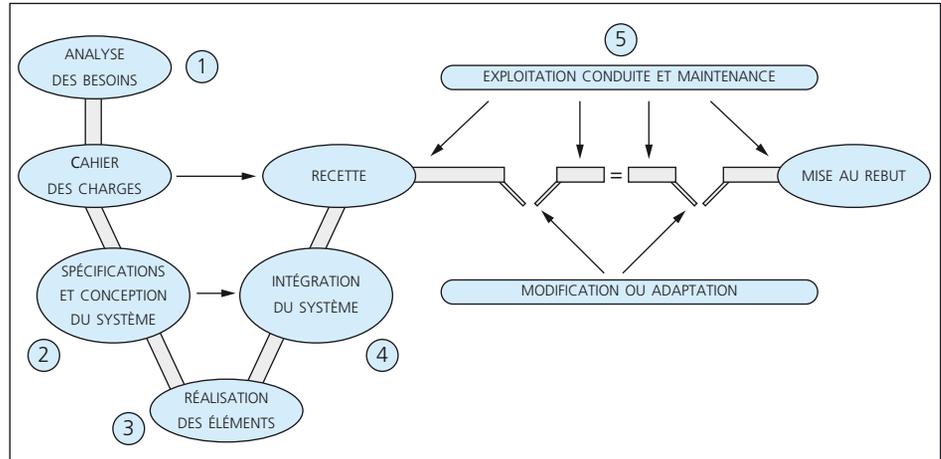


Figure 1.2 Représentation de la « conception » et de la « vie » d'un système

Les quatre premières phases correspondent à la création du système, elles se terminent par la recette c'est-à-dire la réception finale du système terminé et prêt à fonctionner. Pendant les phases 1 et 2, le système est postulé.

- **Phase 1 — Analyse du besoin et cahier des charges.** C'est la phase qui justifie la création d'un système et qui définit ce que devra faire ce système pour répondre à la raison qui a justifié son existence.
- **Phase 2 — Spécifications et conception du système.** C'est la phase qui permet de définir précisément ce que doit être le système, d'en choisir tous les composants et la manière dont ils seront reliés.
- **Phase 3 — Réalisation des éléments.** Au cours de cette phase de passage à la réalité l'ensemble des constituants matériels – pièces mécaniques, moteurs, cartes électroniques écrans de visualisation, etc. – et immatériels – programmes informatiques, logiciels, etc. – est réuni en vue de l'assemblage.
- **Phase 4 — Intégration du système.** C'est la phase de montage, d'assemblage des composants matériels et immatériels ; le terme intégration montre à quel point les interrelations sont étroites et multiples.
- La dernière phase correspond en fait à la vie réelle du système en fonctionnement depuis la recette jusqu'à la mise au rebut finale. Pendant cette phase le système existe dans son environnement.

Phase 5 — Exploitation, conduite et maintenance. C'est la phase de rentabilité du système, elle peut être entrecoupée de phases de modification, adaptation et amélioration du système que l'on présente sous forme de petits « V » (vé).

Remarque. Sur cette représentation de la vie d'un système, on peut marquer assez clairement les différents programmes de sciences industrielles pour l'ingénieur en classes préparatoires aux grandes écoles.

- MPSI-MP : le programme est centré sur la phase 5 et exclut les petits « V », l'objet est donc l'analyse de systèmes existants et la vérification des performances ;
 - PCSI-PSI : le programme est toujours sur la phase 5 y compris les petits « V », l'objet est donc l'analyse et la vérification des performances d'un système existant, mais aussi la proposition de modifications ;
 - PTSI-PT : le programme prend en compte l'ensemble de la vie du système, les cinq phases sont abordées et notamment la phase 2 de conception des systèmes.
- Dans tous les cas, les systèmes sont à dominante mécanique.

1.2 Étude fonctionnelle des systèmes

1.2.1 Objectif de l'étude

Les méthodes et outils d'étude fonctionnelle des systèmes sont à l'origine utilisés en phase de conception du système postulé (phase 2, figure 1.2).

Dans ce cas, le système est postulé et sa description est bien une conception et une création. L'utilisation de ces outils lorsque le système existe est *a priori* paradoxale puisque si le système existe alors il a été conçu préalablement et sa description fonctionnelle doit exister, elle aussi.

Nous avons vu que toute activité de type industriel autour des systèmes correspond à la recherche de la solution à un besoin exprimé ou latent. Aussi les descriptions retenues ne sont jamais exhaustives, elles se limitent à ce qui est utile, on dit que la description est réalisée selon un certain point de vue.

Le terme de fonction est très général. Dans le cadre de l'étude fonctionnelle des systèmes, il s'agit de définir quels services rend le système.

En phase de conception, l'étude fonctionnelle est utile à l'élaboration du cahier des charges fonctionnel, elle est normalisée : normes NF 50-150 à 50-153.

Le lecteur pourra se référer à ces normes pour aller plus loin dans son analyse.

Exemple L'AP25 est un outil d'« attachage » de la végétation de conception récente (figure 1.3). Cet exemple permet de suivre les différentes phases de la vie du système.

Contexte de l'étude : le besoin que cherche à satisfaire un système est souvent très spécifique et donc inconnu du grand public. L'AP25 est destiné aux vignerons et aux viticulteurs dont il faut connaître le travail pour comprendre les besoins.

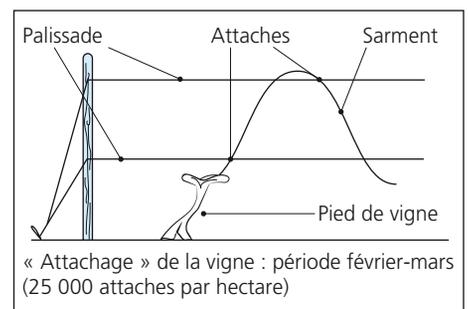


Figure 1.3 Attaches de pied de vigne

1.2.2 Expression fonctionnelle du besoin

La première phase d'étude du système est l'analyse du besoin.

On utilise classiquement la représentation de la figure 1.4 appelée « bête à cornes » pour répondre aux trois questions de base qui qualifient le besoin d'un produit.

- À qui (à quoi) rend-il service ?
- Sur qui (sur quoi) agit-il ?
- Pourquoi (dans quel but) ?

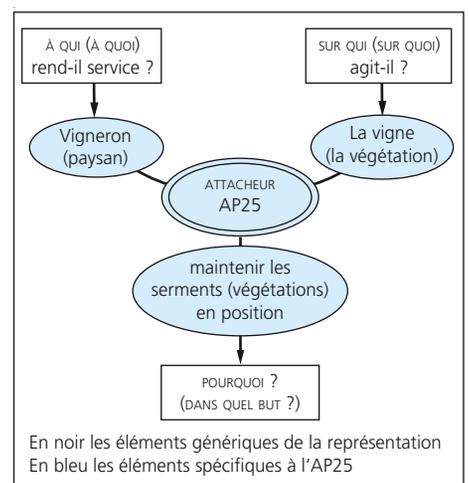


Figure 1.4 Expression du besoin

1.2.3 Étude fonctionnelle externe

Pour décrire fonctionnellement un système, il faut définir une frontière entre l'objet d'étude et le monde extérieur (c'est particulièrement clair lorsque ce système est postulé).

L'analyse fonctionnelle externe se conduit au moyen du **diagramme des interacteurs** (figure 1.5). Elle permet de mettre en place les relations entre le système (Attacheur) et l'extérieur symbolisé par sept blocs dans ce cas. Ce découpage permet de mettre en place les fonctions de service et de contraintes rendues par le système.

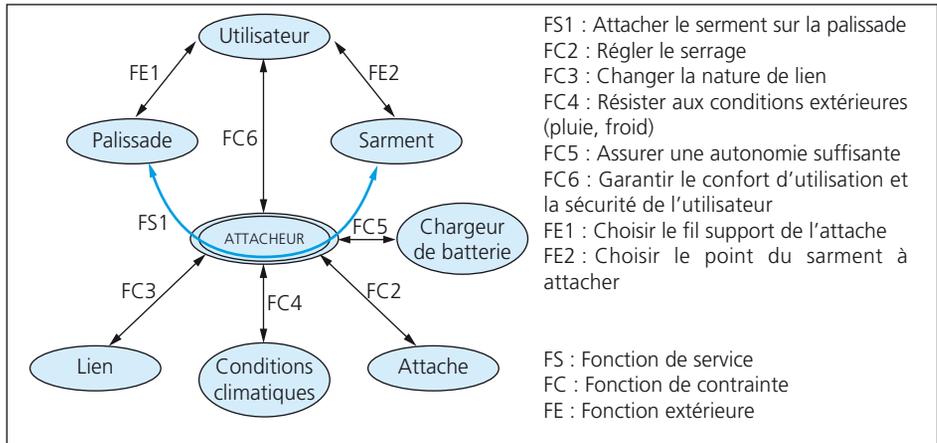


Figure 1.5 Analyse fonctionnelle externe de l'« attacheur » avec AP25

Dans le cas particulier de l'attacheur, certaines fonctions non remplies par l'attacheur lui-même (choisir le point du sarmant à attacher) amènent cependant des contraintes de conception sur le système. Elles sont qualifiées de fonctions extérieures dans ce cas.

Cette première analyse permet de dégager la liste des fonctions de service et de contraintes, la qualification de ces fonctions au moyen de critères et la quantification des performances à atteindre conduisent à la rédaction du **cahier des charges fonctionnel** (tableau 1.1).

Cette représentation normalisée permet industriellement de définir le cahier de recette : ensemble de tests et de procédures de certification de la conformité du produit.

Dans le cadre d'un concours, le cahier de charges est en fait l'énoncé des performances que l'on va vérifier par analyses et/ou calculs.

Le résultat est le produit exposé par la figure 1.6.



Figure 1.6 L'AP25 de la société Pellenc

Remarque. Sur le diagramme des interacteurs précédent, on peut remarquer que les fonctions du système à étudier sont en fait de deux natures différentes :

- les fonctions qui relient deux éléments du milieu extérieur au travers du système (FS1 sur l'exemple de l'attacheur) ; on les nomme souvent **fonctions de service** ou **fonctions principales** ;
- les fonctions qui relient un élément du milieu extérieur au système (FC2 à FC6) ; on les nomme souvent **fonctions contraintes**. La distinction entre FS et FC n'est pas toujours faite ; certains sujets appellent FS toutes les fonctions.

FONCTION	DÉFINITION	CRITÈRES D'APPRÉCIATION	NIVEAU	FLEXIBILITÉ
FS1	Attacher le sarment sur la palissade	<ul style="list-style-type: none"> • Taille du sarment • Fil de fer • Longueur du lien 	<ul style="list-style-type: none"> • Diamètre 20 mm • Diamètre 2 mm • 135 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Maxi • Maxi • ± 5 mm
FC2	Régler le serrage	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de tours de torsadage 	<ul style="list-style-type: none"> • 3 à 9 tours 	<ul style="list-style-type: none"> • $\pm 0,5$ tour
FC3	Changer la nature du lien	<ul style="list-style-type: none"> • Accepter plusieurs types de lien • Changement rapide, bobine entamée réutilisable • Longueur d'une bobine 	<ul style="list-style-type: none"> • Plastifié, papier, biodégradable, etc. • maxi 2 minutes • 1 500 attaches par bobines 	<ul style="list-style-type: none"> • ± 50
FC4	Résister aux conditions climatiques (pluie, froid)	<ul style="list-style-type: none"> • Pluie légère ; • Température de fonctionnement 	<ul style="list-style-type: none"> • IP 55 ; • $-5\text{ °C} < t < 40\text{ °C}$ 	
FC5	Assurer une autonomie suffisante	<ul style="list-style-type: none"> • Durée d'autonomie • Durée de charge 	<ul style="list-style-type: none"> • 8 000 attaches ou un jour • 10 à 12 heures 	<ul style="list-style-type: none"> • ± 200 • Maxi 12 h
FC6	Garantir le confort d'utilisation et la sécurité de l'utilisateur	<ul style="list-style-type: none"> • Masse en main réduite • Masse des batteries faible • Aucunes blessures par effet mécanique • Aucunes blessures par effet électrique 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 kg • 2 kg • Mécanisme fermé • Tension de fonctionnement réduite 24 V 	<ul style="list-style-type: none"> • Maxi • Maxi • Aucun • 24 V maxi
FE1	Choisir le fil de la palissade support de l'attache	<ul style="list-style-type: none"> • Tout angle entre le sarment et le fil possible 		
FE2	Choisir le point du sarment à attacher	<ul style="list-style-type: none"> • Tout angle entre le sarment et le fil possible 		

Tableau 1.1 Cahier des charges fonctionnel de l'attacheur AP25

1.2.4 Étude fonctionnelle interne

D'autres outils sont utilisés pour la description interne du système, seuls FAST (*Function Analysis Design Technic*) et SADT (*System Analysis Design Technic*) sont retenus. Bâti sur le principe commun d'analyse descendante, on réserve en général FAST à une analyse purement fonctionnelle et SADT à une analyse fonctionnelle et structurelle.

Analyse descendante

Le principe retenu d'un point de vue systémique consiste à étudier le système depuis le plus général, le plus global, vers le plus particulier, le plus local (c'est ce que l'on appelle analyse descendante).

Le lien avec l'étude fonctionnelle externe se fait par la **fonction principale** (la fonction de service principale). Elle décrit la relation principale entre le système et son environnement.

Si ce système existe c'est qu'il apporte (« rapporte ») un « plus » quantifiable à quelque chose et donc à quelqu'un.

On appelle **matière d'œuvre** cette chose et **valeur ajoutée** ce plus. La matière d'œuvre ne peut qu'être matérielle, informationnelle ou énergétique. Un système est en relation avec une (ou plusieurs) matière(s) d'œuvre à laquelle (ou auxquelles) il apporte une valeur ajoutée.

Exemple Robot cueilleur de fruits

Le système MAXPID présent dans le laboratoire est inséré dans un système plus vaste : le robot cueilleur de fruits MAGALI. La fonction principale du robot est donc de cueillir des fruits. La matière d'œuvre est le fruit. La valeur ajoutée est la cueillette (on sait aujourd'hui que la cueillette est l'un des postes les plus lourds dans le prix de revient des fruits mis à la vente).

La figure 1.7 propose une représentation graphique classique de cette fonction principale.

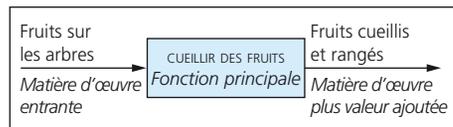


Figure 1.7 Robot de cueillette

1.2.5 Outils de description fonctionnelle

Ces outils ont été créés pour spécifier et concevoir des systèmes, ils correspondent au cas du système postulé. À des fins pédagogiques nous les utiliserons pour analyser des systèmes existants.

■ **Présentation générale des outils**

Décrire exhaustivement un système est une tâche très lourde et le plus souvent inutile et donc non justifiable économiquement.

Les descriptions proposées sont donc limitées par le choix d'un point de vue (fonctionnel, structurel, utilisateur, maintenance...) et par un objectif : la description sert, par exemple, à vérifier une fonction particulière du système.

Un outil de description fonctionnelle est un langage, le plus souvent graphique, muni de règles de syntaxe peu nombreuses mais très strictes.

Il permet de représenter le résultat d'une activité de modélisation qui est un processus intellectuel d'imagination.

Il est important de distinguer l'activité de modélisation fonctionnelle du résultat de cette activité : le graphe fonctionnel.

Les outils de description fonctionnelle sont en fait en premier lieu des langages de description du résultat de l'activité.

On pourrait envisager d'utiliser le texte courant (langue naturelle) pour cette description, il est cependant préférable industriellement d'utiliser un langage spécifique muni de règles et soutenu par un logiciel de contrôle afin de faciliter le dialogue entre des intervenants d'origine et de point de vue différents.

■ **Function Analysis System Technic FAST**

FAST est un outil graphique de description fonctionnelle basé sur une méthode interrogative (figure 1.8) :

POURQUOI une fonction doit-elle être assurée ?

COMMENT cette fonction doit-elle être assurée ?

QUAND cette fonction doit-elle être assurée ?

FAST permet d'aller de la fonction principale jusqu'aux solutions techniques qui réalisent les fonctions élémentaires, il est donc particulièrement intéressant pour analyser un système existant.

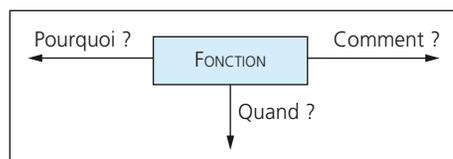


Figure 1.8 FAST : principe de représentation

La matière d'œuvre n'est pas représentée et donc la valeur ajoutée non plus. La figure 1.9 montre un exemple de représentation partielle de la description fonctionnelle du robot de cueillette de fruits MAGALI. Le point de vue adopté est celui de la maintenance.

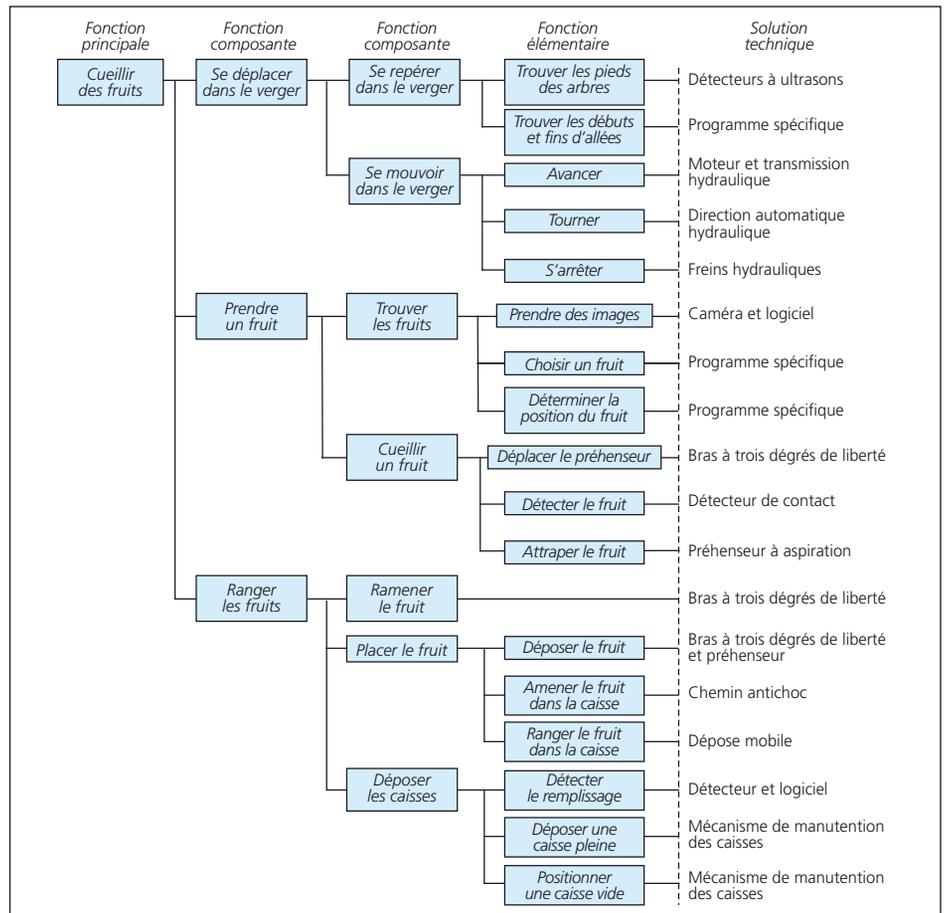


Figure 1.9 FAST du robot de cueillette

La représentation respecte les règles de FAST et celle de l'analyse descendante :

- de la gauche vers la droite la description va du général au particulier ;
- le nombre de lignes et de colonnes n'est pas fixé, il dépend du système à étudier et du point de vue retenu ;
- en prenant une fonction composante on peut vérifier que la structure graphique est respectée : par exemple, pour la fonction « Trouver les fruits » le questionnement est POURQUOI : pour « Prendre un fruit » et COMMENT : « Prendre des images », « Choisir un fruit » et « Déterminer la position du fruit ». La syntaxe est donc respectée.

Il est intéressant de noter les fonctions par des verbes à l'infinitif pour s'assurer que ce qui est décrit est bien une fonction.

La rubrique QUAND n'est pas renseignée ce qui est généralement le cas pour une description fonctionnelle (d'autres outils plus performants permettent de s'intéresser à cet aspect). La solution technique est définie succinctement, le but est de se repérer en désignant un sous-ensemble fonctionnel sur le système (figure 1.9). On retrouve plusieurs fois la même solution technique en regard de fonctions élémentaires différentes, il n'y a donc pas bijection entre fonctions élémentaires et organes matériels qui réalisent ces fonctions, ce point est important il sera détaillé au paragraphe 1.3.

■ System Analysis Design Technic SADT

SADT est aussi un outil graphique associé à une méthode d'analyse descendante modulaire et hiérarchisée (*Design* se traduit ici par conception). Il permet de représenter le modèle (image de la réalité) du système réel ou postulé.

SADT est un produit industriel supporté par un logiciel informatique de la société IGL technologie.

La « méthode » de modélisation est organisée autour des concepts de base suivants :

- modéliser pour comprendre ;
- discipliner la démarche d'analyse ;
- séparer le QUOI du COMMENT (rester au niveau fonctionnel) ;
- modéliser la réalité ;
- formaliser graphiquement.

Le modèle de représentation peut prendre deux formes :

- actigramme : basé sur les activités qui sont inscrites dans des rectangles reliés par des flèches qui portent les données ;
- datagramme : basé sur les données qui sont écrites dans des rectangles reliés par des flèches qui portent des activités.

On se limite aux actigrammes.

Chaque modèle obtenu correspond à un point de vue : utilisateur, concepteur, opérateur, mainteneur...

Représentation graphique

La représentation graphique des actigrammes (qui est la forme de SADT la plus couramment utilisée) met en œuvre le code MECS (figure 1.10) :

- M : MOYENS (matériel, logiciel, personnels). C'est la réponse à QUI fait l'activité.
- E : ENTRÉES (matières, énergies, information). C'est la réponse à SUR QUOI porte ou agit l'activité.
- C : CONTRÔLES (données de contrôles : informations, dossiers). Il s'agit des paramètres qui MODULENT et PARAMÈTRENT l'activité.
- S : SORTIES (voir entrées). C'est la réponse à QUE DEVIENNENT les entrées une fois l'activité exercée.

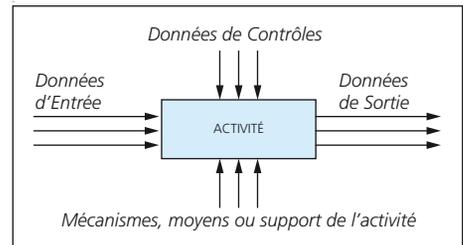


Figure 1.10

Cycle auteur – lecteur

La méthode (lorsqu'elle est appliquée industriellement) est basée sur le cycle auteurs-lecteurs, c'est donc un outil de communication entre des personnes d'origines différentes qui décrit dans un langage commun la vision de synthèse qu'ils ont d'un même projet.

La notion même de cycle de lecture suppose que plusieurs personnes compétentes qui rédigent un modèle selon la méthode SADT obtiennent des résultats différents. Ce qui est tout à fait normal car il s'agit là d'un résultat de conception qui ne comporte pas une et une seule solution.

La « méthode » SADT est en fait une méthode au sens industriel, c'est-à-dire un guide de travail en équipe. Par contre, elle ne fournit pas à un auteur seul une ligne de conduite qui va le mener au résultat (c'est-à-dire le modèle).

Il s'agit plutôt d'un outil de représentation du résultat de l'activité de modélisation possédant une syntaxe forte qui permet à l'auteur (et évidemment au lecteur) de contrôler la validité de la conception. Le respect de la syntaxe est évidemment nécessaire mais insuffisant à la validité du modèle obtenu. Par contre le respect de la syntaxe est objectif, il peut donc faire l'objet d'une évaluation !

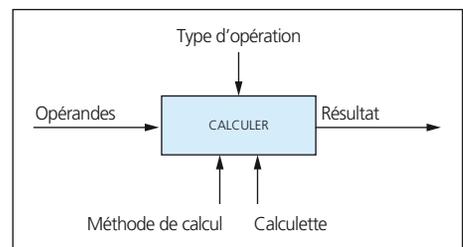


Figure 1.11 Exemple d'actigramme

Principales règles de syntaxe de SADT :

- 1- La décomposition descendante de la représentation est faite par emboîtement (figure 1.12).
- 2- La numérotation des boîtes permet de connaître le niveau d'emboîtement :

- la première boîte distingue la fonction principale du système (ce qui suppose qu'il n'y en a qu'une, ce qui n'est pas le cas pour les autres méthodes), elle est codée A-0 (A moins zéro) ;
- la décomposition de cette boîte en trois à six boîtes est recommandée par le concepteur de la méthode, cependant une décomposition en sept ou huit boîtes ne peut être considérée comme erronée par principe, ne pas exagérer tout de même. Chaque boîte porte un numéro A1, A2, A3 ; le cadre qui enferme A1, A2 et A3 de la description ci-contre porte le repère A0 (A zéro) ;
- les MECS de la boîte A-0 sont celles de la description A0 regroupant les boîtes A1 à A3 ;
- la décomposition peut être poursuivie par emboîtement successif jusqu'à un niveau de détail jugé nécessaire par l'auteur du modèle. Par exemple, l'activité A231 est la première activité de la décomposition de l'activité A23 elle-même troisième activité de la décomposition de A2 qui est la deuxième activité du modèle A0 issu de l'activité principale A-0.

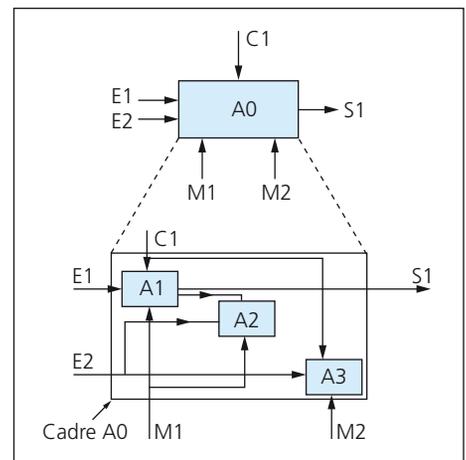


Figure 1.12 Décomposition descendante : principe

Aspects sémantiques de la méthode SADT

La complétude (rien n'est oublié) de la description suppose que :

- toutes les activités soient nommées (par un verbe à l'infinitif suivi éventuellement d'un complément) ;
- tous les MECS des activités soient renseignés (il peut se présenter des exceptions, par exemple des boîtes sans entrée) ;
- les relations entre activités soient nommées.

L'auteur d'un modèle SADT se trouve donc dans l'obligation de baptiser un grand nombre d'objets qu'il est le seul à connaître. Le nom de baptême, s'il est bien choisi, permet peut-être de rendre des objets reconnaissables par le lecteur, ce qui n'est pas toujours évident. Il convient alors de fournir un dictionnaire des activités et des données avec le modèle.

Nota : si vous avez des difficultés à rédiger ce dictionnaire pour un modèle que vous avez conçu, il faut en conclure que ce modèle sera incompréhensible pour une autre personne, et il faut donc modifier votre conception.

Remarque.

- La méthode (outil ou modèle) SADT est principalement utilisée dans le domaine du génie logiciel, elle est donc bien adaptée à spécifier fonctionnellement les parties commande de système automatique.
- C'est une méthode puissante appliquée sur de gros systèmes possédant au moins quatre ou cinq niveaux d'emboîtement. Elle s'applique difficilement sur de petits systèmes ou à la description très fine des fonctions.
- Les différents niveaux d'emboîtement ne définissent pas de hiérarchie puisqu'il n'existe pas de liaisons fonctionnelles entre niveaux d'emboîtement. La méthode ne « supporte » pas la hiérarchie, c'est-à-dire que les aspects hiérarchiques d'une description ne peuvent être représentés par SADT (ce n'est pas l'objectif recherché).
- Les blocs représentent des fonctions, il n'y a aucun aspect temporel dans l'organisation de ces dernières.

Exemple Pilote automatique de Bateau PILOTE 5000 (présent dans le laboratoire de sciences industrielles)

Le niveau A-0 (A moins zéro) propose la fonction principale du pilote qui est de « barrer le bateau » (figure 1.13).

La matière d'œuvre principale est le cap de ce bateau que le pilote automatique peut maintenir par rapport à une consigne choisie. En effet ce pilote peut seulement maintenir un cap donné (dans des conditions d'orientation du vent à peu près stable). Il ne peut pas, par exemple, virer de bord ni manier les voiles.

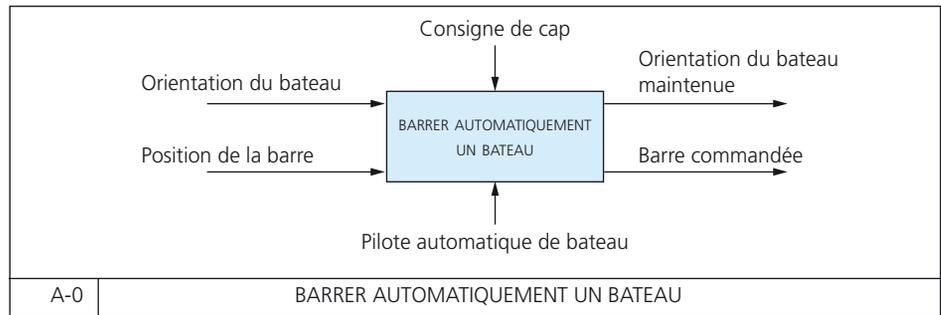


Figure 1.13 Niveau A-0

Le point de vue retenu est toujours celui de la maintenance c'est-à-dire une compréhension globale du fonctionnement.

À partir de ce niveau, on peut construire en descendant dans la description le bloc A0 qui comprend ici trois fonctions composantes : A1, A2 et A3.

Le bloc A0 ci-dessus est cohérent avec le bloc A-0 puisqu'il présente les mêmes MECS (figure 1.14).

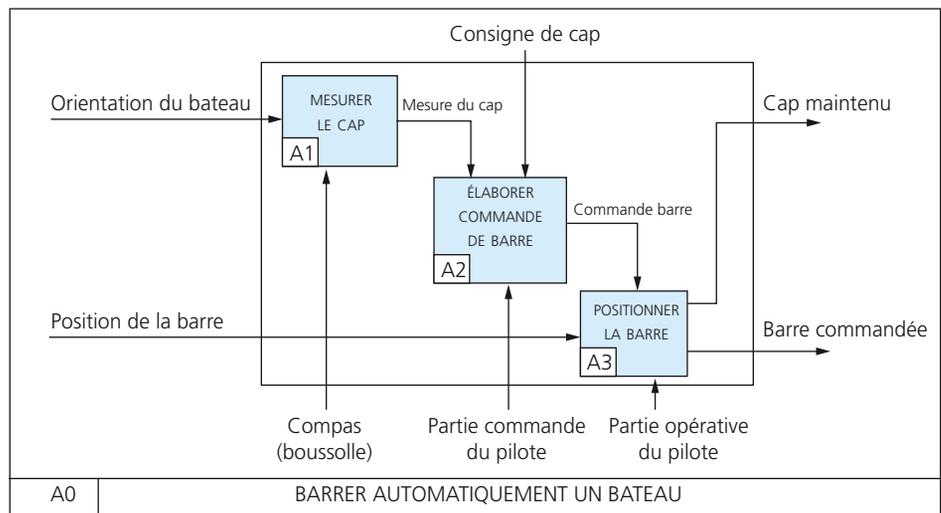


Figure 1.14 Niveau A0

On peut remarquer que les moyens placés sur la partie inférieure du rectangle actigramme ne comportent pas au sens strict la même dénomination : c'est la notion de canal de données qui s'applique. En effet en descendant dans l'analyse, il faut aussi « éclater » les données pour détailler les moyens à mesure que l'on détaille les activités.

La vérification syntaxique montre ici que le pilote se décompose en une partie commande, une partie opérative et un capteur de cap : le compas.

On peut aussi remarquer que l'actigramme A2 ne présente pas d'entrée, ce qui, bien que surprenant est tout à fait possible, on peut à ce propos remarquer que pour les MECS, deux d'entre elles sont « entrantes » : les entrées et les contrôles, le choix de la nature est souvent délicat. On retiendra en conception la règle suivante : si pour une donnée un doute se présente sur sa nature d'entrée ou de contrôle, il faut la placer en contrôle.

1.3 Étude structurelle des systèmes

Nous avons vu au paragraphe 1.1.3 que l'on peut appréhender les systèmes selon trois aspects principaux :

- l'aspect fonctionnel qui est abordé ci-dessus ;
- l'aspect comportemental qui est développé dans les parties *Automatique* et *Mécanique* de cet ouvrage ;
- et l'aspect structurel ou organique qui s'intéresse aux **constituants** matériels et immatériels des systèmes.

1.3.1 Structure d'un système

Les systèmes automatiques, c'est-à-dire ceux dotés d'un comportement indépendant au moyen d'un composant informatique interne, sont principalement étudiés ici.

Au plan structurel il est classique de les décomposer en trois éléments de structure.

- **La partie opérative** est celle qui opère directement sur la matière d'œuvre.
- **La partie commande** gère le comportement du système et organise le déroulement temporel des opérations de la partie opérative.
- **L'interface opérateur** permet à un opérateur humain de paramétrer les comportements du système.

Ces trois parties sont évidemment en interrelations, la structure générale des systèmes automatiques se représente classiquement par le schéma de la figure 1.15.

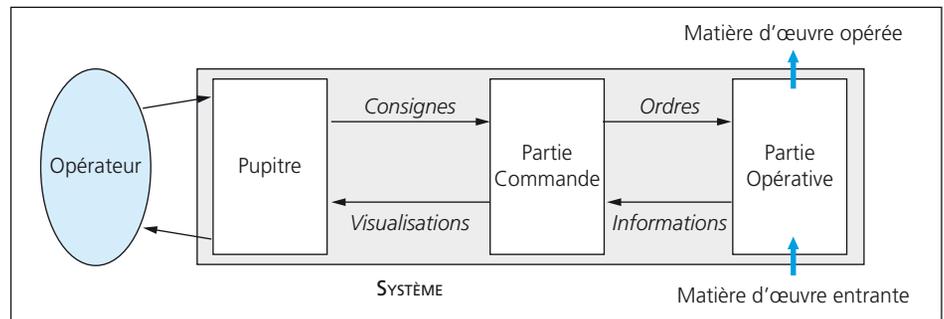


Figure 1.15 Système PD-PC

Ce découpage est intéressant technologiquement car le plus souvent la partie opérative est à dominante mécanique alors que la partie commande est à dominante électrique, électronique et informatique.

Cependant, si on suit ce découpage, on perd la qualité de système et la globalité de l'analyse de type système. Aussi préfère-t-on, en suivant le découpage fonctionnel, isoler la partie de ce système qui est spécifiquement attachée à réaliser une fonction donnée.

On appelle cet élément de structure minimal qui conserve le statut de système une *chaîne fonctionnelle*.

1.3.2 Chaîne fonctionnelle

Dans un système donné, on peut rencontrer un nombre important de chaînes fonctionnelles.

Exemple

Dans le robot ERICC 3 à cinq axes, on peut identifier aisément au moins cinq chaînes fonctionnelles. Pour chacun de ces axes on peut appliquer la description fonctionnelle ci-dessus (figure 1.16) :

- l'**organe de commande** est une carte électronique programmable ;

- le **préactionneur** est une carte de puissance à transistors ;
- l'**actionneur** est un moteur électrique à courant continu ;
- l'**effecteur** est soit la liaison mécanique avec l'axe suivant soit la pince du robot pour le cinquième axe ;
- le **capteur** est un générateur d'impulsions (codeur) numériques ;
- le **transmetteur** est une carte d'adaptation de signaux associée à un logiciel de comptage-décomptage des impulsions.

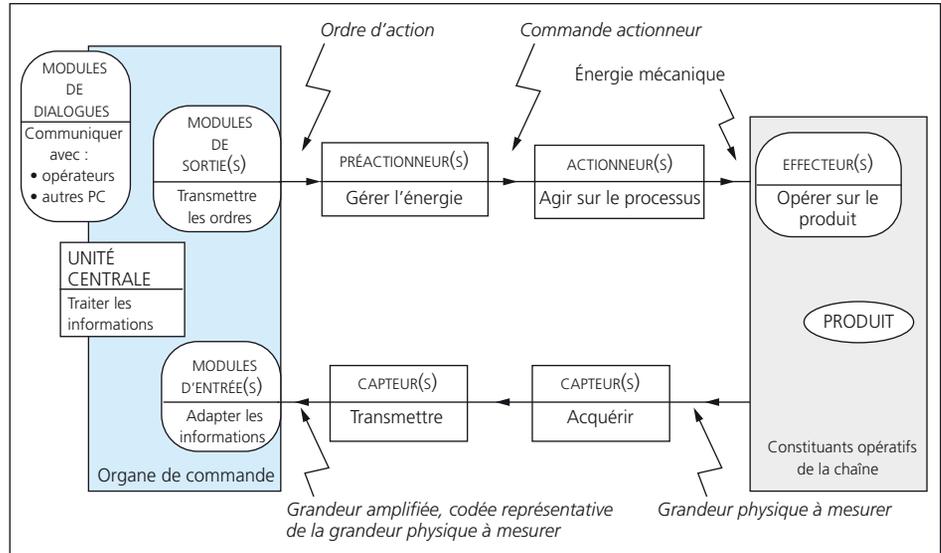


Figure 1.16 Représentation structurelle d'une chaîne fonctionnelle

Dans le laboratoire certains systèmes ne sont constitués que d'une chaîne fonctionnelle :

- MAXPID : chaîne fonctionnelle générique de commande d'axe ;
- Pilote automatique : chaîne unique de barre de bateau.

1.3.3 Chaîne d'énergie et chaîne d'information

On peut aussi reprendre l'architecture générale d'un système automatique et distinguer les principales activités (« fonctions ») que réalise ce système indépendamment de son application.

On met alors en évidence qu'un système est un transformateur d'énergie (généralement à partir d'énergie électrique vers une énergie exploitable sous forme mécanique), cette transformation progressive au long du système s'appelle la *chaîne d'énergie* (figure 1.17).

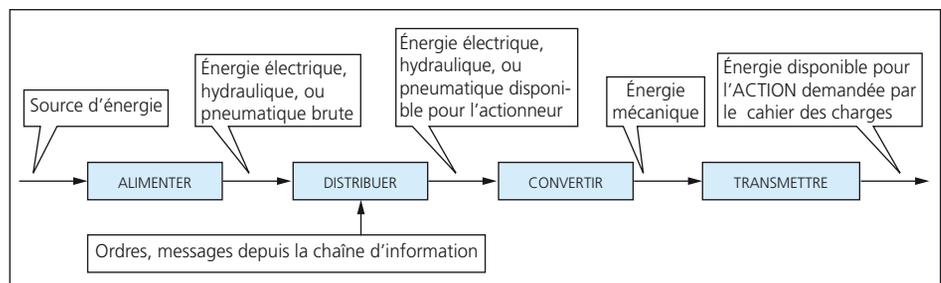


Figure 1.17 Chaîne d'énergie

Un système automatique se caractérise aussi par une composante essentielle de gestion d'information que l'on nomme *chaîne d'information* (figure 1.18).

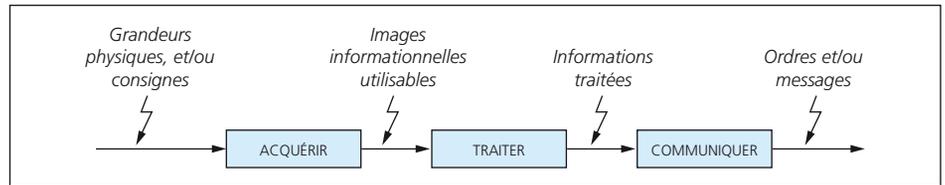


Figure 1.18 Chaîne d'information

Ce qui donne le schéma suivant dans le cas d'un système automatique (figure 1.19) :

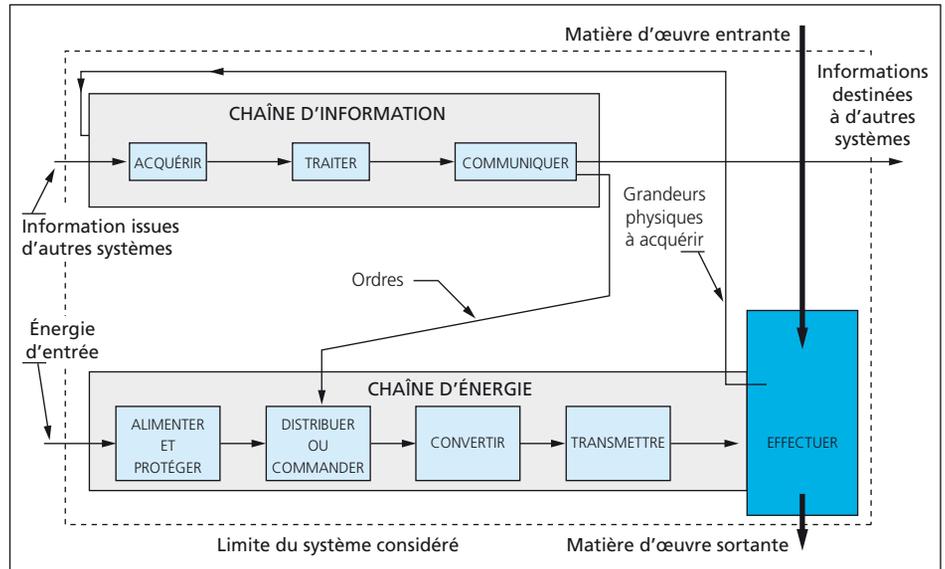


Figure 1.19

1.3.4 Comparaison fonction – structure

Les deux vues fonctionnelle et structurelle sont évidemment complémentaires mais elles ne recouvrent pas les mêmes frontières, c'est cet aspect qui rend la conception et l'analyse des systèmes délicats.

Contrairement à ce que dit l'adage : « c'est la fonction qui crée l'organe ». Un organe peut réaliser plusieurs fonctions mais plusieurs organes sont quelquefois nécessaires pour réaliser une fonction. Cette relation fonction-structure est plus ou moins directe selon les technologies utilisées.

Pour les deux parties essentielles d'un système automatique on note que :

- la partie commande réalisée soit en technologie électrique câblée, soit en technologie électronique programmée, possède une très bonne correspondance fonction-organe puisque c'est à partir d'un découpage fonctionnel que s'organisent la réalisation et l'assemblage des éléments de programme et des organes de commande ;
- la partie opérative fait appel à une conception beaucoup plus sophistiquée dans laquelle le parallélisme fonction-organe est beaucoup moins direct. C'est ce qui rend la conception mécanique (au programme des classes de PTSI) plus délicate à appréhender. De plus, la partie mécanique est tridimensionnelle et nécessite donc un langage spécifique : la représentation tridimensionnelle.