

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS

IX

■ CHAPITRE 1 : NOTION DE SYSTÈME

| | | |
|-------|--|----|
| I | PREMIÈRES DÉFINITIONS | 1 |
| I-1 | Système et fonction | 1 |
| I-2 | Notion de point de vue | 2 |
| I-3 | Interactivité de systèmes | 4 |
| I-4 | Structure d'un système - analyse descendante | 4 |
| II | REPRÉSENTATIONS GRAPHIQUES D'UN SYSTÈME | 5 |
| II-1 | Bloc fonctionnel | 5 |
| II-2 | Interactivité de systèmes | 7 |
| II-3 | D'un outil de description à un outil de simulation | 7 |
| III | PILOTE AUTOMATIQUE NAVICO POUR VOILIER À BARRE À ROUE | 8 |
| III-1 | Description générale du système | 8 |
| III-2 | Analyse descendante | 9 |
| III-3 | Limites de l'analyse descendante | 12 |
| III-4 | Modélisation (partielle et simplifiée) puis simulation | 13 |
| IV | MOLÉLISATION ET SIMULATION - QUELQUES PRÉCISIONS | 18 |
| IV-1 | Démarches de modélisation : modèles de connaissance et de comportement | 18 |
| IV-2 | Complexité mathématique | 19 |
| V | SYSTÈMES AUTOMATIQUES | 20 |
| V-1 | Un peu d'histoire | 20 |
| V-2 | Définitions | 22 |
| V-3 | Systèmes logiques, continus, échantillonnés | 27 |

EXERCICES

| | | |
|-----|---|----|
| I | SOURIS MÉCANIQUE D'ORDINATEUR | 29 |
| II | OPTIQUE ADAPTATIVE | 31 |
| III | ROBOT PARALLÈLE 6 AXES EX800 | 34 |
| IV | MOTORISATION HYBRIDE D'UN VÉHICULE AUTOMOBILE | 38 |

■ CHAPITRE 2 : SYSTÈMES ASSERVIS

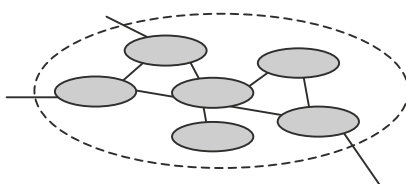
| | | |
|-----|---|----|
| I | EXEMPLE INTRODUCTIF : système de présentation de tubes | 41 |
| I-1 | Présentation fonctionnelle | 41 |
| I-2 | Le point de vue de l'automaticien : le transformateur de commande | 42 |
| I-3 | Fonctionnement | 42 |
| I-4 | Modélisation | 43 |
| I-5 | Introduction d'une boucle de retour | 44 |
| I-6 | Fonctionnement du système asservi | 46 |
| I-7 | Modélisation du système asservi | 47 |

NOTION DE SYSTÈME

I - PREMIÈRES DÉFINITIONS

I-1 Système et fonction

Système solaire en astrophysique, système scolaire en sciences de l'éducation, système capitaliste en économie, système d'exploitation en informatique : nombreux sont les exemples où la langue française utilise le terme générique de système. S'il peut être tenté d'en dégager un élément essentiel, l'idée de système est celle d'un ensemble d'éléments interagissant entre eux et avec l'extérieur. Toutefois, on perçoit bien la grande généralité de cette définition et la différence notable qu'il peut y avoir, pour choisir d'autres exemples, entre le système nerveux d'un animal, le système international d'unités bien connu des scientifiques et des ingénieurs, ou encore le système de positionnement par satellites GPS. Cet ouvrage s'intéresse à une classe particulière de systèmes : ceux qui sont artificiels (par opposition à naturels) c'est-à-dire conçus et fabriqués par l'Homme. Tel est le travail quotidien de l'ingénieur. Leur définition est la suivante :



Un système est un ensemble **organisé** d'éléments interagissant entre eux et avec l'extérieur, dans le but de réaliser une **fonction**.

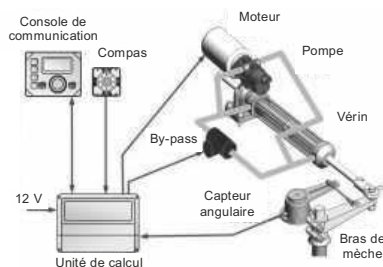
■ **Remarque** : Cette fonction répond à un besoin, exprimé ou latent. L'association d'une fonction à un besoin se fait par les méthodes de **l'analyse fonctionnelle**, non développées ici.



Exemple 1 : Système de surveillance des pneumatiques (d'après des documents WAECO)



Exemple 2 : Régulateur de vitesse à contrôle de distance (Image <http://commons.wikimedia.org>)



Exemple 3 : Pilote automatique pour barre à roue de voiliers (d'après des documents Créa-Technologie)

- Les éléments peuvent être matériels (intervenants humains, machines, logiciels...) mais aussi immatériels (méthodes, services, ...). Ces éléments sont en nombre fini définissant la **frontière** du système qui le sépare de son **environnement**, ou milieu extérieur.
- L'environnement fournit au système des **entrées** qui lui permettent d'agir en générant des **sorties** vers l'environnement.
- Parmi les entrées, on distingue la **matière d'œuvre entrante**. La raison d'être (fonction à réaliser) du système est d'agir sur cette matière d'œuvre afin de lui ajouter de la valeur. La matière d'œuvre entrante augmentée de sa **valeur ajoutée** est la **matière d'œuvre sortante**. La notion de valeur **ajoutée** est ici à prendre au sens le plus large et non pas au sens purement arithmétique. Selon le point de vue (cf. plus loin), et en particulier celui de l'automaticien, elle peut être associée à un changement de nature de la matière d'œuvre qui, entrante, peut par exemple être un ordre, puis, sortante, une action. La valeur ajoutée est alors l'exécution de l'ordre.
- Des entrées et des sorties autres que la matière d'œuvre peuvent exister. Ce sont :
 - des éléments de l'environnement nécessaires à la transformation de la matière d'œuvre (présence d'énergie par exemple) ou dont la présence ou la variation modifie cette transformation (réglages, actions extérieures diverses, etc.) : on les appelle **données de contrôle** ;
 - des apports supplémentaires à l'environnement, comme par exemple des informations apportées à un utilisateur, ou encore des déchets.

Ces définitions peuvent être illustrées sur les trois exemples précédents :

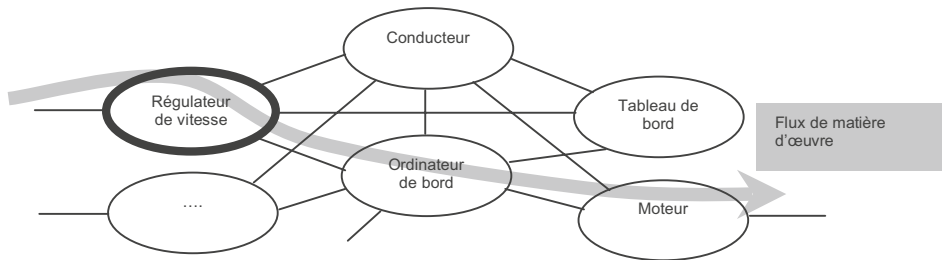
| Système | Fonction | Matière d'œuvre entrante | Matière d'œuvre sortante | Données de contrôle | Sorties secondaires |
|---|--|--|--|---|---|
| Système de surveillance de la pression et de la température des pneus | Apporter au conducteur des informations concernant l'état des pneus | Pression et température de l'air dans les quatre pneus | Informations affichées au tableau de bord | Énergie électrique et réglages divers | |
| Régulateur de vitesse à contrôle de distance | Fournir une consigne à l'ordinateur de bord lui permettant d'adapter la distance du véhicule au véhicule qui précède | Position relative du véhicule qui précède | Consigne de vitesse à l'ordinateur de bord | Énergie électrique et réglages divers Vitesse du véhicule | Informations affichées au tableau de bord |
| Pilote automatique pour barre à roue de voilier | Établir le cap d'un voilier | Cap courant | Nouveau cap | Cap à suivre Champ magnétique terrestre Énergie électrique et réglages divers Actions de la mer et du vent | Informations affichées au tableau de bord |

Important : une fonction s'indique toujours par un verbe à l'infinitif, suivi d'un complément d'objet direct et éventuellement de compléments circonstanciels.

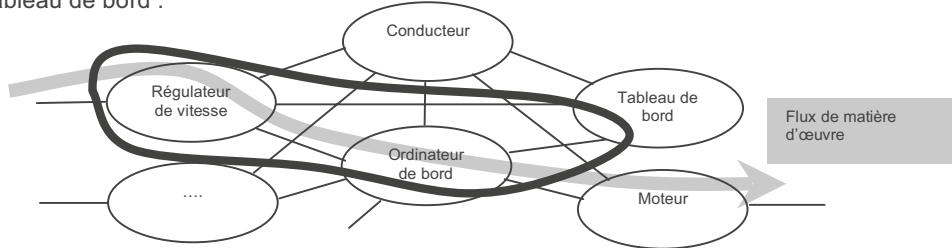


I-2 Notion de point de vue

La frontière d'un système dépend du **point de vue** de celui qui l'étudie. Par exemple, ci-dessus, si on reprend le système régulateur de vitesse à contrôle de distance, le point de vue qui a été retenu exclut l'ordinateur de bord du système. Celui-ci fait alors partie de l'environnement du système et le système génère des sorties vers cet élément de son environnement. L'ordinateur de bord est alors un système extérieur, qui, parmi ses nombreuses entrées reçoit la consigne du régulateur de vitesse pour construire une sortie, à son tour, vers le moteur de la voiture pour la faire accélérer ou décélérer.



Ce point de vue est un point de vue assez structurel, qui cherche à associer fonctions et objets matériels. D'un autre point de vue, plus fonctionnel, le système de régulation de vitesse pourrait très bien être retenu comme le précédent, augmenté de la partie concernée de l'ordinateur de bord et du tableau de bord :



Par ailleurs, le point de vue adopté peut non seulement influencer sur la frontière définissant le système, mais aussi sur ce qui, parmi ses entrées et sorties, sera retenu comme matière d'œuvre. Conservons l'exemple du régulateur de vitesse :

| Système | Fonction | Matière d'œuvre entrante | Matière d'œuvre sortante | Données de contrôle | Sorties secondaires |
|--|---|--|--|---|---|
| Régulateur de vitesse à contrôle de distance | Fournir une consigne à l'ordinateur de bord lui permettant d'adapter la distance du véhicule au véhicule qui précède | Position relative du véhicule qui précède | Consigne de vitesse à l'ordinateur de bord | Énergie électrique et réglages divers Vitesse du véhicule | Informations affichées au tableau de bord |

Tel qu'il est décrit ci-dessus, à partir de la position relative du véhicule qui précède, le système établit une consigne de vitesse qu'il transmet à l'ordinateur de bord. Pour cela, il a besoin de connaître (donnée de contrôle) la vitesse courante du véhicule. La fonction s'exprime alors comme une **adaptation de la distance** entre les deux véhicules. Mais ce même système peut tout aussi bien être décrit comme réalisant une fonction d'adaptation de la vitesse à celle du véhicule qui précède :

| Système | Fonction | Matière d'œuvre entrante | Matière d'œuvre sortante | Données de contrôle | Sorties secondaires |
|--|--|-----------------------------|--|---|---|
| Régulateur de vitesse à contrôle de distance | Fournir une consigne à l'ordinateur de bord lui permettant d'adapter la vitesse du véhicule au véhicule qui précède | Vitesse du véhicule. | Consigne de vitesse à l'ordinateur de bord | Énergie électrique et réglages divers Position relative du véhicule qui précède | Informations affichées au tableau de bord |

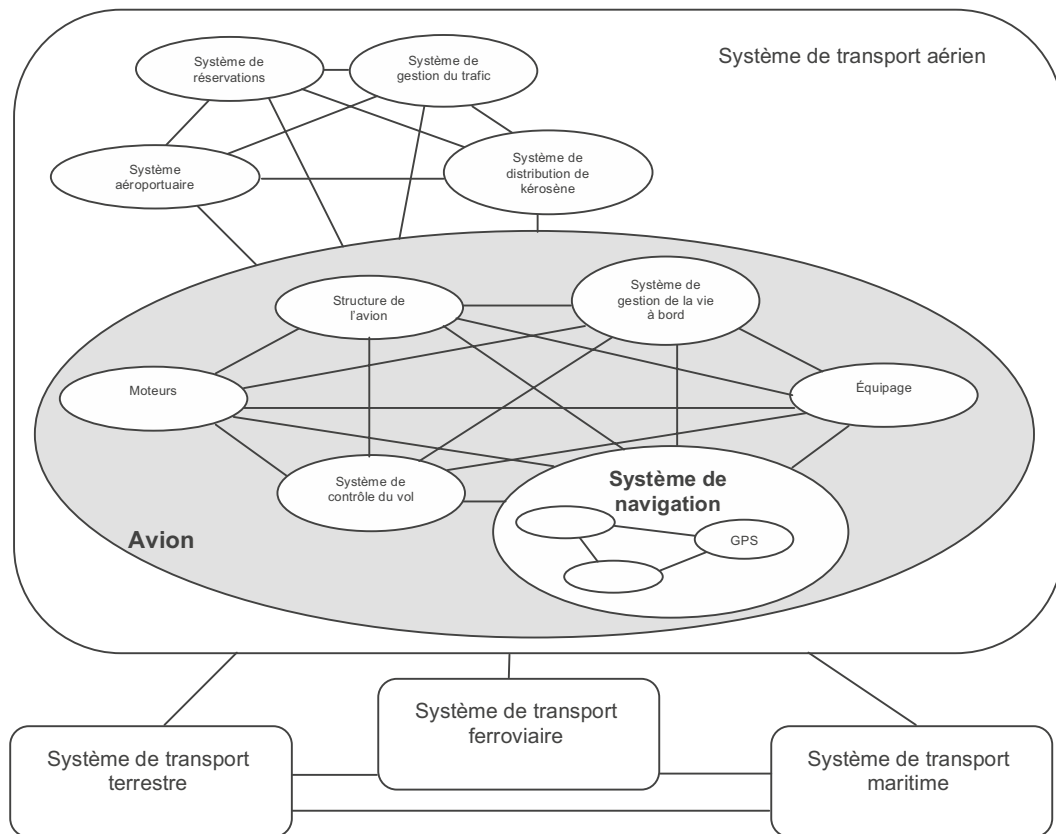
La fonction est alors une **adaptation de la vitesse** à celle du véhicule qui précède : connaissant la vitesse courante du véhicule, le système établit une nouvelle consigne de vitesse qu'il transmet à l'ordinateur de bord. Pour cela il a besoin de connaître (donnée de contrôle) la position relative du véhicule qui précède.

On retiendra donc qu'il n'y a absolument pas unicité de la description fonctionnelle d'un système. Pour autant, un point de vue ayant été adopté, la formulation de la fonction doit, bien entendu, être cohérente avec matière d'œuvre retenue.

I-3 Interactivité de systèmes

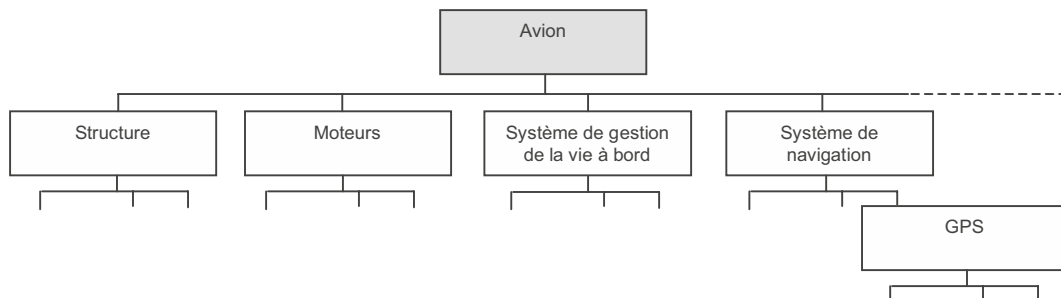
L'exemple précédent illustre, quel que soit le point de vue, la complexité des interactions qui peuvent exister entre différents systèmes partageant des matières d'œuvres ou des données de contrôles : régulateur de vitesse, ordinateur de bord, tableau de bord, etc.

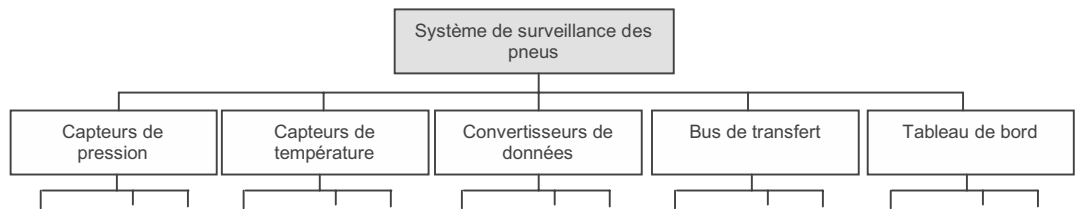
On peut ajouter, pour illustrer la complexité du propos, l'exemple des systèmes que les concepteurs d'un avion sont amenés à définir, regroupés dans le graphique ci-dessous :



I-4 Structure d'un système – analyse descendante

Comme ci-dessus, de manière ascendante, différents systèmes peuvent s'interconnecter. Inversement, de manière descendante, un système est constitué d'éléments qui sont eux-mêmes des systèmes (alors appelés sous-systèmes) interconnectés entre eux et ainsi de suite :





En phase de conception, les ingénieurs doivent concevoir un système devant réaliser une fonction globale. Pour cela, il convient d'imaginer des sous-systèmes dont l'assemblage permettra d'obtenir le résultat attendu. On procède donc par analyse descendante, étape par étape, en affinant la description de chaque sous-système. Cette structure descendante peut se poursuivre, a priori, jusqu'aux composants élémentaires qui ne sont plus des systèmes mais des **objets techniques** : pièce mécanique, câble électrique, etc. En pratique elle se termine lorsqu'elle aboutit à un sous-système dont la structure interne n'apporte rien à l'étude en cours. Encore une fois le **point de vue** de l'étude intervient dans la description.

Ainsi, par exemple, pour un constructeur automobile, l'autoradio n'est qu'un objet technique : la conception du véhicule ne nécessite pas la connaissance de sa réalisation interne. Dans une analyse fonctionnelle descendante réalisée en phase de conception du véhicule, la décomposition n'ira donc pas au-delà de l'objet global pour l'autoradio. Le constructeur automobile devra seulement s'interroger sur son insertion dans le tableau de bord et sa connexion avec les autres éléments (alimentation électrique, haut-parleurs, etc.), ce que l'analyse système du véhicule entier mettra en évidence. Inversement, bien entendu, pour le fabricant d'autoradios lui-même, celui-ci est un système : pour le concevoir il sera amené à le décomposer en de nombreux sous-systèmes (tuner, lecteur de CD, amplificateur, interface avec le conducteur, circuit électronique, etc.) eux-mêmes décomposés en sous-systèmes ou objets techniques selon le besoin.

De la même manière, pour intervenir dans la conception d'un système de transport aérien, au niveau par exemple des réservations, il n'est pas nécessaire de connaître la structure interne du système de transport ferroviaire. Seule la connaissance de ses interactions avec le système de transport aérien (correspondances) sont utiles. De même, il n'est pas nécessaire de décomposer l'avion en tous ses sous-systèmes, seul le système de gestion de la vie à bord qui gère les différents sièges est concerné.

■ **Remarque** : Dans les systèmes complexes, la structure définie correspond à des niveaux de responsabilité des équipes de conception qui travaillent alors en étroite collaboration, selon des protocoles reposant sur les interconnexions entre les sous-systèmes.

II - REPRÉSENTATIONS GRAPHIQUES D'UN SYSTÈME

II-1 Bloc fonctionnel

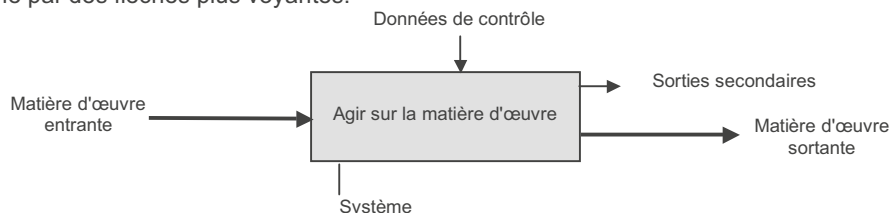
Il existe une très grande diversité de représentations graphiques des systèmes répondant aux types de systèmes rencontrés et aux objectifs de l'étude menée. Précédemment, quelques premiers outils ont été utilisés : tableaux, graphes structurels, graphes d'arborescence. Citons pour mémoire également les diagrammes APTE et FAST qui sont des diagrammes strictement fonctionnels que nous n'exposerons pas ici.



Fiche ressource "outils d'analyse fonctionnelle"

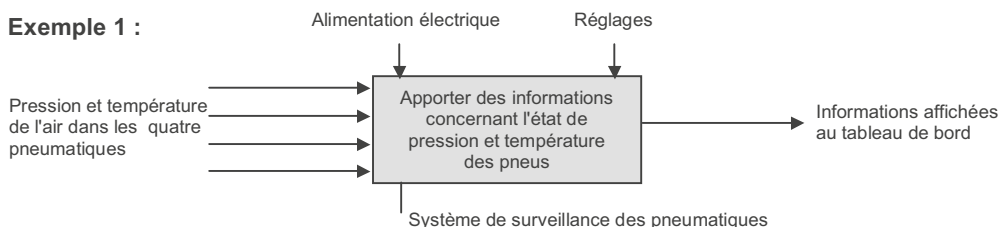
L'automaticien, nous le verrons par la suite, nécessite, au-delà des informations strictement fonctionnelles, des informations structurelles permettant, **selon son point de vue**, le suivi des différents flux de matière d'œuvre. Ainsi, il adoptera une représentation qui consiste à figurer le

système par un rectangle, appelé **bloc fonctionnel**, matérialisant sa frontière et à l'intérieur duquel est inscrite sa fonction. Des flèches, entrantes (généralement à gauche) et sortantes (généralement à droite), indiquent alors respectivement la matière d'œuvre entrante et la matière d'œuvre sortante. Des flèches, entrantes par le dessus, figurent des données de contrôle et d'autres flèches, sortantes, figurent d'éventuelles sorties secondaires. Le flux de matière d'œuvre peut être souligné par des flèches plus voyantes.

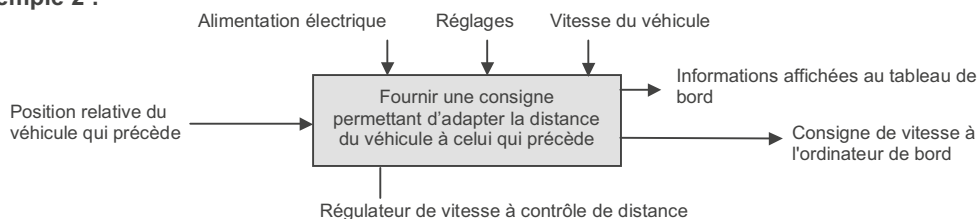


Cette représentation peut-être partielle au niveau des données de contrôle ou des sorties secondaires, selon le point de vue et donc le niveau de précision que l'on souhaite apporter à la description. Elle peut être illustrée sur les trois premiers exemples précédents :

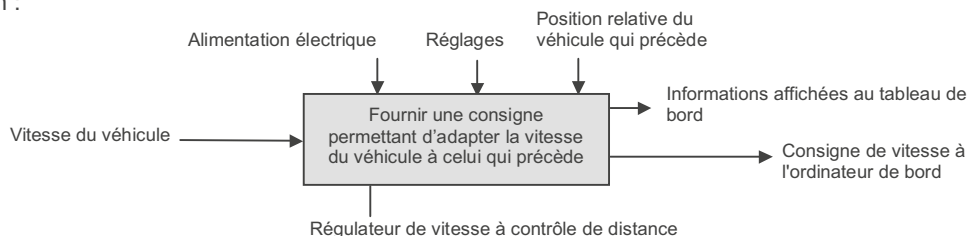
■ Exemple 1 :



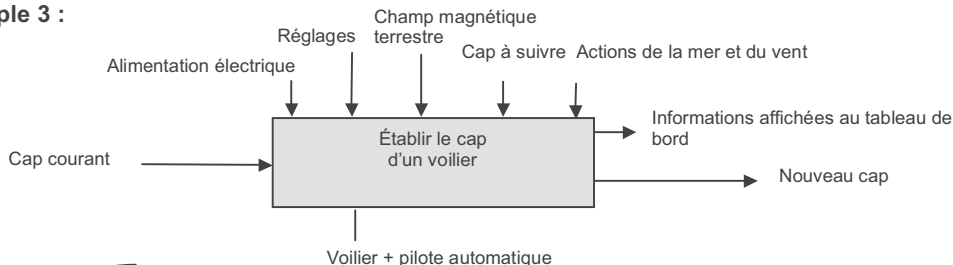
■ Exemple 2 :



Ou bien :



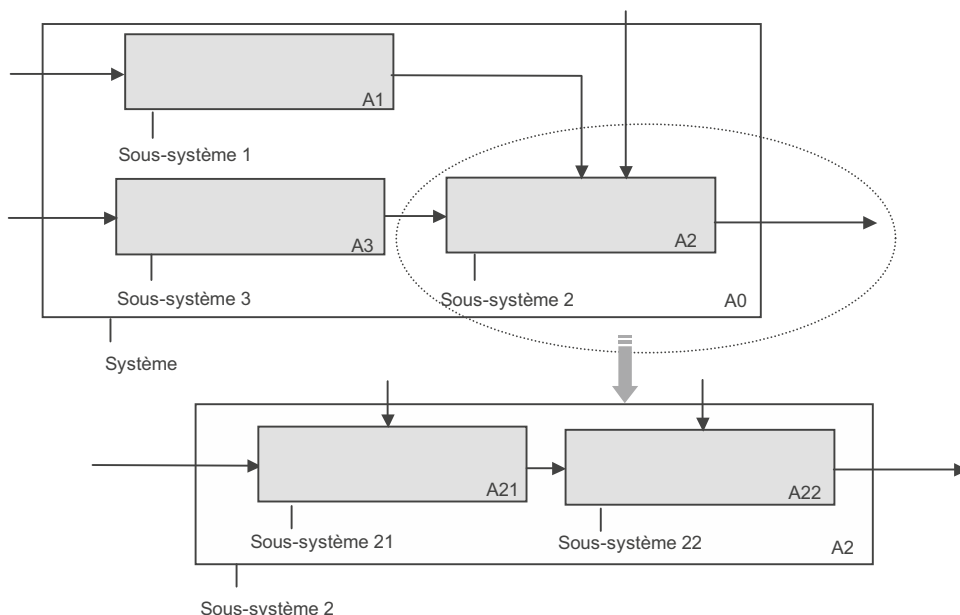
■ Exemple 3 :



Remarque : le voilier lui-même fait partie du système puisqu'il participe à la modification de son cap. C'est lui qui subit les actions mécaniques de la mer (safran + coque) et du vent (voilure) permettant l'orientation nécessaire au changement de cap. Voir plus loin.

II-2 Interactivité de systèmes

Les blocs fonctionnels ainsi définis peuvent alors être interconnectés au niveau de leurs entrées et sorties pour matérialiser l'assemblage de systèmes. Ainsi, une analyse descendante peut être élaborée pour décrire la structure fonctionnelle interne d'un système, étape par étape et avec une nomenclature associée ($A2 \rightarrow \{A21, A22\}$, etc.) :



Cette représentation s'inspire de la méthode générale SADT ou IDEF0.



Fiche ressource "outils d'analyse fonctionnelle"

Cette méthode n'est pas la seule à reposer sur des blocs fonctionnels interconnectés. La lecture de cet ouvrage permettra d'en rencontrer d'autres. Le **schéma bloc** par exemple (cf. chapitre suivant), outil privilégié de l'automaticien, reposera sur cette description tout en s'en démarquant sur certains aspects.

II-3 D'un outil de description à un outil de simulation

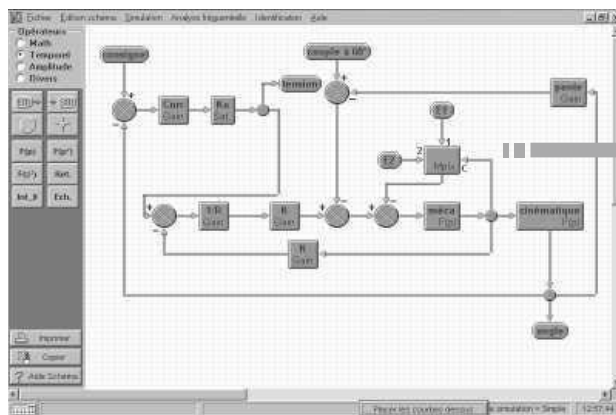
Si, dans un premier temps, les blocs fonctionnels interconnectés sont incontestablement un outil synoptique performant pour décrire la structure d'un système à travers les flux de matières d'œuvres, leur utilisation ne s'arrête pas à cette fonction de communication. De nombreuses simulations peuvent en effet s'y référer.

Par exemple, une panne peut être simulée en considérant qu'une matière d'œuvre sortante est altérée ou inexistante à la sortie d'un sous-système. La représentation graphique permet assez facilement d'identifier les conséquences de cette panne, par suivi du flux de matière d'œuvre concerné.

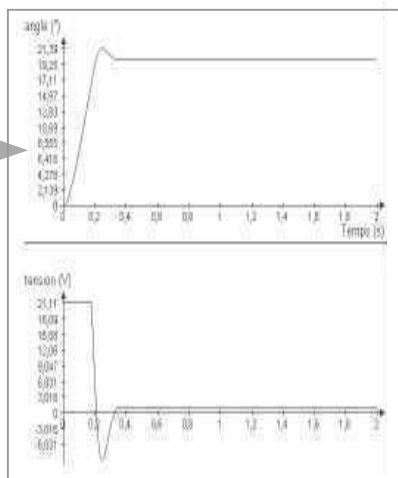
Mais l'usage principal qui va être détaillé dans cet ouvrage est d'associer **une loi de comportement** à chaque bloc fonctionnel. Une telle loi lie les sorties aux entrées. La description interconnectée traduit alors le système complet d'équations liant les différentes entrées-sorties entre elles et donc finalement le comportement du système.

En pratique associés à des logiciels de calcul, ces types de descriptions, plus ou moins adaptés, permettent donc de simuler le comportement du système en cours de fonctionnement, ce qui est d'un apport majeur pour les ingénieurs.

L'essentiel du propos de cet ouvrage illustrera cette pratique, dans le cas restreint de systèmes obéissant à certains types de lois de comportement simples.



Saisie du système à l'aide de l'interface graphique d'un logiciel dédié (ici un schéma bloc)



Exemples d'évolutions des sorties du système suite à la variation d'une entrée

III - PILOTE AUTOMATIQUE NAVICO POUR VOILIER À BARRE À ROUE

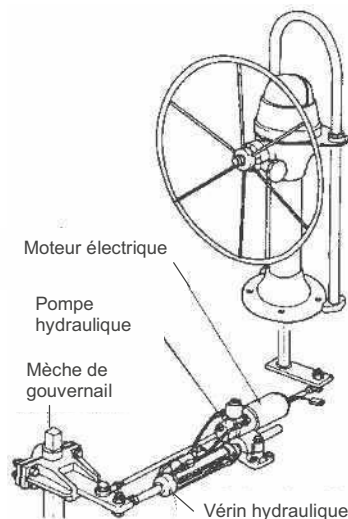
Ce système est proposé à l'équipement du laboratoire de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur des classes préparatoires scientifiques. Certains documents reproduits ci-après sont issus de la documentation conçue par Créa Technologie : <http://www.crea-technologie.com>

III-1 Description générale du système

Un voilier est dirigé à l'aide d'un « gouvernail » qui est l'ensemble constitué :

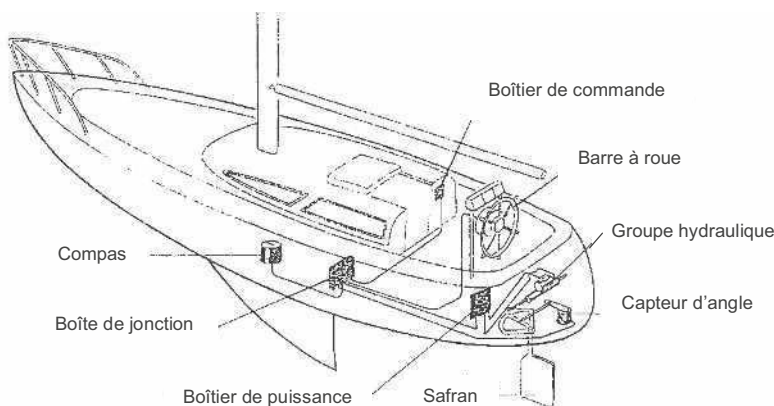
- du « safran » au contact de l'eau ;
- de la « mèche » qui est l'axe de la liaison pivot entre le safran et la coque ;
- d'une « barre franche » manœuvrée en poussant ou en tirant ou d'une « barre à roue » manœuvrée comme un volant par le barreur.

On s'intéresse ici aux voiliers de grandes dimensions équipés d'une barre à roue. La transmission de la puissance de la barre à la mèche de gouvernail peut être directe (câble, système de bielles) ou assistée par un groupe hydraulique, composé principalement d'un moteur, d'une pompe et d'un vérin. Ci-contre le montage d'un groupe hydraulique d'assistance sur une transmission par parallélogramme déformable.



De plus, cet ensemble peut également s'insérer dans un système complet de pilotage automatique dans lequel le barreur est affranchi de toute action sur la barre à roue et se contente de sélectionner un cap à suivre sur un boîtier de commande.

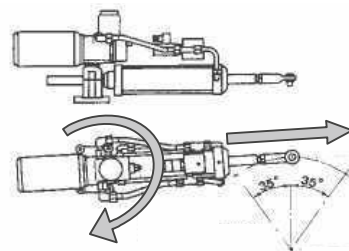
C'est le cas du système développé par les sociétés Lecomble et Schmitt (<http://www.ls-france.com>) et Navico (<http://www.navico.com>). Il comporte les éléments suivants :



- une partie agissant mécaniquement sur le cap du voilier constituée du safran (plus en fait tout le bateau sur lequel agissent la mer et le vent) et du groupe hydraulique, muni d'un groupe de puissance alimentant son moteur électrique ; cette partie sera appelée chaîne d'action ;
- un compas ;
- un capteur d'angle sur la mèche du safran ;
- une partie composée d'une « boîte de jonction » et d'un boîtier de commande assurant le traitement des différentes informations ; cette partie sera appelée partie commande (PC) ;
- plus une barre à roue pour un usage manuel de sécurité ou d'agrément, *considérée comme hors système*.

NB : les notions de PC et de chaîne d'action seront définies d'une manière générale au paragraphe V.

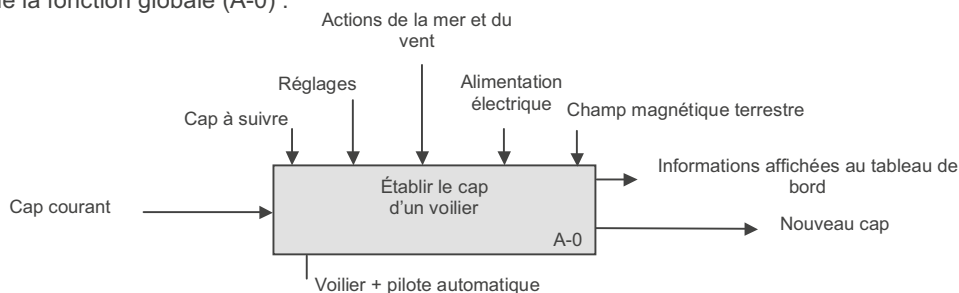
Le support du groupe se fixe sur le voilier selon une liaison adaptée à la cinématique de l'ensemble (liberté en rotation autour d'un axe parallèle à celui de la mèche). L'extrémité de la tige du vérin hydraulique est reliée à la mèche du safran.



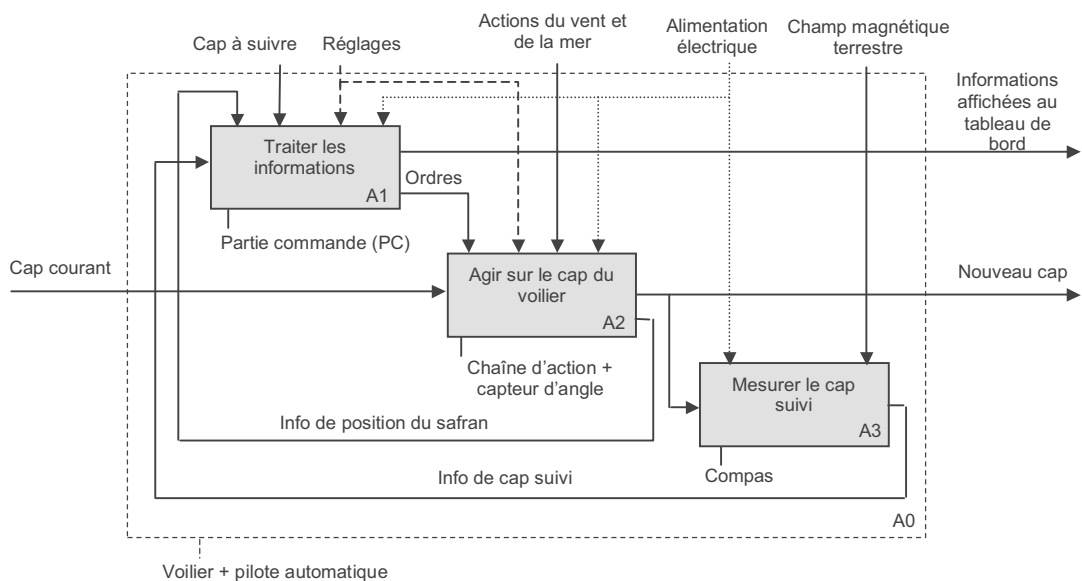
III-2 Analyse descendante

Les différentes parties qui ont été décrites ci-dessus (barre à roue exclue), associées à leurs interconnexions, permettent d'élaborer la définition de sous-systèmes selon l'analyse descendante de type SADT exposée ci-dessous.

Rappel de la fonction globale (A-0) :



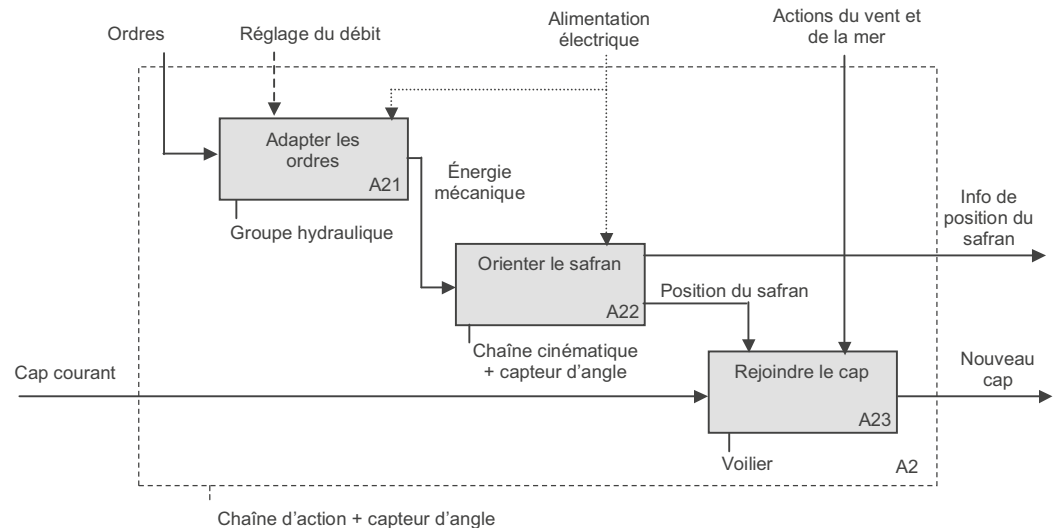
Cette fonction globale nécessite le pilote automatique et le voilier lui-même dont les limites définissent la frontière du système. Un premier niveau d'analyse peut faire apparaître les sous-systèmes suivants :



Ce diagramme de niveau A0 permet la lecture du fonctionnement global du système. Le barreur définit le cap à suivre qui est connu de la PC. Celle-ci a, à chaque instant, connaissance du nouveau cap suivi par le voilier (information fournie par le compas qui nécessite pour cela la mesure du champ magnétique terrestre). La PC peut donc comparer ce cap avec le cap à suivre et élaborer des ordres qu'elle fournit à la chaîne d'action pour que celle-ci permette la modification du cap. Ces ordres dépendent de la position courante du safran, fournie par le capteur d'angle.

Des réglages divers peuvent être effectués, permettant d'adapter le système au type de voilier et au type de comportement souhaité.

L'analyse descendante peut être poursuivie, par exemple à partir du diagramme A2 :

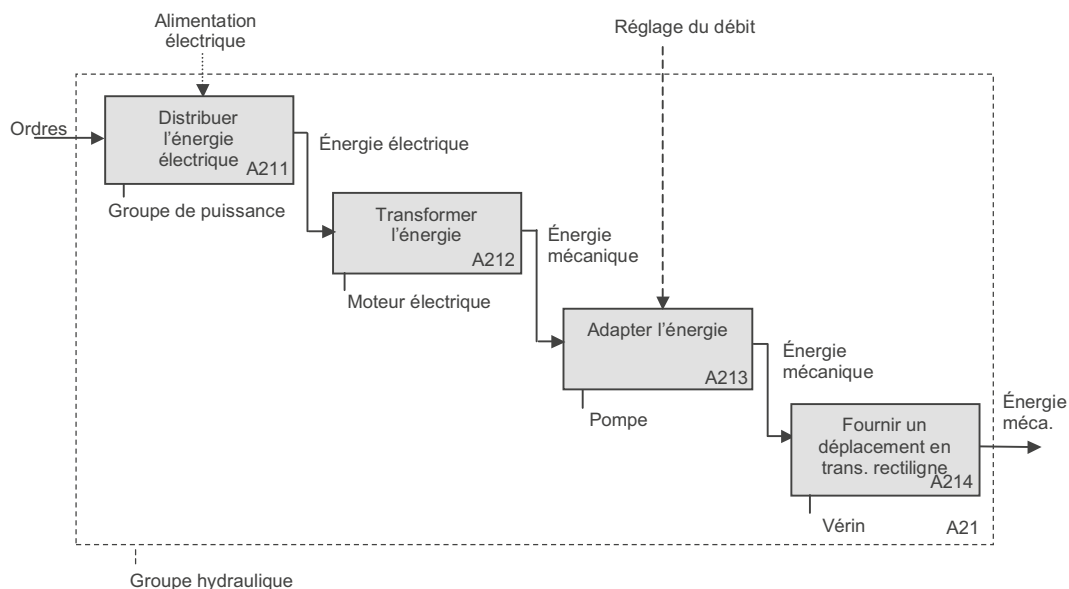


On lit sur ce diagramme que les ordres provenant de la PC (sous forme électrique basse puissance) sont transformés en énergie mécanique par le groupe hydraulique (mouvement de la tige du vérin). Un apport énergétique est nécessaire, d'où la connexion à l'alimentation électrique pour amplification. On peut remarquer que, pour le niveau de description A2, les ordres de la PC constituent une donnée de contrôle alors qu'il s'agit de la matière d'œuvre entrante du groupe hydraulique A21.

La vitesse de translation de la tige du vérin peut être adaptée au voilier par réglage du débit de la pompe du groupe hydraulique apparaissant en donnée de contrôle. Il s'agit d'un des réglages qui apparaissent en données de contrôle du bloc A0. Il est défini plus précisément à ce niveau.

Cette énergie mécanique, portée par la translation de la tige du vérin du groupe hydraulique, permet l'orientation du safran par la chaîne cinématique A22, orientation dont l'information de la valeur est transmise à la PC (sortie du bloc A2).

L'ensemble des actions mécaniques s'exerçant sur le voilier (action du vent + action de la mer dépendant de la position du safran) provoque (A23) une modification de son cap, comme attendu. On peut poursuivre la logique descendante pour décrire le groupe hydraulique selon :

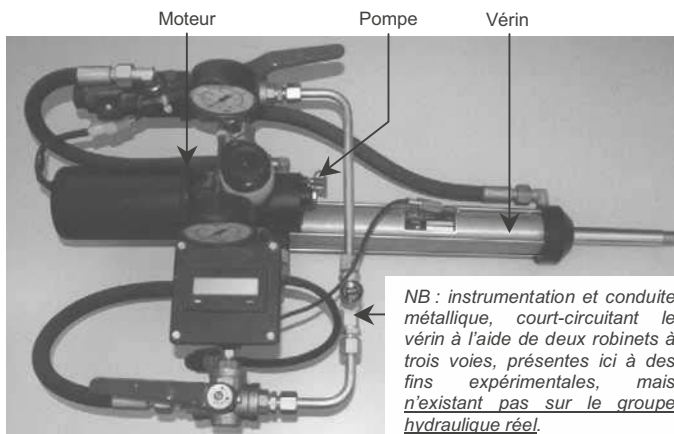


Les ordres provenant de la PC doivent commander le déplacement de la tige du vérin dans un sens ou dans l'autre. Pour cela la solution retenue est de faire tourner la pompe (qui est à double sens de marche), et donc le moteur électrique d'entraînement, dans un sens ou dans l'autre.

Le groupe de puissance, raccordé à l'alimentation électrique, élabore donc la tension d'alimentation du moteur, positive ou négative selon le signal (ordre) qu'il reçoit de la partie commande. Cette tension est la matière d'œuvre entrante du moteur. Celui-ci entraîne mécaniquement la pompe qui débite alors, dans un sens donné, dans l'une ou l'autre des chambres du vérin double effet. Le déplacement dans le sens souhaité de la tige du vérin double effet transmet enfin l'énergie mécanique attendue à la chaîne cinématique.

Le groupe hydraulique qui est proposé aux laboratoires des classes préparatoires scientifiques est constitué du moteur, de la pompe et du vérin de ce pilote automatique.

Écorché de l'ensemble moto-pompe :



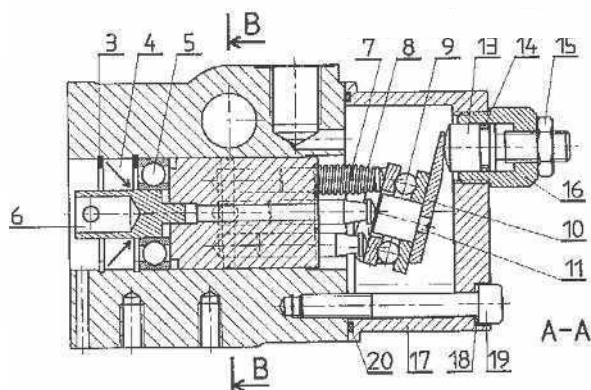
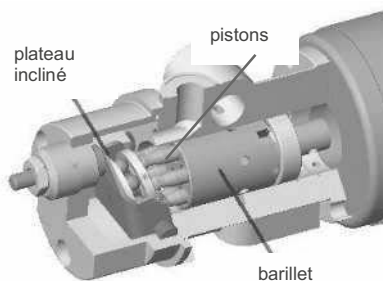
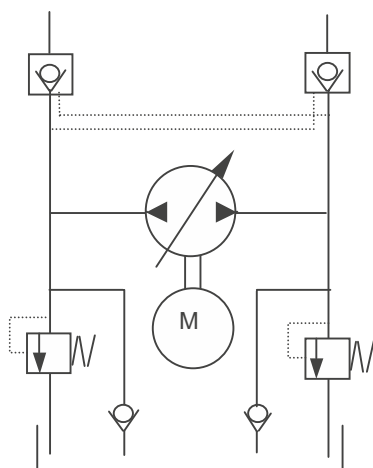
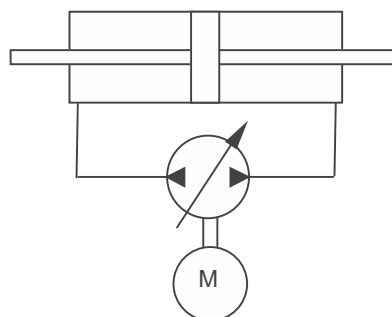
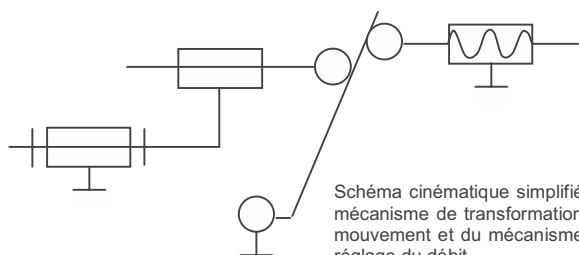
III-3 Limites de l'analyse descendante

L'analyse fonctionnelle descendante est adaptée à des systèmes complexes pluritechnologiques et dont les différentes grandeurs de travail (essentiellement les matières d'œuvre) sont de natures variées : ordres ou informations généralement électriques, énergies électriques, mécaniques, thermiques, etc. Lorsque le niveau d'analyse s'abaisse, une limite est assez rapidement atteinte, en particulier lorsque l'on travaille sur une nature d'énergie ou une technologie déterminée.

Par exemple ici, pour décrire le système constitué du moteur, de la pompe et du vérin, il existe une schématique propre aux technologies hydrauliques qui sera bien souvent préférée. Voir schéma ci-contre.

De même, si on veut encore descendre plus bas dans l'analyse pour préciser le fonctionnement interne de la pompe par exemple, il existe :

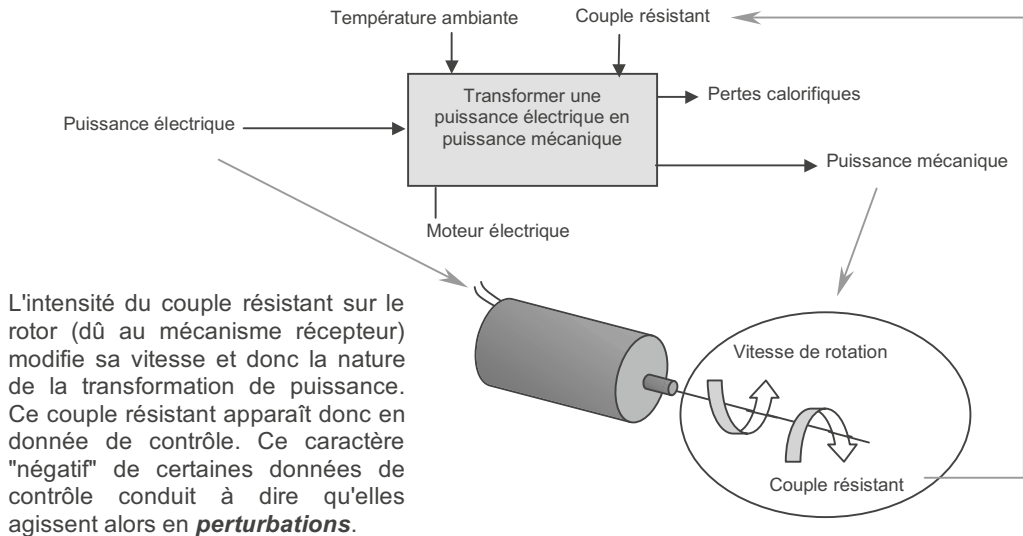
- des éléments de la schématique propre aux technologies hydrauliques permettant, par exemple, d'expliciter les solutions retenues pour assurer la sécurité en cas de surpression, ce dont il est très difficile, voire impossible, de rendre compte à l'aide de blocs fonctionnels ;
- des représentations propres aux systèmes mécaniques (modèles 3D, dessins 2D, éclatés, schémas, etc.) permettant d'expliciter les différentes pièces réalisant les différentes transmissions et transformations de mouvements et d'efforts au sein du mécanisme.



III-4 Modélisation (partielle et simplifiée) puis simulation

III-4-1 Moteur électrique

Un moteur électrique est un ensemble de constituants matériels conçu dans le but de transformer de la puissance électrique en puissance mécanique. Ainsi, peut-il être représenté par :



Dans une moindre mesure, la température de l'environnement modifie les caractéristiques électromécaniques du moteur et peut donc aussi éventuellement figurer comme donnée de contrôle. Le rendement de la transformation étant nécessairement imparfait, elle se produit avec des pertes calorifiques que l'on figure en sortie annexe.

■ **Remarque :** Ces pertes calorifiques peuvent, dans des situations extrêmes, générer une élévation de température. Il y a donc dans ce cas un phénomène de **bouclage** (ou **rétroaction**) ici dû à une interaction entre le système et son milieu extérieur, au-delà de sa fonction même. Cette **complexité** est un élément essentiel que doit être capable de prendre en compte un ingénieur aujourd'hui.

■ Construction d'un modèle mathématique :

Dans le cas d'un **moteur à courant continu**, sous réserve d'hypothèses simplificatrices usuelles, la transformation énergétique est modélisée par les équations données ci-après.



Cours d'électricité : le moteur à courant continu



Cours de mécanique des solides



Fiche ressource "inertie équivalente"



- L'équation électrique (loi d'Ohm dans le circuit d'induit), liant la tension d'alimentation $u(t)$ à l'intensité du courant de commande $i(t)$, s'obtient classiquement sachant que l'induit peut être modélisé comme une résistance R en série avec une inductance L et une force électromotrice $e(t)$:

$$u(t) = R i(t) + L \frac{di}{dt}(t) + e(t)$$

- L'équation mécanique s'obtient en appliquant le théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble mécanique entraîné par le rotor tournant à la vitesse (pulsation) $\omega(t)$, soumis à un couple électromagnétique $c_m(t)$ et un couple résistant $c_r(t)$:

$$c_m(t) - c_r(t) = J \frac{d\omega}{dt}(t)$$

où J est l'inertie équivalente de l'ensemble des parties mobiles, ramenée sur le rotor.

- Les équations de couplage électromécanique s'écrivent :

$$c_m(t) = K_c i(t)$$

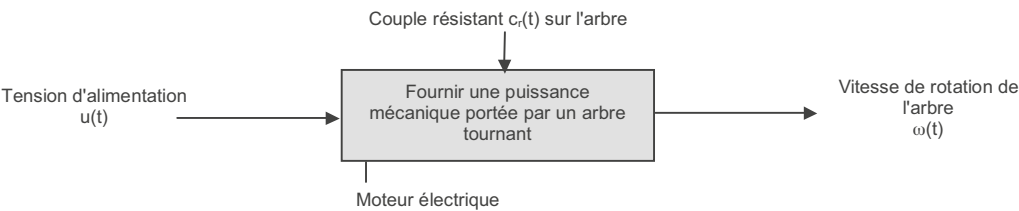
$$e(t) = K_v \omega(t)$$

où K_c et K_v sont des constantes, appelées respectivement constante de couple et constante de vitesse.

Un tel moteur, commandé en tension $u(t)$, peut alors se caractériser par la loi de comportement que traduit l'équation différentielle suivante, obtenue à partir des quatre équations ci-dessus, par élimination de $i(t)$ et $e(t)$:

$$\omega(t) + \frac{RJ}{K_c K_v} \frac{d\omega}{dt}(t) + \frac{LJ}{K_c K_v} \frac{d^2\omega}{dt^2}(t) = \frac{1}{K_v} u(t) - \frac{1}{K_c K_v} (R c_r(t) + L \frac{dc_r(t)}{dt})$$

Il apparaît que la vitesse $\omega(t)$ du rotor est commandée par la tension $u(t)$ de son alimentation, mais dépend aussi du couple résistant. Sous cette modélisation (où les pertes calorifiques n'apparaissent pas) une autre représentation fonctionnelle du moteur peut alors être élaborée :

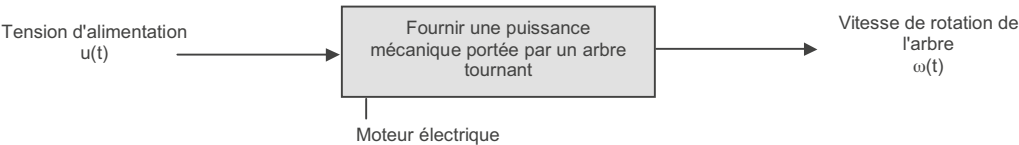


NB : Sachant, par exemple, que les valeurs des constantes électriques peuvent dépendre légèrement de la température, cette description peut être complétée par l'indication de la température ambiante en donnée de contrôle dans une description très précise.

Si on suppose, assez grossièrement, que le couple résistant est constant, ce qui correspond, via la chaîne vérin-pompe à une **action de l'eau sur le safran constante**, cette donnée de contrôle devient inutile, d'où la loi de comportement simplifiée :

$$\omega(t) + \frac{RJ}{K_c K_v} \frac{d\omega}{dt}(t) + \frac{LJ}{K_c K_v} \frac{d^2\omega}{dt^2}(t) = \frac{1}{K_v} u(t) - C^{te}$$

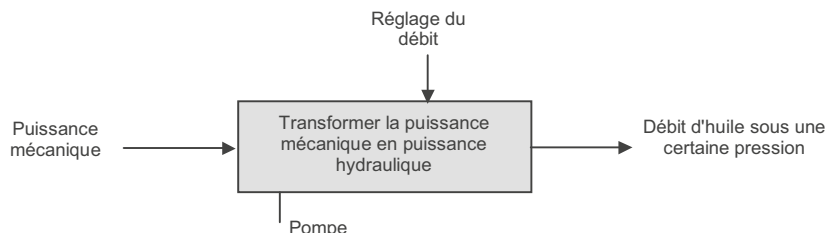
Loi à laquelle on associe le bloc fonctionnel :



Ce bloc est compatible avec le bloc A212 de la description du groupe hydraulique du pilote.

III-4-2 Accouplement de la pompe

La puissance mécanique fournie par le moteur permet l'entraînement de la pompe. Celle-ci génère une puissance hydraulique sous forme d'un débit d'huile sous une certaine pression, constante, puisque précédemment l'action de l'eau sur le safran a été supposée constante :

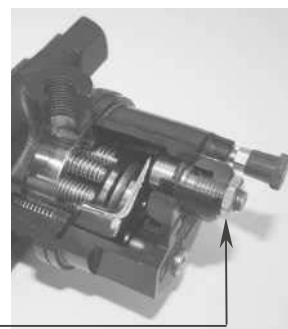


■ Construction d'un modèle mathématique :

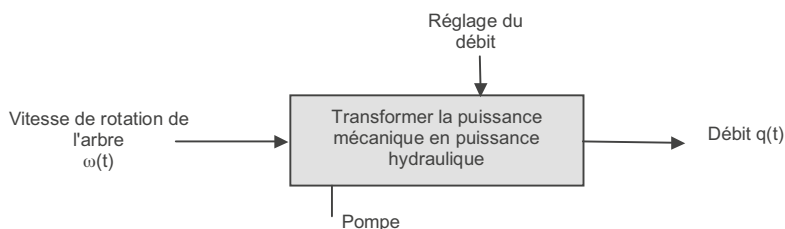
La pompe étant une pompe volumétrique, le débit d'eau $q(t)$ qu'elle fournit ne dépend, pour un réglage donné, que de la vitesse de rotation de son arbre d'entrée, accouplé au moteur électrique. Dans la puissance mécanique entrante, seule la composante de vitesse intervient donc dans la réalisation de la fonction.

Le débit peut être considéré comme proportionnel à cette vitesse si la pompe est suffisamment régulière (très grand nombre de pistons, rotation très rapide). Le modèle mathématique associé au système pompe est donc : $q(t) = K \omega(t)$.

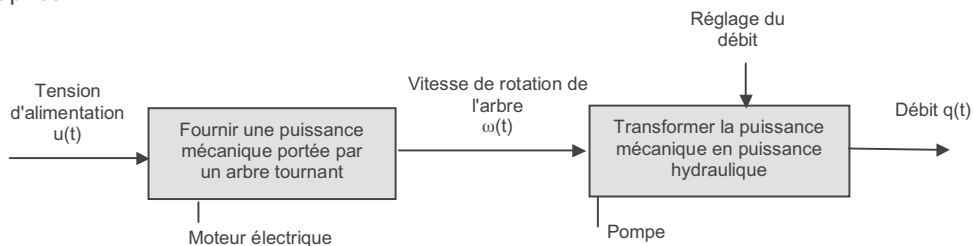
L'opération de réglage du débit a pour action de définir la grandeur K .



On lui associe alors la description fonctionnelle :

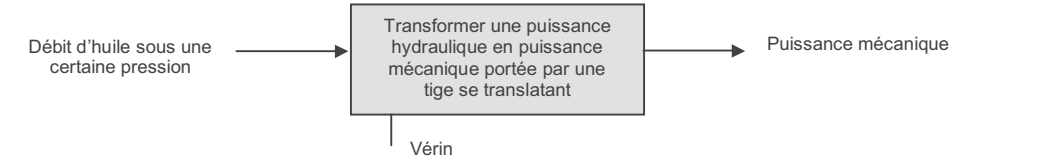


On constate, dans cette description, une matière d'œuvre entrante qui n'est autre que la matière d'œuvre sortante de la description retenue pour le moteur, ce qui permet la connexion des graphes :



III-4-3 Accouplement du vérin double effet

La puissance hydraulique fournie par la pompe permet le déplacement de la tige du vérin. Celui-ci génère une puissance mécanique sous forme d'une vitesse de déplacement s'opposant à un effort résistant, constant, toujours puisque précédemment l'action de l'eau sur le safran a été supposée constante :



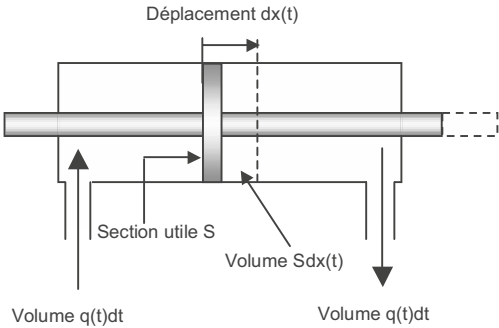
■ Construction d'un modèle mathématique :

La vitesse de déplacement s'obtient par division du débit par la section utile du vérin. Le modèle mathématique associé est donc :

$$v(t) = \frac{1}{S} q(t)$$

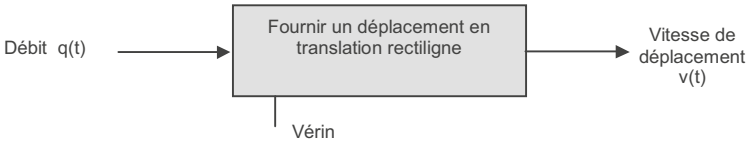
En effet, pendant une durée élémentaire dt , le piston s'est déplacé d'une distance $dx(t)$ et la quantité d'huile entrée (ou sortie) est $q(t)dt$. L'huile étant raisonnablement incompressible pour les pressions en jeu, cette quantité d'huile correspond au volume décrit par la section utile de piston, soit $Sdx(t)$.

Alors $Sdx(t) = q(t)dt$, d'où $S \frac{dx}{dt}(t) = q(t)$ et donc le résultat.

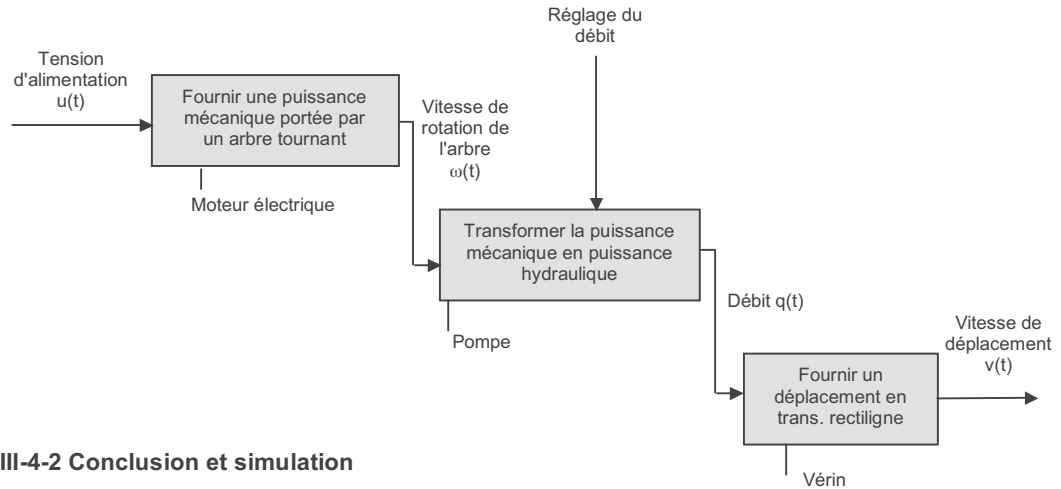


NB : on remarquera ici tout l'intérêt d'avoir un vérin à double tige présentant la même section utile de chaque côté du piston et donc l'égalité des débits entrant et sortant.

On associe à ce modèle la description fonctionnelle :



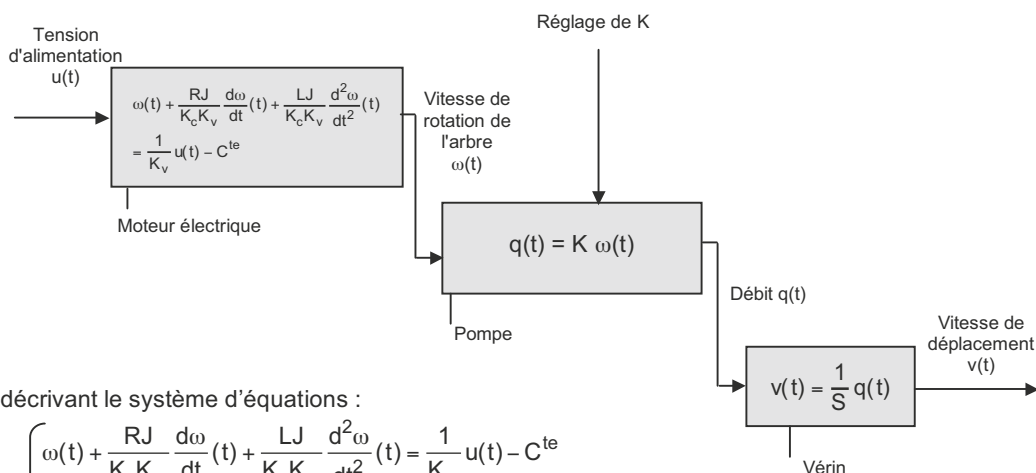
Description pouvant se connecter à celle du système moteur-pompe précédemment établie :



III-4-2 Conclusion et simulation

Les développements précédents ont permis de proposer un modèle mathématique (sous les hypothèses simplificatrices signalées) au sous-système réalisant les fonctions A212, A213 et A214

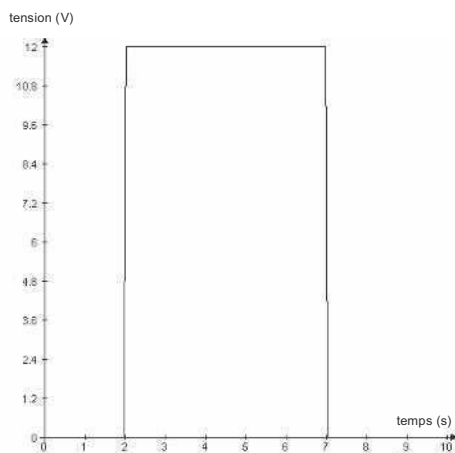
prises en évidence dans l'analyse SADT. Ce modèle peut également se représenter graphiquement par :



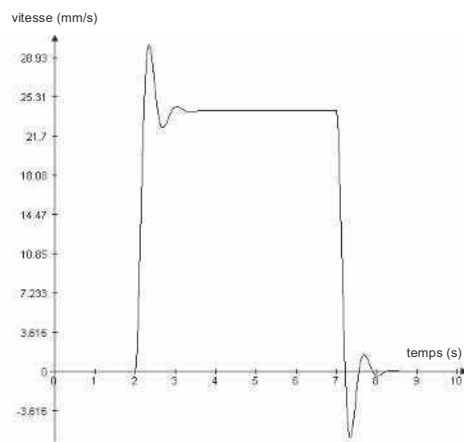
décrivant le système d'équations :

$$\begin{cases} \omega(t) + \frac{RJ}{K_c K_v} \frac{d\omega}{dt}(t) + \frac{LJ}{K_c K_v} \frac{d^2\omega}{dt^2}(t) = \frac{1}{K_v} u(t) - C^{te} \\ q(t) = K \omega(t) \\ v(t) = \frac{1}{S} q(t) \end{cases}$$

La résolution de ces équations permet d'avoir la vitesse de déplacement $v(t)$ de la tige du vérin en fonction de la tension d'alimentation $u(t)$ du moteur à partir de conditions initiales. Ici par exemple, si $u(t)$ est un créneau (tension constante pendant un certain temps, nulle sinon) à partir d'une situation de repos, l'évolution de la vitesse $v(t)$ a l'allure donnée ci-dessous. Ceci constitue une simulation du fonctionnement du sous-système, que l'ingénieur devra confronter aux résultats attendus, tout en gardant en mémoire que des hypothèses simplificatrices ont été acceptées pour construire le modèle.



Matière d'œuvre entrante : créneau de tension



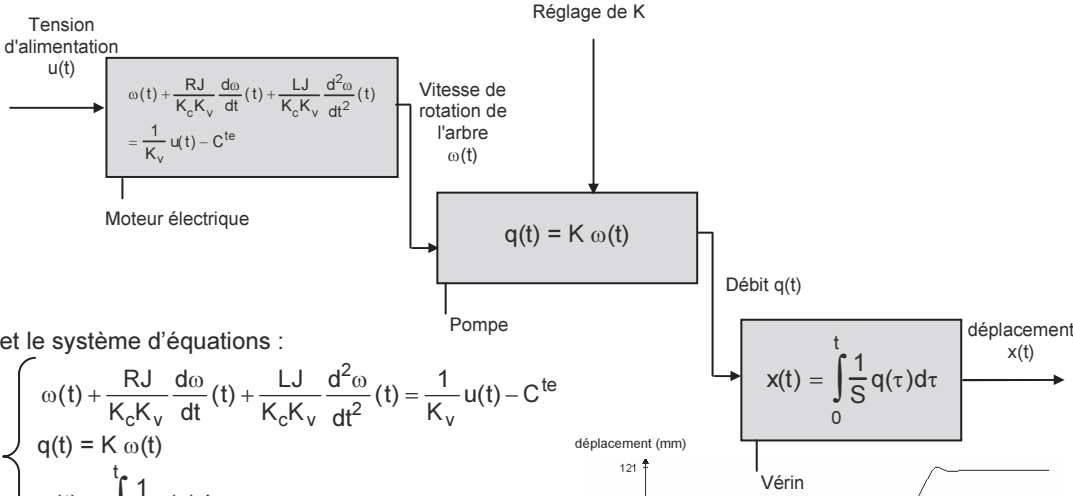
Matière d'œuvre sortante : vitesse de tige

■ Remarque

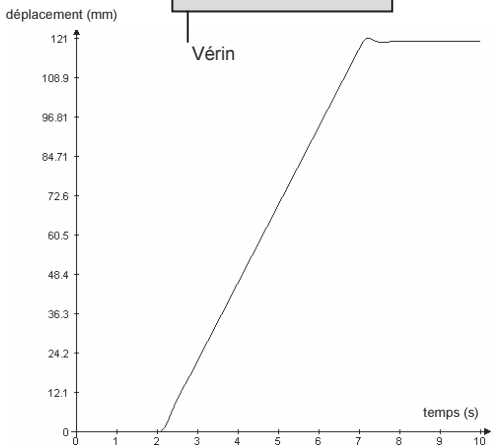
Si la matière d'œuvre sortante qu'il convient de considérer (notion de point de vue) n'est pas la vitesse de déplacement de la tige, mais ce déplacement lui-même depuis la position occupée à la date $t=0$, on écrira par intégration que ce déplacement est :

$$x(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau = \int_0^t \frac{1}{S} q(\tau) d\tau$$

D'où la nouvelle description :



Le déplacement prévu associé n'est autre bien sûr que l'intégrale de la vitesse depuis l'instant initial, donné ci-contre.



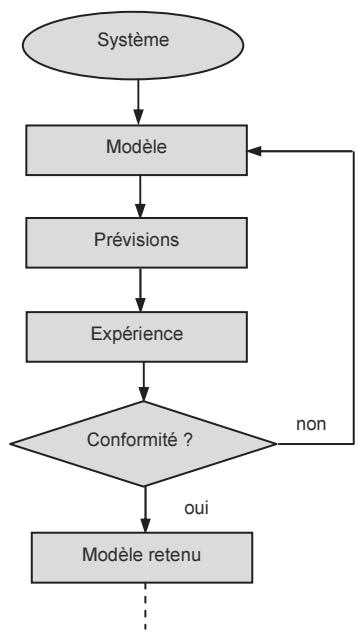
IV - MODÉLISATION ET SIMULATION - QUELQUES PRÉCISIONS

IV-1 Démarches de modélisation : modèles de connaissance et de comportement

Les trois composants du sous-système décrit précédemment ont pu être modélisés mathématiquement, **sous certaines hypothèses simplificatrices**, à partir de résultats établis dans divers champs disciplinaires de l'ingénieur : ici l'électricité, la mécanique et l'hydraulique. De tels modèles sont appelés **modèles de connaissances**.

Par exemple les problèmes de sensibilité des composants du moteur à la chaleur ont été occultés, les efforts ont été supposés constants, etc. Par ailleurs, les limites en déplacement du vérin, ou en vitesse, courant et tension du moteur, n'ont pas été prises en compte.

Il est important de bien noter que ces hypothèses simplificatrices acceptées doivent être validées par une confrontation entre les prévisions du modèle et la réalité constatée par l'expérience. Dans le cas contraire, ces hypothèses doivent être revues, et donc le modèle tout entier également.



Par cette confrontation itérative, caractéristique du travail scientifique, l'ingénieur aboutit à un modèle satisfaisant dans un certain contexte précisément défini, où les hypothèses sont acceptables. Ce contexte est appelé **domaine de validité** du modèle.

Lorsque la complexité est trop importante, ou dans des contextes où la science ne fournit pas de réponse suffisamment précise, un modèle de connaissances peut s'avérer impossible à établir.

La seule solution consiste alors en une expérimentation sur le composant, qui doit donc exister, du moins sous forme de prototype en phase de conception. Il est alors soumis à des sollicitations types. Ses réponses à ces sollicitations permettent de le décrire à partir de modèles mathématiques standards. On dit alors que l'on procède par **identification** et les modèles ainsi élaborés sont appelés **modèles de représentation** ou **de comportement**.

Tout au long de cet ouvrage, seront présentés des exemples de modèles de comportement usuels (comme nous venons déjà de le voir pour un moteur à courant continu, une pompe volumétrique ou un vérin hydraulique) ainsi que des méthodes permettant l'identification à des modèles de représentation.

■ **Remarque :** Par ailleurs, il faut noter que l'ingénieur utilise également des sources extérieures, lorsqu'il assemble, dans le système qu'il conçoit, des composants provenant de fournisseurs. Dans ce cas, ce sont ces fournisseurs qui communiquent des modèles pour leurs produits. Ceux-ci sont alors pris comme objets techniques, non décomposables. Ces modèles, qu'ils soient de connaissances ou de représentation, devront être combinés à ceux des autres composants du système, selon la structure de celui-ci.

Le modèle global, assemblage de tous les modèles des différents composants du système (quelque soit leur origine), peut alors être utilisé pour effectuer des **simulations** aidant l'ingénieur dans sa tâche de **prise de décision** tout au long de la phase de conception ou d'amélioration du système.

IV-2 Complexité mathématique

L'exemple retenu précédemment a été volontairement simple, car il est introductif :

- le modèle de connaissances a été établi sous de nombreuses hypothèses simplificatrices ;
- les trois équations obtenues sont relativement simples et indépendantes les unes des autres.

Ce dernier point est dû au fait que la structure du sous-système considéré est la simple mise en série de trois composants. Lorsque des boucles apparaissent, comme par exemple sur le diagramme A0 décrivant le système entier, pilote automatique + voilier, la résolution des équations est beaucoup plus complexe.

Cet ouvrage proposera des méthodes mathématiques, à travers la définition de la transformée de Laplace et de la notion de fonction de transfert permettant de pallier certaines difficultés.

Toutefois, dans bien des situations, aujourd'hui, la complexité des équations obtenues est telle que seule une simulation numérique permet leur résolution. Cette simulation peut être effectuée soit par programmation soit, de plus en plus aujourd'hui, par des logiciels spécifiques aux interfaces graphiques puissants.

Les possibilités énormes qu'offrent aujourd'hui des logiciels de ce type ne doivent pas pour autant dispenser l'ingénieur, et a fortiori l'élève ingénieur, d'une réflexion quant aux simplifications raisonnables pouvant être apportées au modèle, ceci dans un souci de clarté, de limitation des risques d'erreur et de temps de calcul. On peut trouver ici une analogie avec les cartes routières : il est inutile pour un trajet autoroutier de s'encombrer de cartes de randonnée au 1/25000 ...

V - SYSTÈMES AUTOMATIQUES

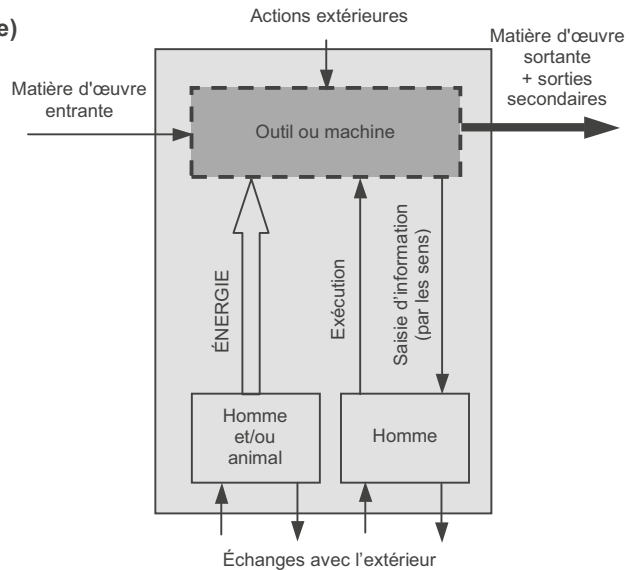
V-1 Un peu d'histoire

Il est usuel de définir quatre grandes catégories de systèmes, correspondant à quatre périodes de l'histoire de l'humanité. Toutefois, les quatre catégories cohabitent, une nouvelle n'ayant jamais totalement éliminé l'ancienne.

■ Avant la mécanisation (de la préhistoire au 18 ou 19^{ème} siècle)

À part quelques cas très particuliers, pendant toute cette période, l'homme fait partie intégrante de tous les systèmes qu'il conçoit. Sa présence est indispensable au fonctionnement du système.

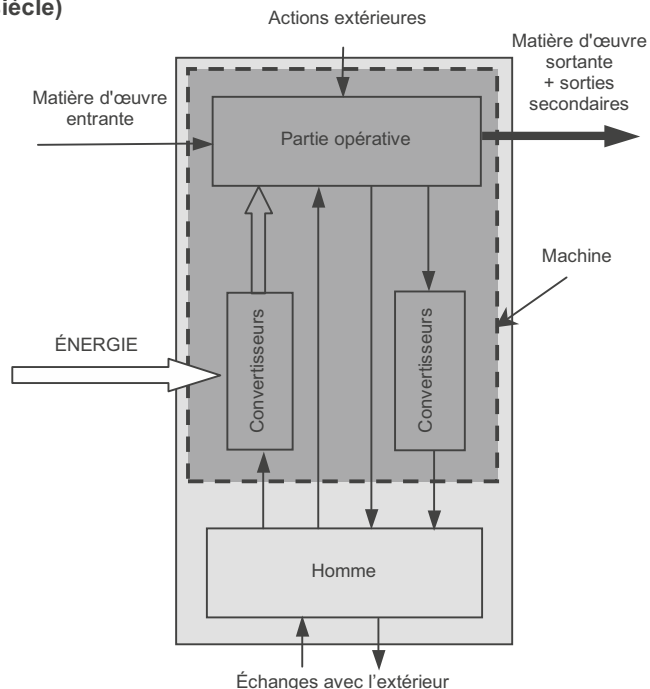
Il apporte parfois l'**énergie**, quand ce travail n'est pas confié à un animal, et toujours son **savoir-faire**. C'est lui qui assure la commande de l'outil ou de la machine sur laquelle il exécute un travail, qu'il ajuste en fonction des observations que lui renvoient ses sens : vue, sensation d'effort, etc.



■ Avant l'automatisation (du 19^{ème} siècle au début du 20^{ème} siècle)

La **mécanisation**, permise par la découverte de la machine à vapeur, puis de l'électricité et des moteurs thermiques, permet un **apport énergétique extérieur** au système.

La partie du système qui agit directement sur la matière d'œuvre est alors appelée **partie opérative**. L'homme est toujours présent dans le système, mais il n'apporte plus d'énergie : il n'intervient que par son savoir-faire. Celui-ci lui permet de donner des ordres à la partie opérative, par des convertisseurs connectés à la source d'énergie : vannes sur les machines à vapeur, potentiomètres sur les machines électriques, etc. Il agit parfois directement sur la partie opérative, mais de manière secondaire et à niveau d'énergie faible.



Les retours d'information que l'homme reçoit, soit directement, soit par des intermédiaires adaptés (voyants, ...) lui permettent, en fonction de son savoir-faire, de corriger les ordres jusqu'à obtention du résultat.

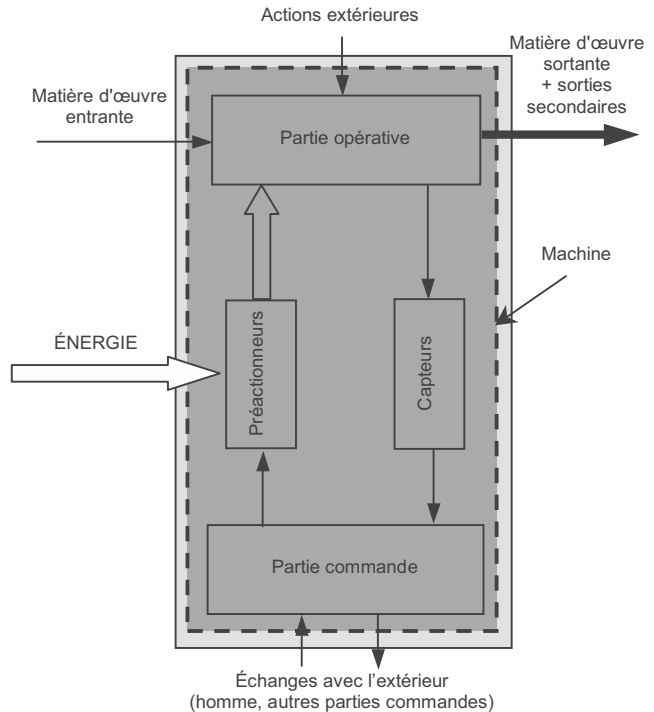
*NB : le terme de **mécanisation** provient du fait historique que les premiers systèmes ainsi réalisés possédaient des parties opératives agissant sur des matières d'œuvre de nature mécanique. Il doit se comprendre, de manière plus générale aujourd'hui, pour des matières d'œuvre autres (thermiques, électriques, etc.).*

■ Après l'automatisation (depuis le milieu du 20^{ème} siècle)

L'automatisation permet, à partir de la seconde guerre mondiale, que la frontière de la machine rejoigne celle du système. Pour cela un nouvel organe apparaît : la **partie commande**.

Celle-ci possède le savoir faire nécessaire que l'homme lui a transmis.

Dans ce contexte, l'homme est complètement extérieur au système en fonctionnement. Ses seules interventions consistent en la programmation de la partie commande et aux opérations de marches et arrêts. Cette tâche peut d'ailleurs aussi faire l'objet d'autres parties commandes, de systèmes automatisés extérieurs dits alors hiérarchiquement supérieurs.

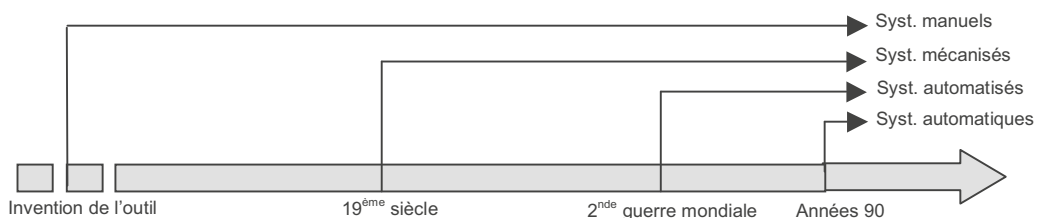


Les convertisseurs d'ordres vers la partie opérative et d'informations depuis la partie opérative sont alors respectivement appelés **préactionneurs** et **capteurs**.

■ Plus récemment (depuis la fin du 20^{ème} siècle)

Depuis une vingtaine d'années, on assiste à une évolution notable vers **l'intégration** des différents constituants.

L'automatisation, comme son nom l'indique, résultait d'une démarche qui consistait à remplacer l'homme dans un système où il était présent. On automatisait un système. On réalisait des systèmes **automatisés**. La démarche de conception suivait l'histoire : on automatisait un système mécanisé. Mais aujourd'hui, les systèmes sont directement conçus comme tels. Leurs constituants ne respectent plus nécessairement le découpage simple des systèmes automatisés. Les préactionneurs peuvent être intégrés à la partie commande par exemple. Il est alors délicat de parler de systèmes automatisés. On parle alors tout simplement de **systèmes automatiques**.



■ L'exemple du pilote automatique de voilier

Le système où le cap est maintenu par un barreur est un système manuel. Le barreur utilise l'énergie issue de sa force physique pour manœuvrer la barre et agit sur celle-ci pour réajuster en permanence le cap.

Il existe des systèmes mécanisés où une assistance hydraulique fournit l'essentiel de l'énergie nécessaire à la rotation de la barre, la position de celle-ci continuant à être définie par le barreur. C'est une solution de mécanisation, comparable par exemple avec les directions assistées des automobiles.

Le système de pilote automatique qui a été décrit précédemment est un système automatisé.

V-2 Définitions

V-2-1 Système automatique

Compte tenu de l'introduction historique qui vient d'être conduite, on peut retenir la définition suivante :

Un système automatisé ou automatique est un système dans lequel le savoir faire de l'homme est assuré par une partie du système lui-même.

La distinction entre « automatisé » et « automatique », qui traduit la démarche historique, n'offre pas grand intérêt puisque les deux types de systèmes ne présentent pas fonctionnellement de différence. Tous deux seront donc qualifiés d'**automatiques** dans la suite de cet ouvrage.

Il existe, bien entendu, de nombreux systèmes au caractère automatique partiel, une partie seulement du savoir faire étant assurée par un constituant. Leur qualification selon les termes qui viennent d'être définis s'avère alors délicate. Il en va par exemple d'un véhicule possédant une boîte de vitesses automatique, un régulateur de vitesse, une climatisation, etc., mais qui continue à être dirigé par le conducteur. Les sous-systèmes cités sont clairement automatiques, par contre le système véhicule ne l'est pas.

On parlera alors de systèmes partiellement automatiques.

V-2-2 Partie commande (PC)

C'est le sous-système qui élabore des ordres vers les préactionneurs, qui provoqueront les actions voulues sur la partie opérative. Cette PC agit en fonction :

- d'informations issues de la partie opérative via les capteurs,
- d'informations en mémoire ou fournies par l'extérieur.

V-2-3 Préactionneurs

Ce sont les sous-systèmes qui distribuent l'énergie vers la partie opérative en fonction des ordres qu'ils reçoivent de la partie commande. Ils sont connectés à la source extérieure d'énergie.

V-2-4 Capteurs

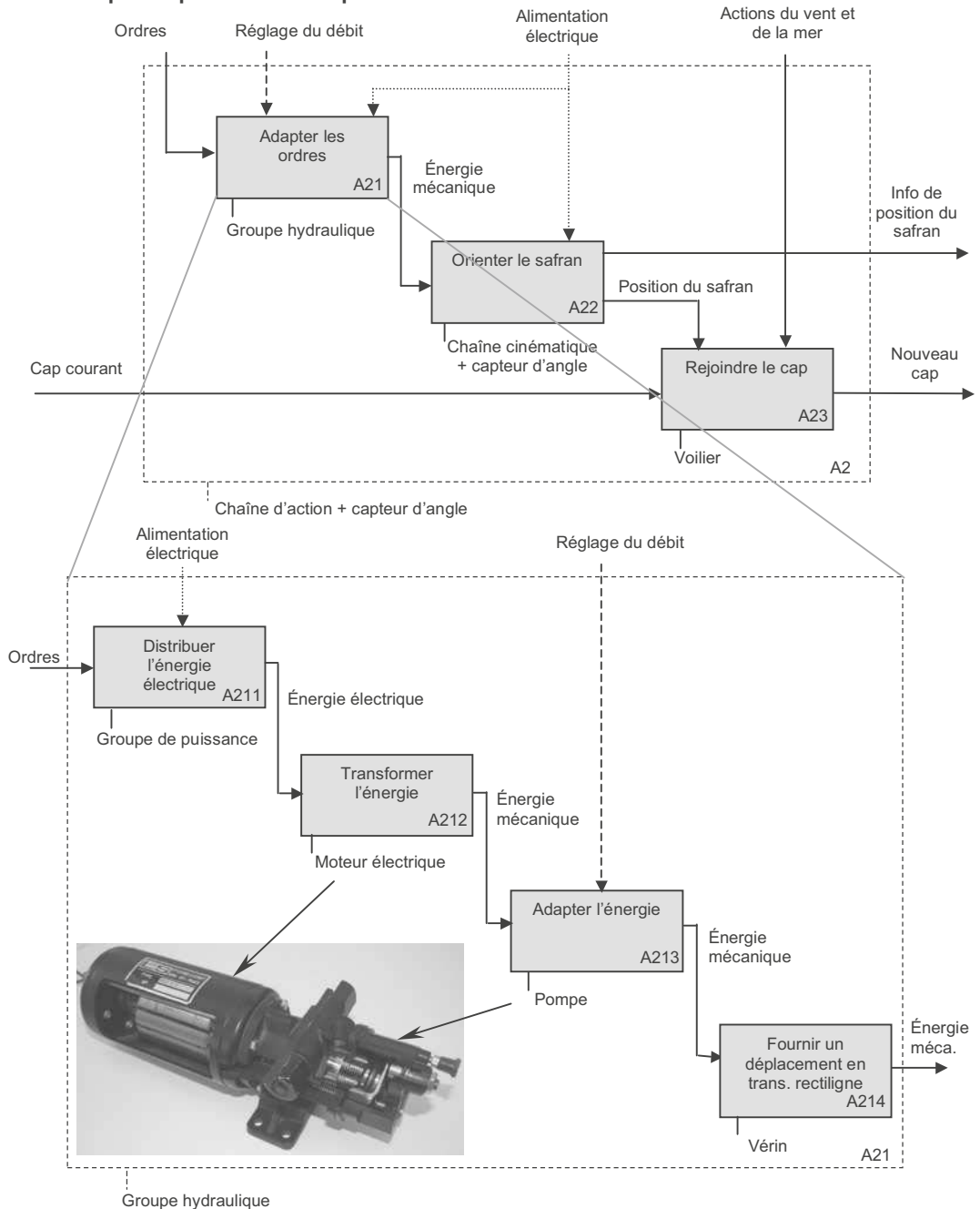
Ce sont les sous-systèmes qui évaluent l'état de la partie opérative pour transmettre des informations à la partie commande.

V-2-5 Partie opérative (PO)

C'est le sous-système complément, les trois précédents ayant été définis. Si la complexité le permet, on y distingue :

- les actionneurs qui convertissent l'énergie ;
- les transmetteurs qui transmettent l'énergie ;
- les effecteurs qui opèrent sur la matière d'œuvre.

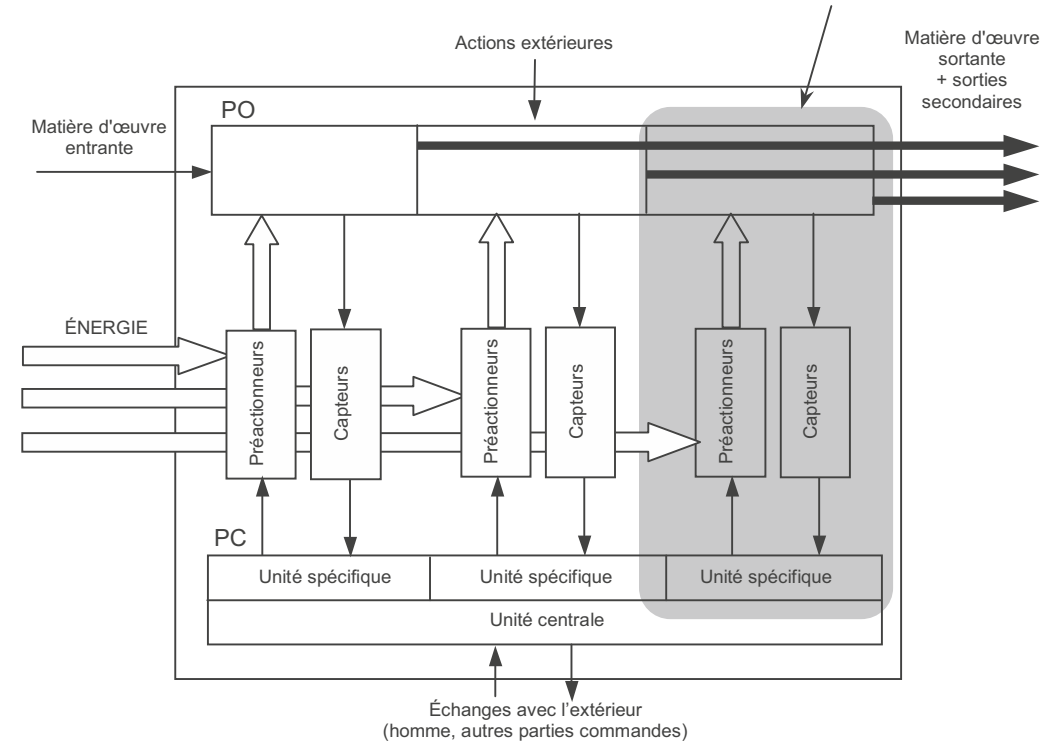
■ L'exemple du pilote automatique de voilier



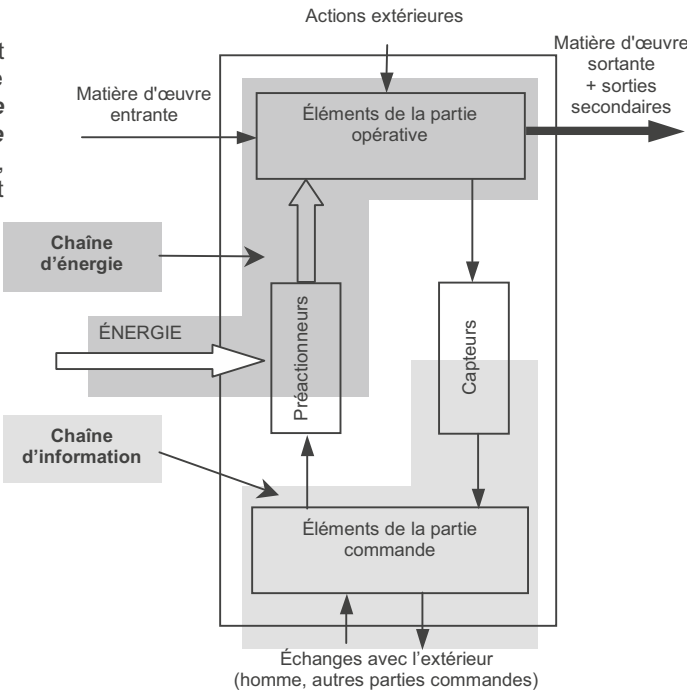
Le préactionneur est le groupe de puissance. L'actionneur est le moteur électrique. Les différents transmetteurs sont la pompe, le vérin et la chaîne cinématique où un capteur mesure l'orientation de l'arbre de sortie. L'effecteur est le voilier muni de son safran. On s'aperçoit que les choix ayant abouti à l'analyse descendante présentée ne respectent pas le découpage fonctionnel qui vient d'être défini. Petite difficulté, liée au point de vue, à laquelle il conviendra d'apprendre à s'adapter...

V-2-6 Notion de chaîne fonctionnelle

Lorsque la complexité des systèmes augmente, le découpage qui vient d’être proposé peut s’avérer inopérant. En effet, lorsque la partie opérative exécute plusieurs fonctions en parallèle, c’est-à-dire qu’elle travaille sur une matière d’œuvre multivariable, il devient plus pratique d’extraire de la PC, de la PO, du nombre de préactionneurs et de capteurs, les éléments qui participent à la réalisation d’une même fonction, définissant alors ce que l’on appelle une **chaîne fonctionnelle** :



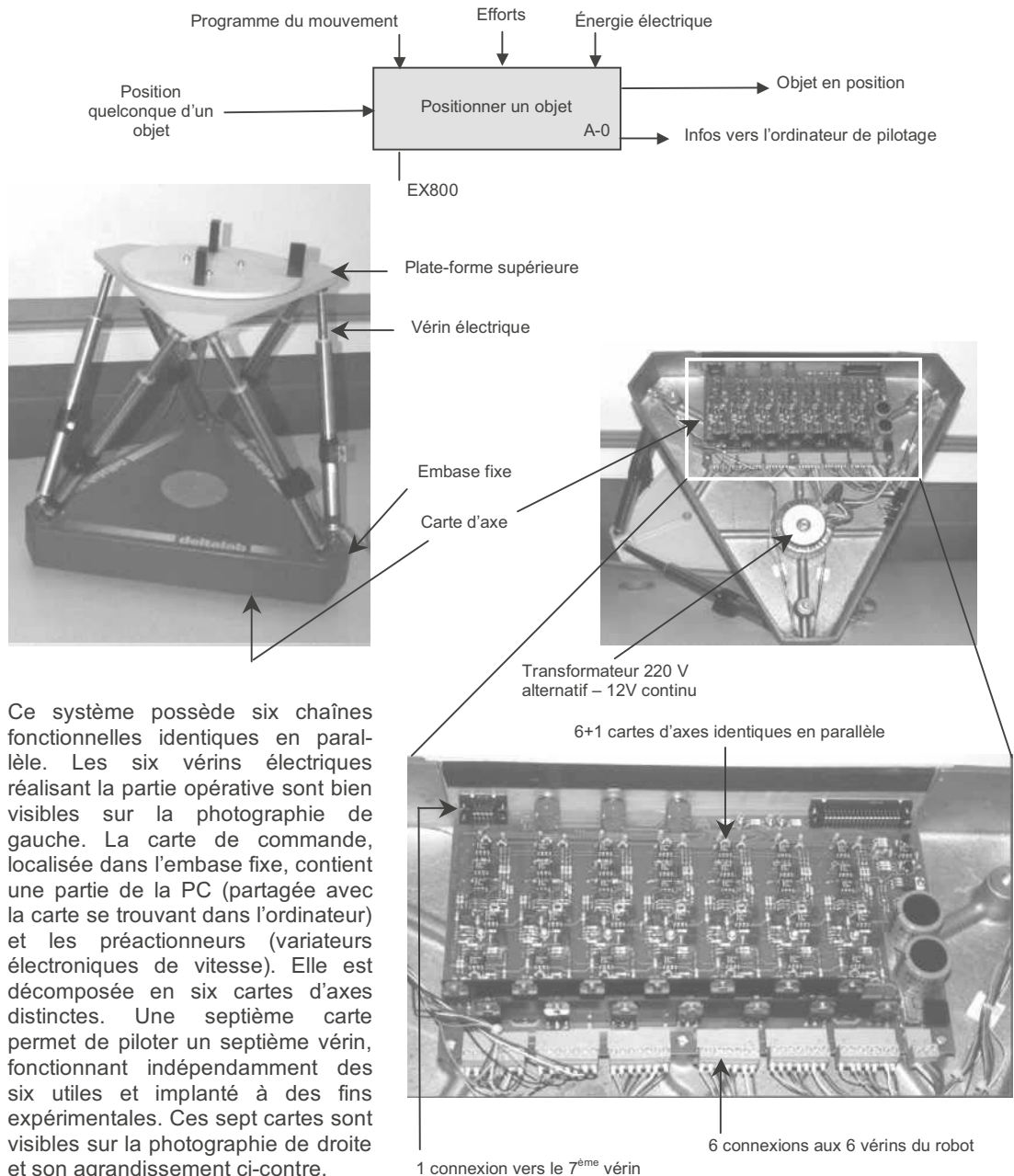
Dans ce contexte d'isolement d'une chaîne fonctionnelle, le découpage fonctionnel en **chaîne d'énergie** (ou d'action) et **chaîne d'information** (ou de commande), définies ci-contre, est couramment utilisé.



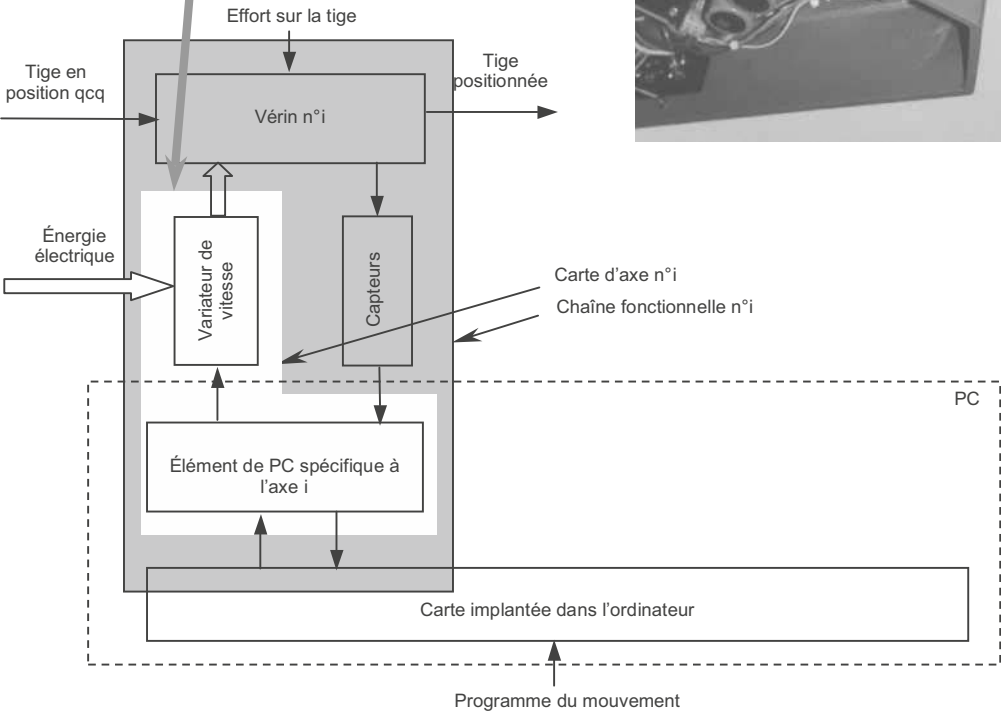
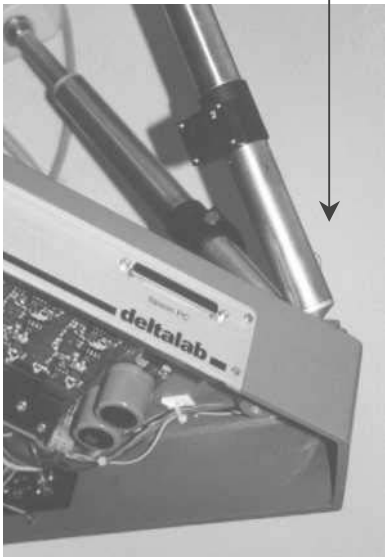
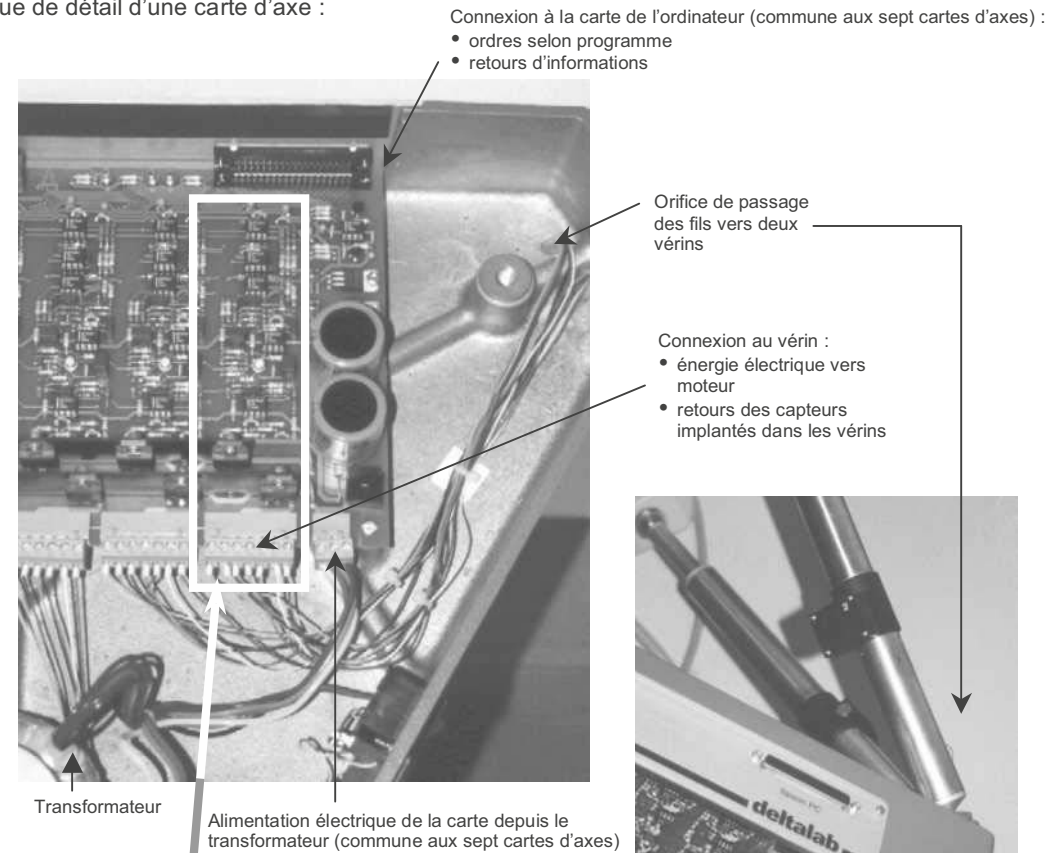
■ Robot parallèle 6 axes EX800

Le pilote automatique ne présente qu'une seule chaîne fonctionnelle. Parmi les différents systèmes proposés pour le laboratoire de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur des classes préparatoires scientifiques, prenons l'exemple de la plate-forme (robot parallèle) 6 axes développée par la société Deltalab-Cosimi : <http://www.deltalab-cosimi.fr>

Un tel système permet de déplacer un objet supporté par la plate-forme supérieure par rapport à l'embase fixe à l'aide de six vérins électriques montés sur des rotules entre ces deux solides. Il reproduit la structure de systèmes utilisés dans des simulateurs (de vol, de conduite, etc.), dans certains robots industriels, dans certaines machines-outils de nouvelle génération, etc.



Vue de détail d'une carte d'axe :



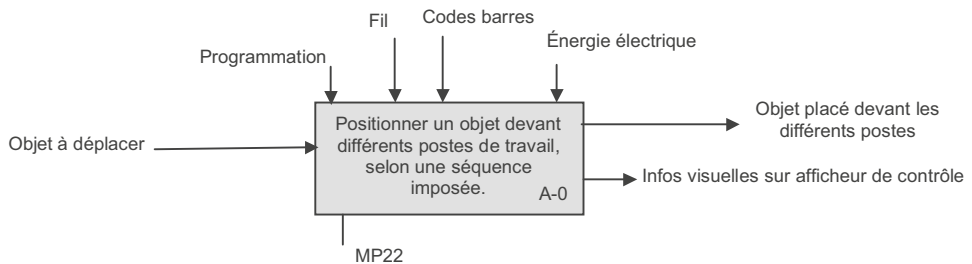
V-3 Systèmes logiques, continus, échantillonnés

Pour une chaîne fonctionnelle donnée, la nature des informations sur laquelle travaille la partie concernée de la PC peut être, selon le besoin, représentée par une grandeur logique ou continue.

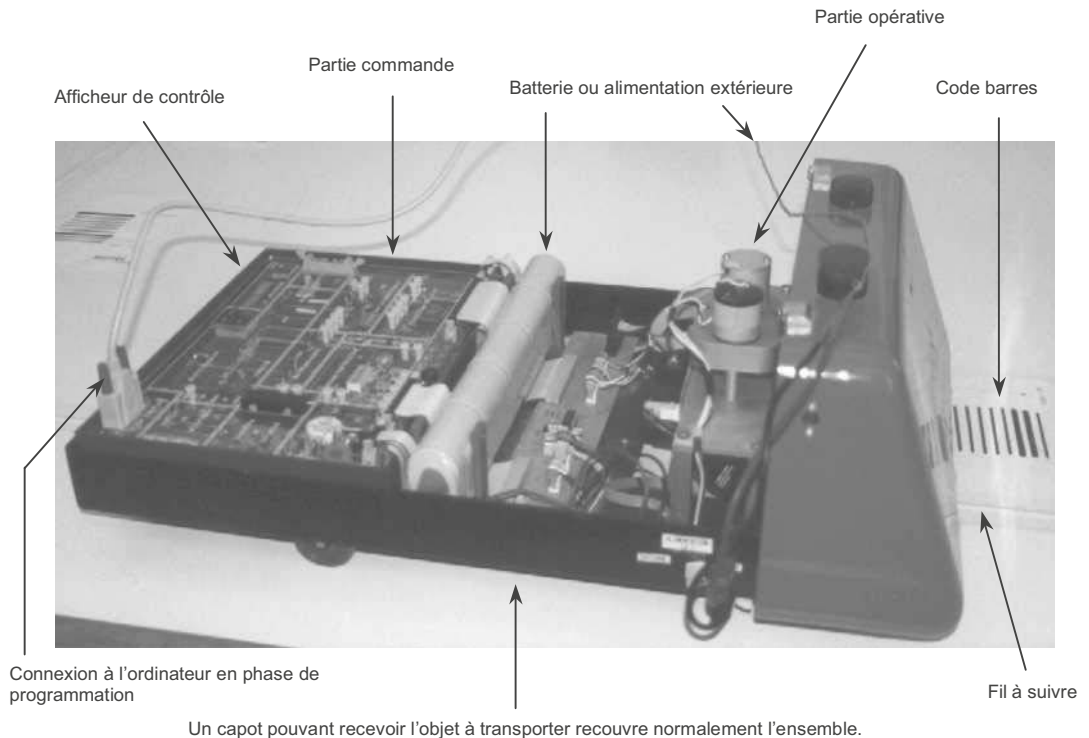
■ Chariot filoguidé Mentor Sciences MP22

Le chariot filoguidé également proposé pour le laboratoire de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur des classes préparatoires scientifiques présente de nombreuses chaînes fonctionnelles dont certaines travaillent sur des grandeurs logiques, d'autres sur des grandeurs continues. Il est commercialisé par la société Didalab : <http://www.didalab.fr>

Ce chariot reproduit, à échelle réduite, un chariot tel qu'on en rencontre dans les ateliers de production flexibles modernes, se déplaçant le long d'un fil inséré dans le sol pour déplacer des objets d'un poste de travail à un autre. Les différents postes sont identifiés par des codes barres.



NB : d'autres entrées-sorties existent comme l'émission et la réception d'ultrasons pour la détection d'obstacles ou la réception de signaux infrarouges pour une commande manuelle, qui ne sont pas représentées ici dans un souci de simplification.

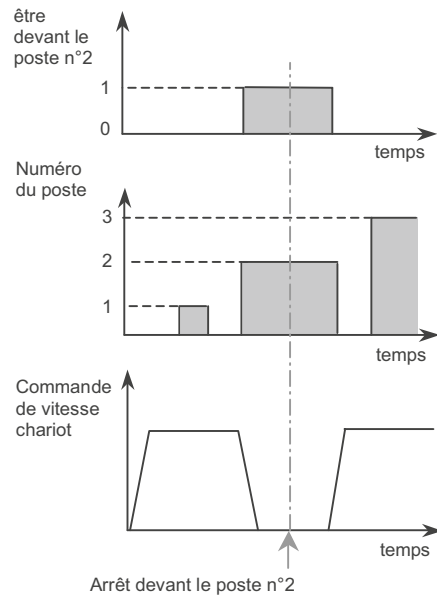


■ Définitions

Une grandeur **logique**, ou **binaire**, ne peut prendre que deux états, modélisés par les nombres 0 et 1. Par exemple le chariot est devant un certain poste (1) ou il ne l'est pas (0). La grandeur « être devant le poste n°i » est donc une grandeur logique.

On rencontre aussi le qualificatif de grandeur **discrète**. Une telle grandeur peut prendre plusieurs valeurs, par paliers. On peut toujours ramener une description par grandeur discrète à une description par grandeur logique par changement de variable. Par exemple la variable « numéro du poste » est une grandeur discrète. Elle peut être remplacée dans la description par les n grandeurs logiques « être devant le poste n°i ».

Une grandeur **continue** peut prendre toute valeur, dans un intervalle donné. Par exemple la commande de vitesse de déplacement du chariot ou sa distance mesurée par rapport au fil sont des grandeurs continues. Grandeur **analogique** est un synonyme.

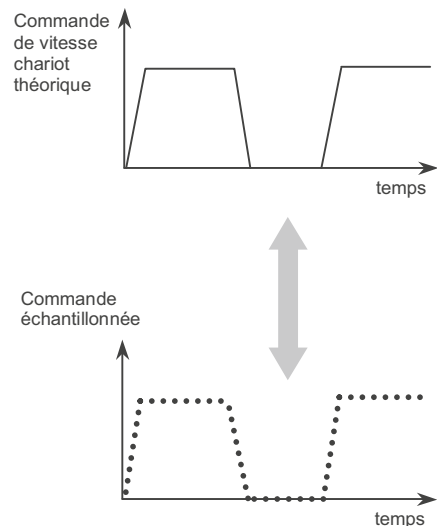


Les chaînes fonctionnelles travaillant sur des informations représentées par des grandeurs logiques ou discrètes sont les chaînes logiques. Elles ne sont pas abordées dans cet ouvrage qui traite uniquement des chaînes à variables continues.

■ Remarques

1- On rencontre très souvent le terme de **système** logique ou continu. En fait un même système (par exemple le chariot filoguidé) peut travailler sur différentes grandeurs, certaines logiques, d'autres continues. Il est donc plus convenable de qualifier les chaînes fonctionnelles constituant le système, comme il vient d'être fait. Toutefois, dans la suite de l'ouvrage, limité aux chaînes continues donc ne présentant pas d'ambiguïté, les termes de chaînes et de systèmes pourront être confondus.

2- Les technologies actuelles reposent de plus en plus sur des composants numériques, tels que des micro-processeurs, des filtres, des mémoires, etc. Ces composants travaillent sur des grandeurs continues préalablement codées en binaire par des convertisseurs (convertisseurs analogiques numériques CAN). Ils fournissent alors des résultats codés, qu'il convient de reconvertir en grandeurs continues par des convertisseurs inverses (convertisseurs numériques analogiques CNA). Ainsi, la partie commande ne travaille pas sur des grandeurs continues, mais sur des grandeurs codées avec une certaine précision, dites grandeurs **échantillonnées**. Des considérations qui dépassent le cadre de cet ouvrage montrent que sous certaines conditions de fréquence d'échantillonnage (nombre de points par unité de temps), les théories relatives aux signaux continus équivalents s'appliquent aux signaux échantillonnés. Toutes les études menées par la suite supposeront que ces conditions sont satisfaites.



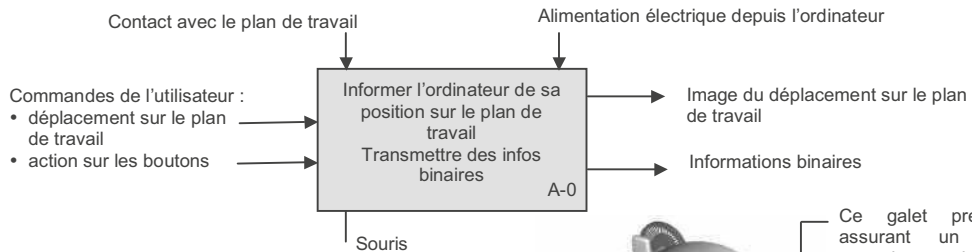
EXERCICES

I - SOURIS MÉCANIQUE D'ORDINATEUR

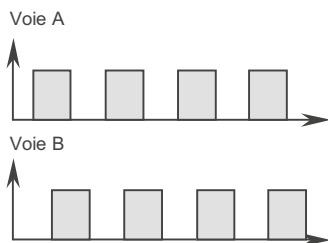
I-1 Présentation

Une souris d'ordinateur a pour fonction de transmettre deux types d'informations à un ordinateur :

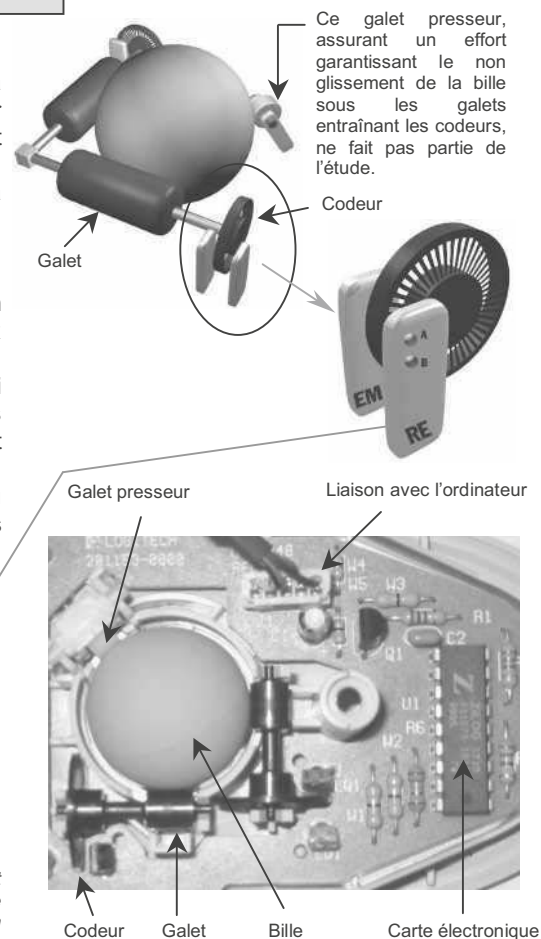
- une information continue, codée numériquement, de sa position sur le plan de travail ;
- des informations tout ou rien (binaires) obtenues par l'action de l'utilisateur sur des boutons.



L'étude proposée s'intéresse principalement à la première fonction, telle qu'elle est réalisée sur une souris mécanique. Ce type de souris est aujourd'hui remplacé par des souris optiques, plus performantes. L'utilisateur, en déplaçant la souris, génère la rotation d'une bille qui roule sans glisser sur le plan de travail. La rotation de la bille s'effectue autour d'un axe parallèle au plan de travail. Cette rotation est décomposée en deux composantes par l'intermédiaire de deux galets roulant sans glisser sur la bille. Ces galets commandent des codeurs incrémentaux qui transforment les fréquences de rotation des galets en signaux numériques. Ces signaux sont ensuite conditionnés par une carte électronique avant d'être transmis à l'ordinateur. L'essentiel du traitement consiste en une détermination du sens de rotation, conduisant à une incrémentation ou une décrément d'un compteur.



NB : Cette discrimination du sens de rotation se fait classiquement par comparaison de deux voies de mesure déphasées d'un quart de période, permettant la détermination de la voie qui précède l'autre.



Pour finir, cette image du déplacement de la souris sur le plan de travail est traduite, par le logiciel de pilotage de la souris, en les deux coordonnées du pointeur à l'écran. Cette dernière transformation, réalisée au sein de l'ordinateur, sort de la frontière retenue pour le système « souris ».

Les figures qui suivent fournissent des informations fonctionnelles venant compléter cette description.

Analyse APTE - graphe des interacteurs

FP1 : Informer l'ordinateur de sa position sur un plan
FP2 : Transmettre des informations binaires

FC1 : Envoyer des signaux numériques
FC2 : Être alimenté en énergie électrique
FC3 : Être en contact avec le plan
FC4 : Offrir une prise en main ergonomique.

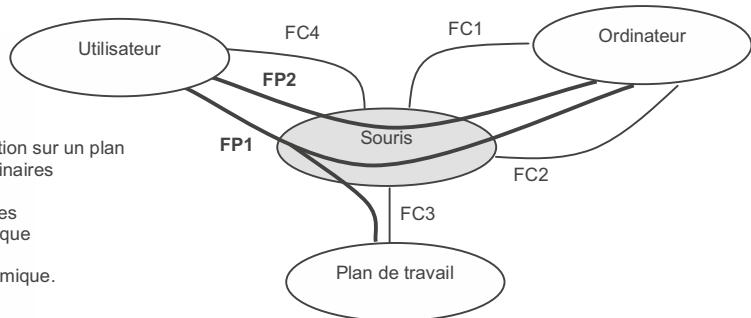
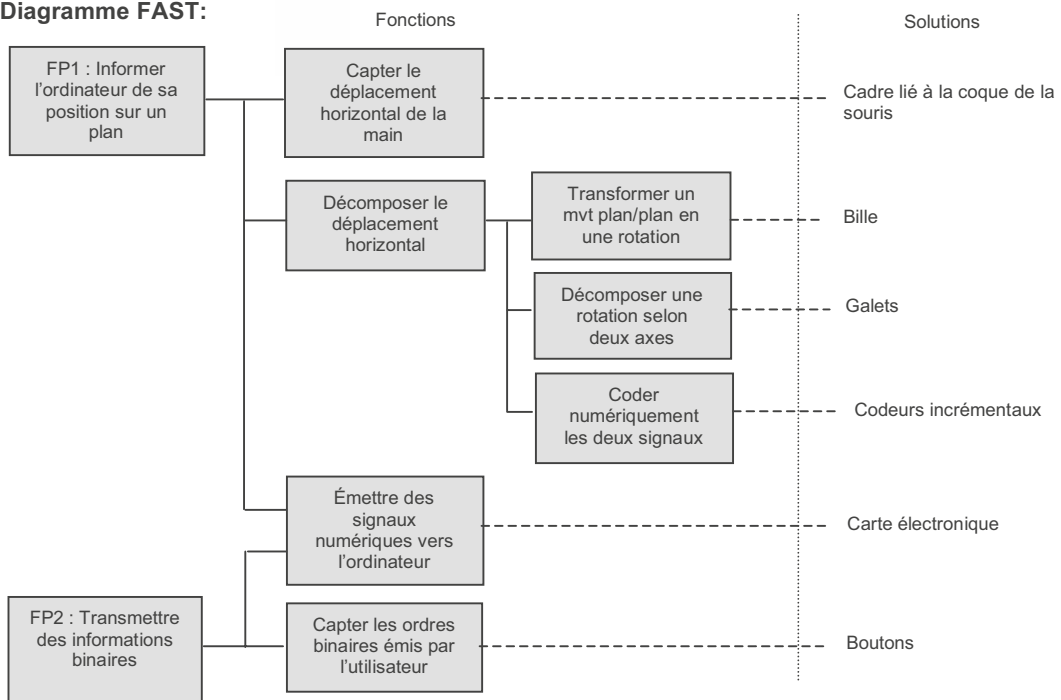


Diagramme FAST:

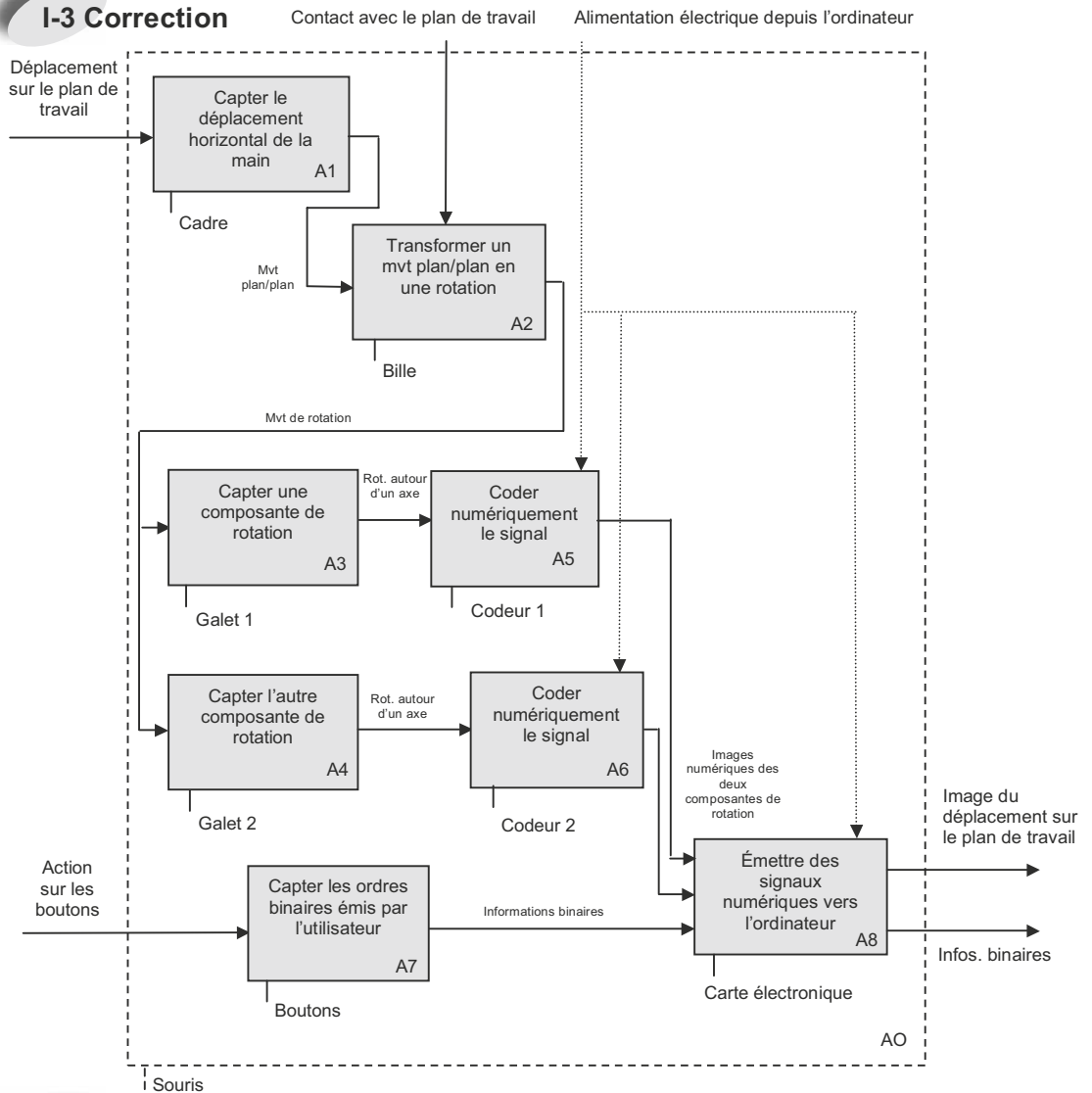


I-2 Travail demandé

À partir des différents éléments dont vous disposez, proposer une description de la souris selon la méthode SADT au niveau A0, faisant apparaître les huit sous-ensembles :

- cadre
- bille
- galet 1
- codeur associé au galet 1
- galet 2
- codeur associé au galet 2
- carte électronique
- boutons

I-3 Correction

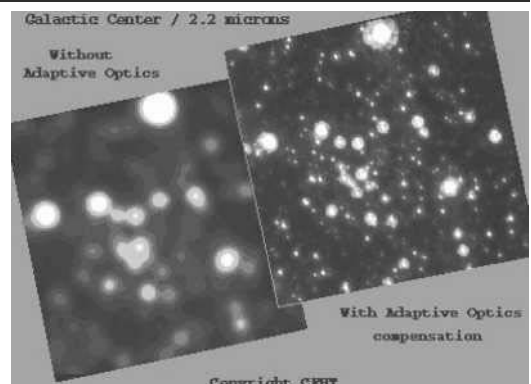


II - OPTIQUE ADAPTATIVE

D'après une épreuve du concours Mines-Ponts PSI.

II-1 Présentation

En instrumentation astronomique, un système d'optique adaptative (OA) permet de corriger les effets des turbulences de l'atmosphère. Celles-ci provoquent des fluctuations aléatoires de l'indice de réfraction des couches de l'atmosphère traversées par la lumière, et sont à l'origine des déformations des surfaces d'onde reçues par le télescope.



Il en résulte non seulement une déformation instantanée des images, mais également un « flou » dû aux variations de la surface d'onde pendant la pose.

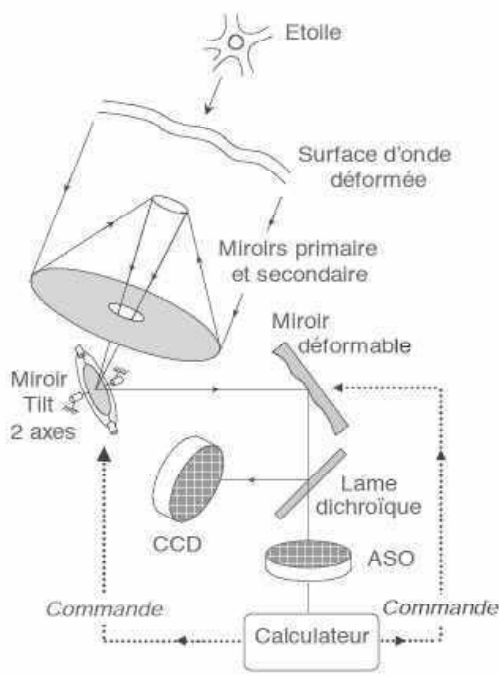
On étudie ici un sous-système de l'optique adaptative du Very Large Telescope européen (VLT).

Le schéma de principe d'une optique adaptative est présenté ci-contre : la surface d'onde, provenant de l'objet astronomique et déformée par l'atmosphère, est reçue par les miroirs primaire puis secondaire du télescope. La lumière est séparée par une lame dichroïque (un miroir partiellement réfléchissant), et renvoyée pour partie sur la caméra CCD où se forment les images, pour l'autre partie sur un analyseur de surface d'onde (ASO). Celui-ci fournit une estimation de la déformation de la surface d'onde. Un calculateur temps-réel déduit les commandes à appliquer aux actionneurs de l'optique adaptative.

Pour des raisons de traitement du signal et de technologie des miroirs adaptatifs, on décompose la surface d'onde en *modes*, c'est-à-dire qu'on la projette sur une base orthonormée de fonctions.

Les premiers modes sont un « piston », mode d'ordre zéro, constant, et deux basculements orthogonaux, modes d'ordre un : *tip-tilt* en anglais et *tilts* en jargon technique de l'astronomie.

Le mode piston est indifférent et n'est pas corrigé. Les *tilts* représentent 90% de l'énergie de déformation. Les modes d'ordre compris entre 2 et une valeur maximale choisie par les concepteurs peuvent être corrigés par un miroir déformable, dont la technologie est généralement à base de matériaux piézoélectriques. Ce miroir ne peut presque pas corriger les *tilts*. Il est donc préférable de confier cette fonction à un sous-système séparé commandant un miroir plan par deux rotations orthogonales.



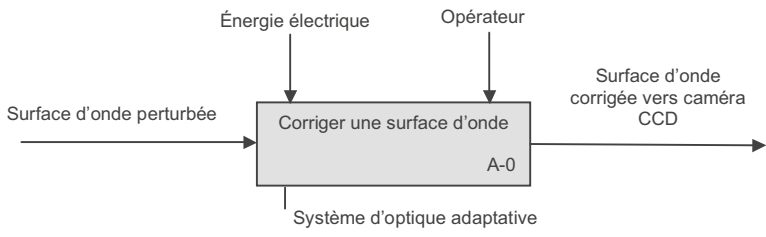
II-2 Travail demandé

Réaliser un diagramme SADT de l'ensemble du système d'optique adaptative :

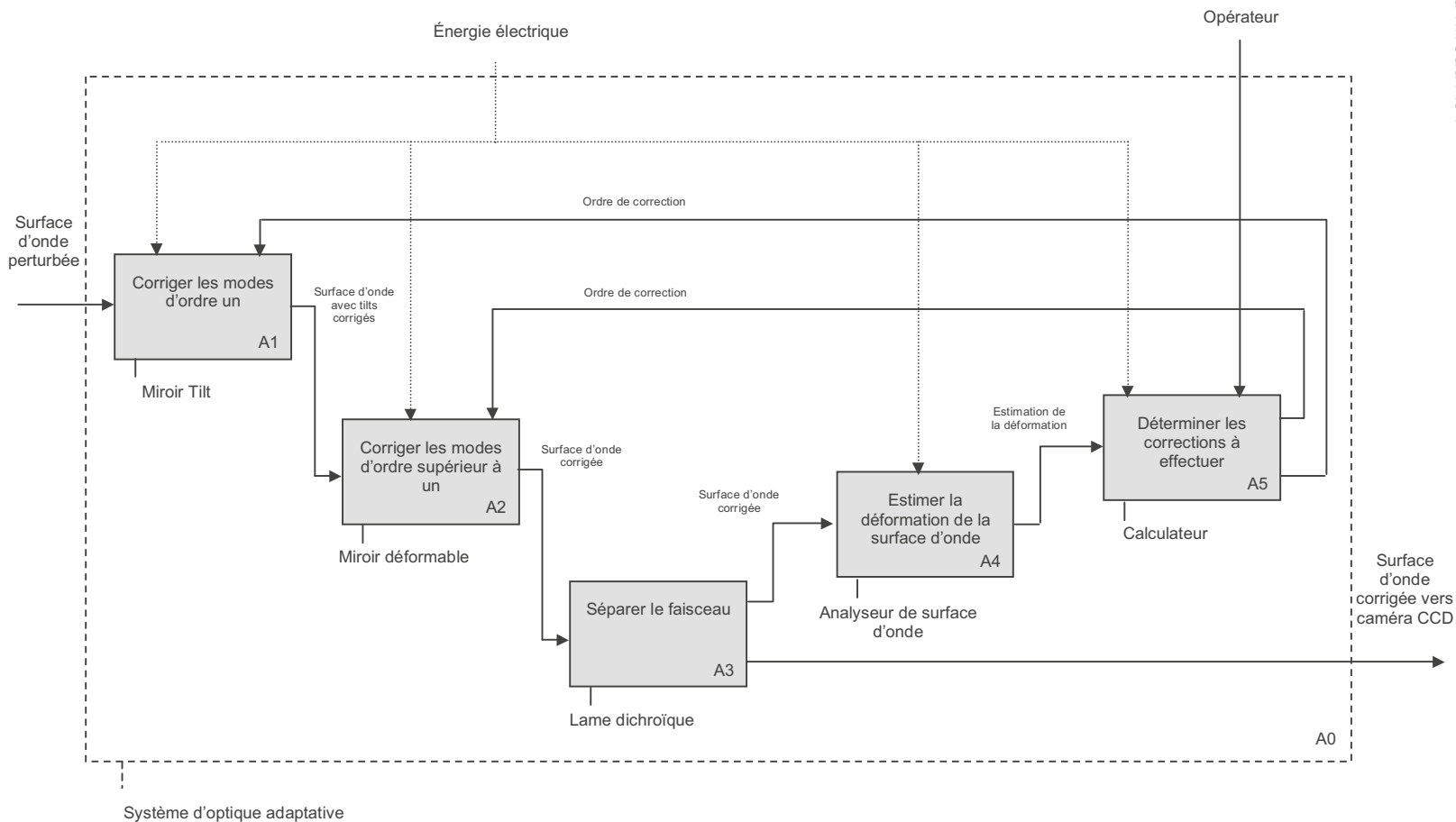
- niveau A-0 présentant la fonction globale
- niveau A0 détaillant les sous-fonctions.

II-3 Correction

En considérant la caméra CCD comme ne faisant pas partie du système d'optique adaptative (choix de la frontière), il vient :



Et, au niveau A0 :

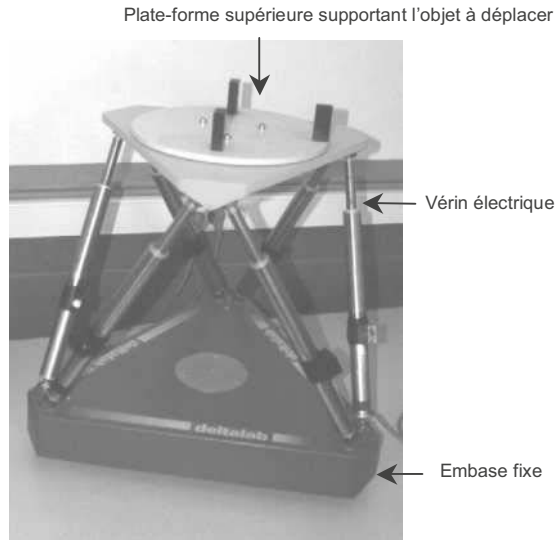


III - ROBOT PARALLÈLE 6 AXES EX800

III-1 Présentation

On rappelle que le système EX800 est constitué :

- d'une partie opérative : structure de robot parallèle 6 axes composée de 6 vérins électriques réalisant le mouvement relatif entre une plate-forme supérieure (qui porte une charge, un outil, etc.) et une embase fixe ;
- d'une carte de commande et d'acquisition insérée dans l'ordinateur de pilotage ;
- d'une carte électronique pilotant les 6 vérins, logée dans l'embase, regroupant des éléments de commande et les différents préactionneurs (variateurs électroniques de vitesse).

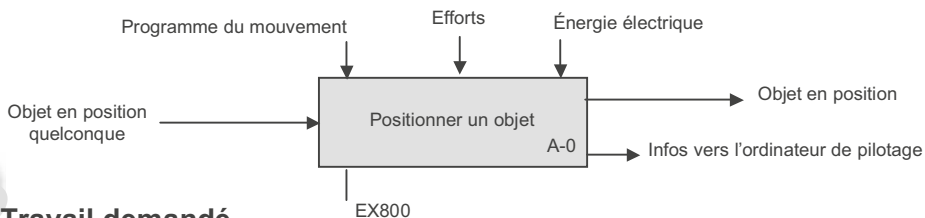


La partie commande est donc répartie sur deux cartes de commande : la carte insérée dans l'ordinateur et certains éléments de la carte située dans l'embase. Voir V-2-6 précédemment.

Ainsi, la frontière du système considéré ne se limite pas à la frontière matérielle du système photographié ci-dessus, mais inclut la carte insérée dans l'ordinateur. La connexion à l'ordinateur est donc nécessaire au fonctionnement, à l'inverse du chariot MP22 par exemple où la PC entière est sur la carte électronique et qui peut donc fonctionner en autonomie.

Cette partie commande donne ses ordres à la partie opérative en fonction :

- de la programmation effectuée par l'opérateur via le logiciel de pilotage ;
- du retour d'information donné par des capteurs intégrés à la partie opérative : position et vitesse de la tige de chaque vérin.



III-2 Travail demandé

Les différentes fonctions techniques réalisées par ce système peuvent être rassemblées dans le diagramme FAST donné page suivante, au regard duquel les solutions techniques (sous-systèmes) retenues sont indiquées.

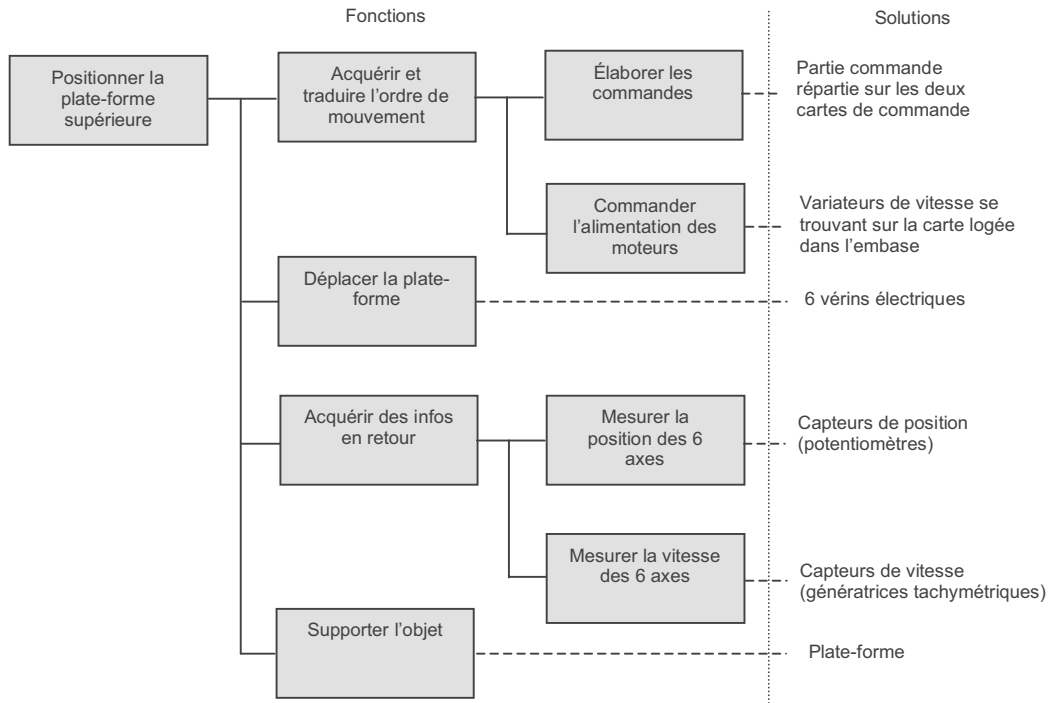
Question 1 :

En s'aidant du diagramme FAST, compléter les trois diagrammes SADT ébauchés correspondant à une structure d'analyse descendante qui vous est imposée. Pour cela on indiquera :

- les différentes fonctions et les sous-systèmes les réalisant ;
- les différentes entrées sorties.

Remarque importante : la logique FAST ne se superpose pas nécessairement avec la logique SADT. On ne cherchera donc pas une similitude dans les niveaux. D'ailleurs le premier niveau du

diagramme FAST donné définit quatre fonctions, alors que l'analyse SADT est proposée avec un premier niveau à trois fonctions. De même la logique SADT proposée, fonctionnelle, ne permettra pas de distinguer les deux parties de la PC.

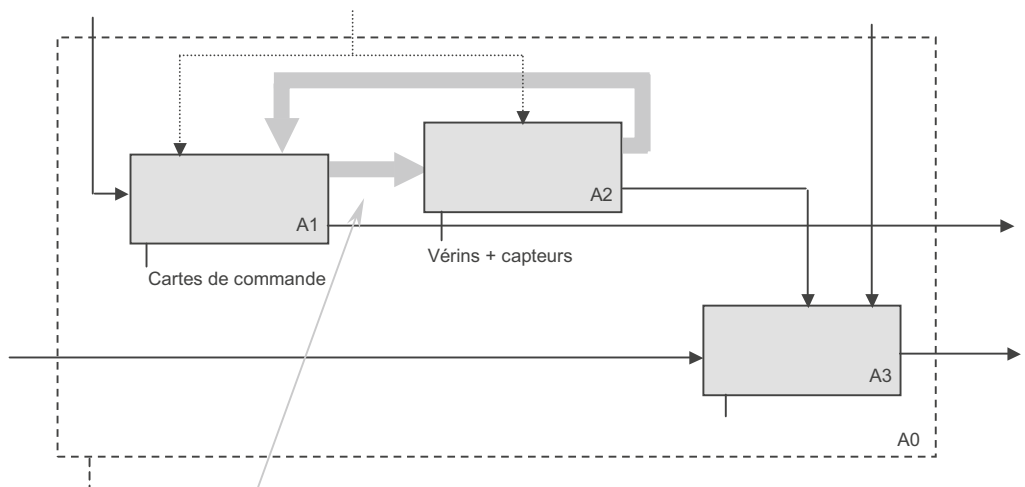


Question 2 :

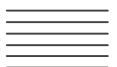
Sur ces trois diagrammes, marquer d'une surépaisseur, ou d'une couleur différente, les différents flux de la chaîne d'énergie.

■ Ébauches de diagrammes à compléter :

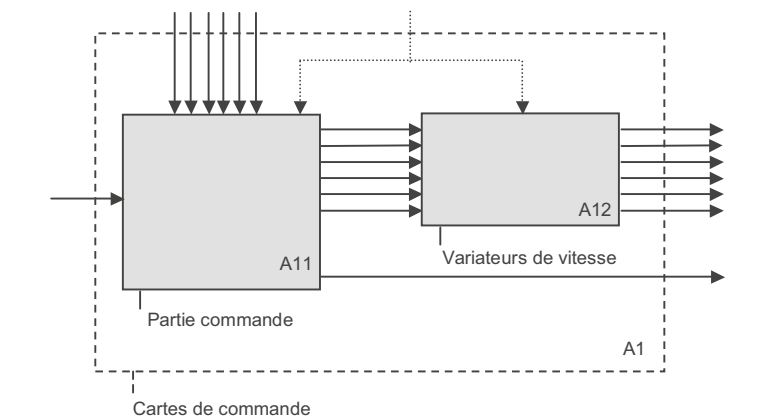
Niveau A0 :



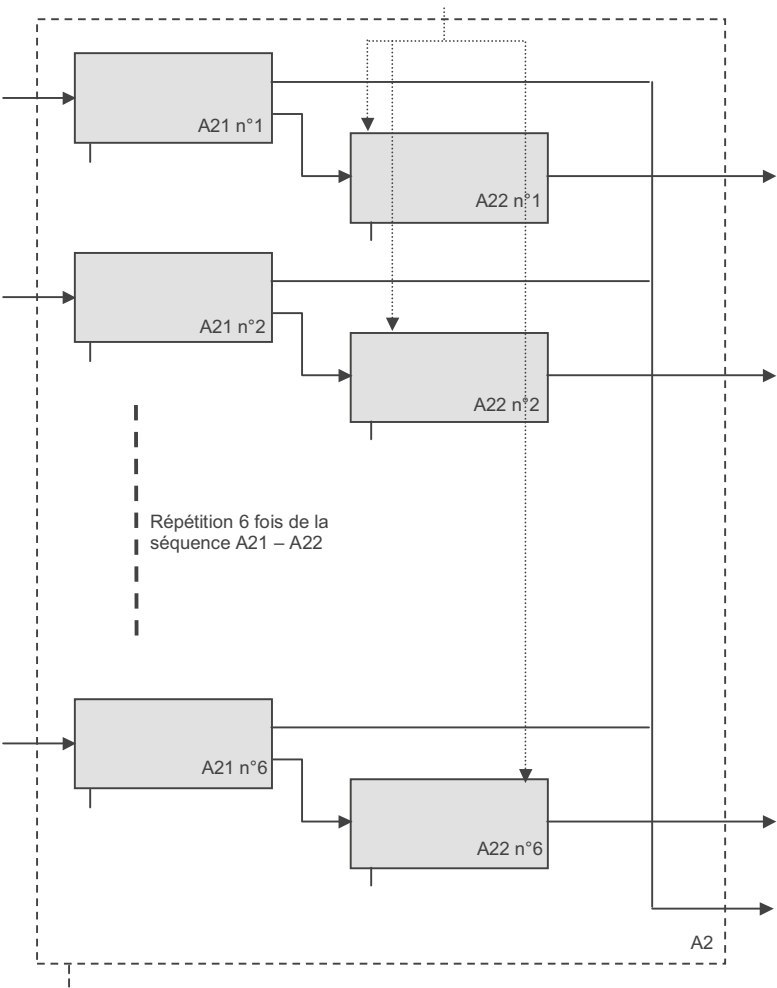
NB : On acceptera  comme une représentation simplifiée de 6 traits en parallèle :



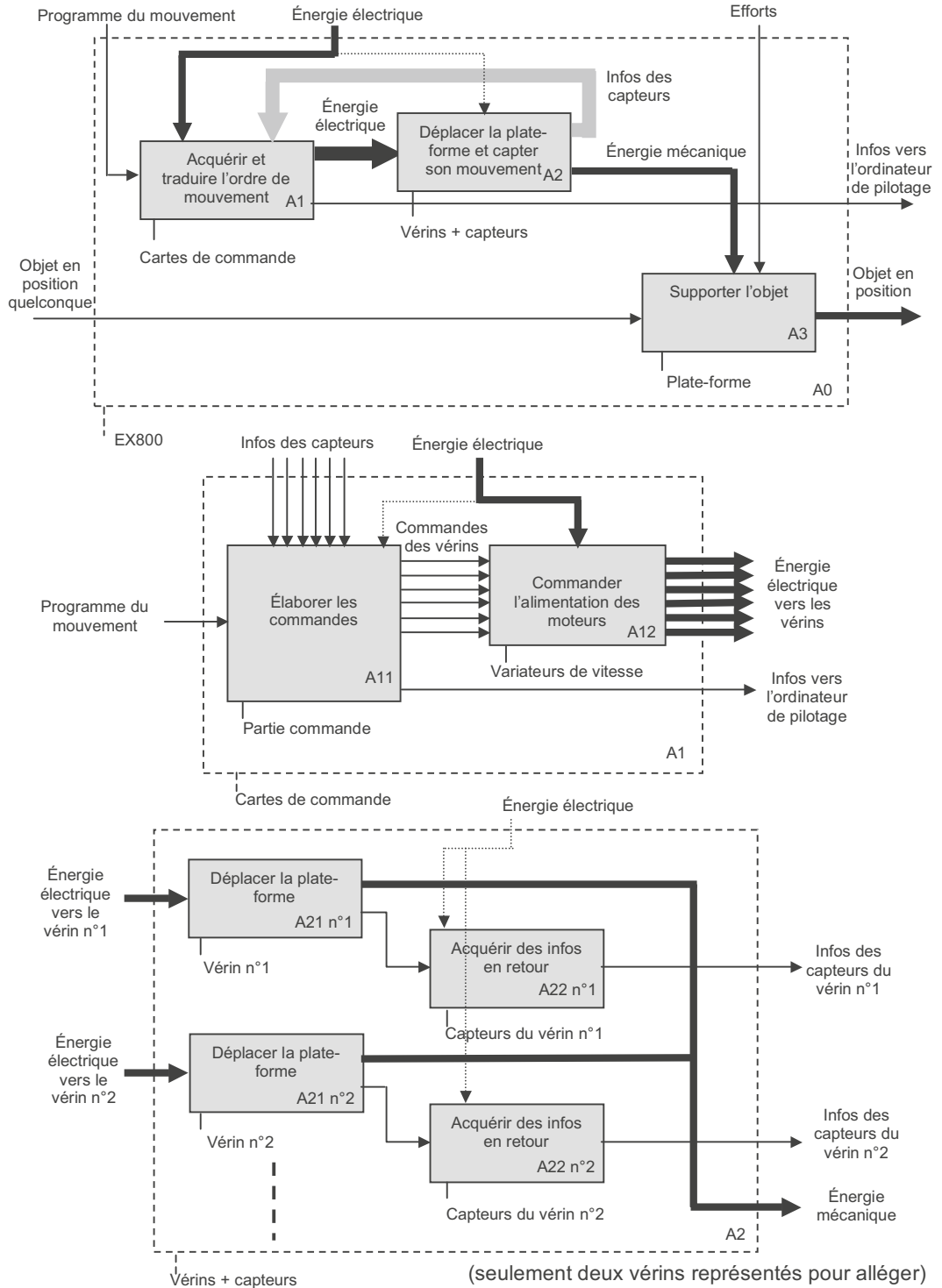
Niveau A1 :



Niveau A2 :



III-3 Correction



IV - MOTORISATION HYBRIDE D'UN VÉHICULE AUTOMOBILE

D'après une épreuve du concours Centrale-Supélec PSI, ayant pour support la technologie HDS du véhicule Toyota Prius. Questions modifiées.

IV-1 Présentation

Dans le contexte actuel d'économie des énergies fossiles et de réduction des émissions de gaz nocifs, le système de propulsion hybride constitue une alternative intéressante à la propulsion classique par moteur thermique seul car il permet de réduire la consommation.

La spécificité de la solution retenue sur la Toyota Prius (système HDS) consiste à :

- récupérer l'énergie du véhicule lors du freinage,
- exploiter le moteur thermique à son rendement optimal.

Le système HDS associe un moteur thermique à essence et sa transmission, à deux machines électriques et une batterie de puissance.

La figure suivante met en évidence les deux machines électriques (le moteur électrique et la génératrice) reliées au moteur thermique par un train épicycloïdal.

Le train épicycloïdal est le composant de sortie du système qui entraîne la chaîne « silencieuse » à partir de laquelle on retrouve une transmission traditionnelle.

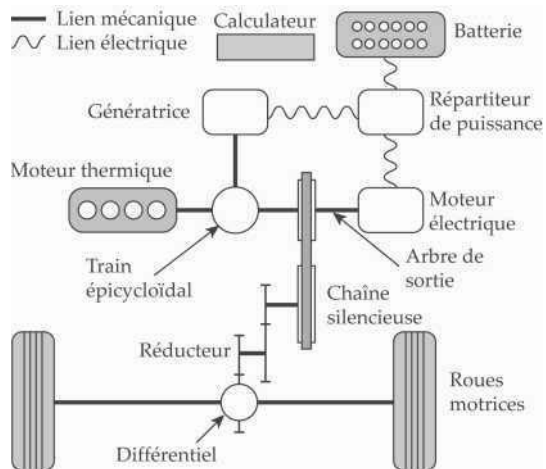
À partir de la position :

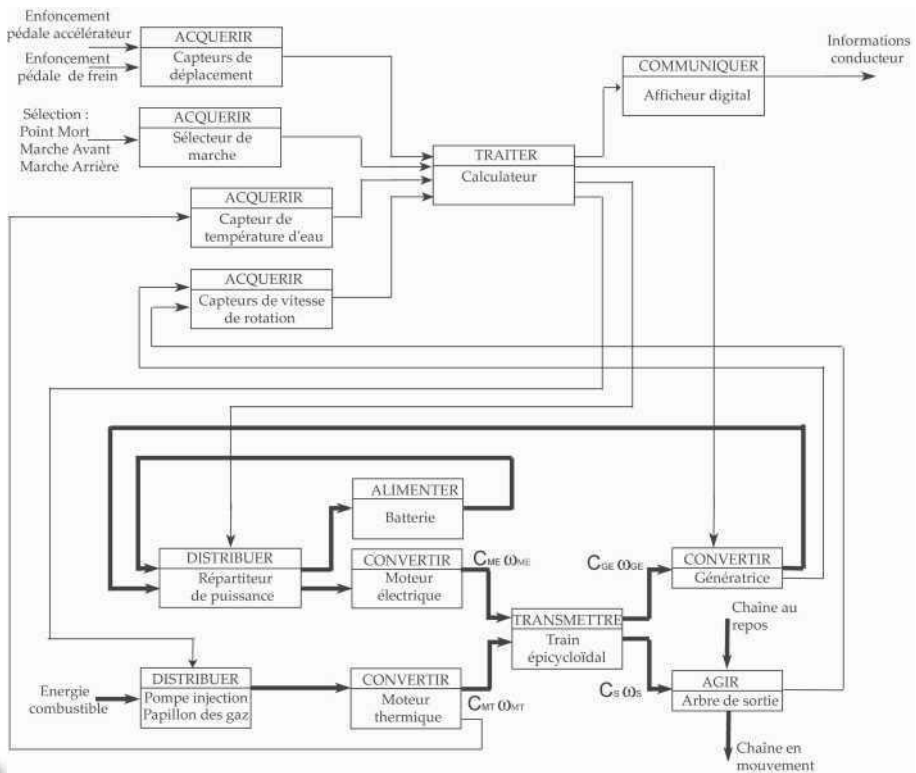
- de la pédale d'accélérateur
- de la pédale de frein
- du sélecteur de marche
- de la température de l'eau du moteur thermique
- et de la vitesse du véhicule,

le calculateur détermine la vitesse de rotation optimale du moteur thermique et la consigne d'ouverture du papillon des gaz. La puissance en sortie du moteur thermique est transmise, grâce au train épicycloïdal, à la chaîne « silencieuse » et à la génératrice. Un asservissement en vitesse de la génératrice permet de contrôler la vitesse de rotation du moteur thermique. Le répartiteur de puissance gère les échanges de puissance électrique entre la génératrice, le moteur électrique et la batterie.

Le moteur électrique entraîne la chaîne « silencieuse », seul ou en complément du moteur thermique. Il récupère également l'énergie cinétique ou potentielle du véhicule lors des phases de ralentissement.

Les différents transferts d'énergie et d'information peuvent être rassemblés sur le schéma synoptique qui suit :





IV-2 Travail demandé

Question 1 :

- Quelle est la matière d'œuvre du système HDS ?
- Quelle est la source d'énergie nécessaire au fonctionnement du système ?
- Donner un diagramme de type SADT de niveau A-0 précisant la fonction globale du système.

Question 2 :

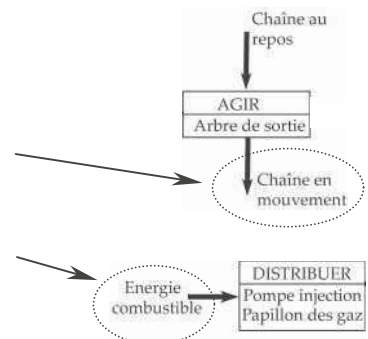
Distinguer, sur le schéma ci-dessus :

- la chaîne d'énergie et la chaîne d'information,
- la partie opérative (PO) et la partie commande (PC),
- les capteurs,
- les préactionneurs,
- les actionneurs.

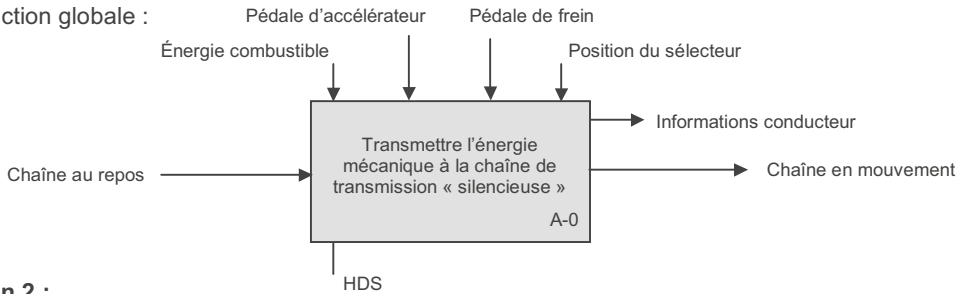
IV-3 Correction

Question 1 :

- La matière d'œuvre du système HSD est le mouvement commandé de la chaîne « silencieuse ».
- L'unique source d'énergie du système est, bien entendu, l'énergie combustible contenue dans le réservoir de carburant. À partir de cette énergie, les énergies nécessaires (mécanique et électrique) sont élaborées au sein même du système.

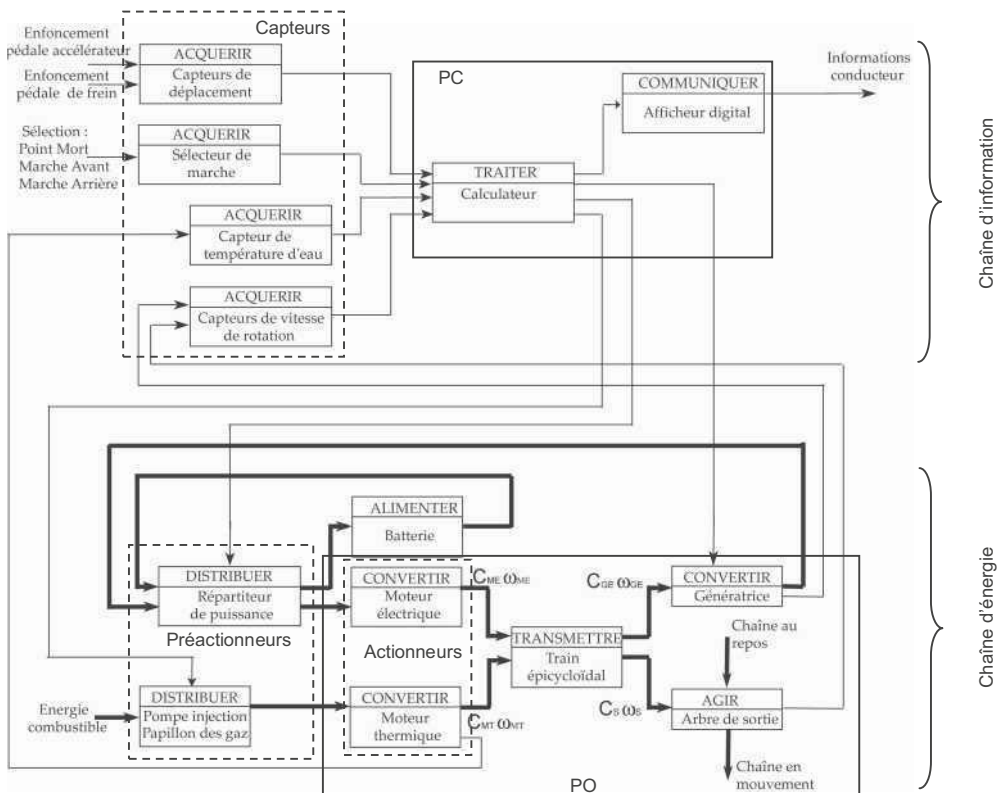


• Fonction globale :



Question 2 :

- Les chaînes d'énergie et d'information correspondent respectivement aux parties basse et haute du schéma synoptique (en trait fin les informations, en trait fort les énergies).
- La PC est constituée du calculateur, auquel on peut associer l'afficheur qui permet de communiquer avec le conducteur. La PO est constituée des deux moteurs (thermique et électrique), de la génératrice et du train épicycloïdal (transmetteur) muni de son arbre de sortie (effecteur).
- Les capteurs sont tous les composants réalisant les fonctions d'acquisition. Les préactionneurs distribuent l'énergie : il s'agit donc du répartiteur de puissance, de la pompe à injection et du papillon des gaz. La batterie peut être considérée comme un élément de stockage interne au répartiteur de puissance et donc faire partie du groupe des préactionneurs.
- Les actionneurs convertissent les énergies pour agir sur le transmetteur qu'est le train épicycloïdal : il s'agit donc du moteur thermique et du moteur électrique. Toutefois, en tant que transformateur d'énergie, la génératrice peut aussi être classée parmi les actionneurs.



On notera, à l'issue de cette étude, que dès que l'on s'intéresse à des systèmes complexes, le découpage terminologique strict défini au paragraphe V-2 s'avère difficile à appliquer, comme ici pour la génératrice et la batterie. Le vocabulaire offre une grille d'analyse, qui doit rester ouverte.