



SCIENCES SUP

Cours, travaux pratiques et exercices corrigés

Classes prépas • IUT • Licence • Écoles d'ingénieurs

AUTOMATIQUE DES SYSTÈMES MÉCANIQUES

Olivier Le Gallo

DUNOD

AUTOMATIQUE DES SYSTÈMES MÉCANIQUES

Cours, travaux pratiques
et exercices corrigés

Olivier Le Gallo

Professeur de chaire supérieure en classe préparatoire PSI
au lycée Clemenceau de Nantes

DUNOD

Illustration de couverture : *Fotolia*

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage. Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements		d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).
--	---	--

© Dunod, Paris, 2009
ISBN 978-2-10-054192-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

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

II	SCHÉMA BLOC	48
II-1	Intérêt et spécificités	48
II-2	Boucle de retour	49
II-3	Comparateur	49
II-4	Système asservi	49
III	ASSERVISSEMENTS ÉLECTROMÉCANIQUES	51
III-1	Asservissement électrique de position angulaire	51
III-2	Asservissement électrique de position linéaire	52
III-3	Partie opérative du chariot filoguidé	54
IV	NOTION DE PERTURBATION	58
IV-1	Définition	58
IV-2	Traduction sur un schéma bloc	58
IV-3	Régulation de niveau d'un château d'eau	59
V	PERFORMANCES DES SYSTÈMES ASSERVIS	63
V-1	Premières définitions	63
V-2	Entrées canoniques	63
V-3	Stabilité	64
V-4	Précision	66
V-5	Rapidité	71

EXERCICES

I	SYSTÈME DE CONTRÔLE D'UN GÉNÉRATEUR DE CENTRALE	73
II	ASSERVISSEMENT HYDRAULIQUE DE POSITION LINÉAIRE	76
III	VÉRIN ÉLECTRIQUE DU ROBOT PARALLÈLE EX800	79
IV	ASSERVISSEMENT DE VITESSE DU CHARIOT MP22	87

■ CHAPITRE 3 : FONCTIONS DE TRANSFERT

I	PROPRIÉTÉS DES SYSTÈMES PHYSIQUES	93
I-1	Définitions - entrées et sorties	93
I-2	Causalité et irréversibilité	93
I-3	Linéarité et non-linéarité	95
I-4	Invariance	97
II	SYSTÈMES LINÉAIRES INVARIANTS	97
II-1	Description par équation différentielle	97
II-2	Ordre du système	98
II-3	Réversibilité	98
II-4	Exemples	99
II-5	Point de fonctionnement	101
II-6	Linéarisation autour d'un point de fonctionnement	101
III	TRANSFORMATION DE LAPLACE	102
III-1	Définitions	102
III-2	Premières propriétés	103
III-3	Calculs de transformées	106
III-4	Résolution d'une équation différentielle à l'aide de la transformation de Laplace	108
III-5	Usage du théorème de la valeur finale	110
IV	FONCTION DE TRANSFERT D'UN SYSTÈME LINÉAIRE INVARIANT	113
IV-1	Définition	113
IV-2	Vocabulaire	113
IV-3	Réponse indicielle - notion de signature	114
IV-4	Analyse de la stabilité à partir des pôles de la fonction de transfert	114

IV-5	Remarque concernant le gain	117
IV-6	Exemples	118
IV-7	Pôles d'une fonction et théorème de la valeur finale	122
IV-8	Critère de Routh simplifié	123
V	SCHÉMA BLOC ET FONCTION DE TRANSFERT	125
V-1	Blocs en série	125
V-2	Schéma bloc d'un système bouclé	125
V-3	Manipulations usuelles de blocs	127
V-4	Causalité et validité des descriptions	131
V-5	Représentation d'un système d'équations par un schéma bloc	132
V-6	Exemple : asservissement de position par moteur à courant continu	133
V-7	Logiciels de calcul	143
VI	CAS D'UN SYSTÈME ASSERVI : FTBO ET FTBF	145
VI-1	Rappel de la définition d'un système asservi	145
VI-2	FTBO et FTBF	146
VI-3	Retour unitaire	147
VII	FTBO ET PRÉCISION D'UN SYSTÈME ASSERVI	148
VII-1	Précision d'un système asservi : erreur et écart	148
VII-2	Calcul de l'écart à partir de la FTBO	149
VII-3	Influence de la classe de la FTBO sur l'écart	150

EXERCICES

I	RÉSOLUTION D'ÉQUATIONS DIFFÉRENTIELLES	157
II	FONCTION DE TRANSFERT ET STABILITÉ	166
III	CONTRÔLE DU LACET D'UN SATELLITE	168
IV	CENTRIFUGEUSE HUMAINE	174
V	POSTE D'EXTRUSION	180
VI	BRAS MAXPID	189

■ CHAPITRE 4 : MODÈLES USUELS

I	SYSTÈME INTÉGRATEUR	207
I-1	Définition	207
I-2	Réponse impulsionnelle	208
I-3	Réponse indicielle	208
I-4	Réponse à une rampe	209
II	SYSTÈME FONDAMENTAL DU PREMIER ORDRE	209
II-1	Définitions	209
II-2	Réponse impulsionnelle	209
II-3	Réponse indicielle	210
II-4	Réponse à une rampe	211
II-5	Relations entre les réponses	212
II-6	Asservissement de vitesse du chariot filoguidé MP22	213
III	SYSTÈME FONDAMENTAL DU DEUXIÈME ORDRE	219
III-1	Définitions	219
III-2	Réponse impulsionnelle	221
III-3	Réponse indicielle	223
III-4	Oscillations et rapidité de la réponse indicielle	225
III-5	Réponse à une rampe	229
III-6	Asservissement de position du chariot filoguidé MP22	230
III-7	Approximation d'un système fondamental du 2 ^{ème} ordre par un système du 1 ^{er} ordre	234

IV	SYSTÈMES FONDAMENTAUX DU 1 ^{er} ET DU 2 ^{ème} ORDRE : ALGORITHMES ET SIMULATIONS NUMÉRIQUES	235
IV-1	Introduction : notion d'échantillonnage	235
IV-2	Algorithme de dérivation	235
IV-3	Système fondamental du premier ordre	236
IV-4	Système fondamental du deuxième ordre	241
V	SYSTÈME À RETARD PUR	245
V-1	Définition	245
V-2	Réponses aux entrées canoniques	245
V-3	Retard d'un processus	246
V-4	Orientation de la roue directrice du chariot filoguidé MP22	246
VI	SYSTÈMES DU 1 ^{er} ET DU 2 ^{ème} ORDRE GÉNÉRALISÉS (OU À ZÉROS)	249
VI-1	Exemple introductif : écarecteur	249
VI-2	Définitions	250
VI-3	Comportement temporel	251
VI-4	Universalité de la description	257

EXERCICES

I	VÉRIN ÉLECTRIQUE DU ROBOT PARALLÈLE EX800	259
II	SYSTÈME DE CORRECTION DE PORTÉE DE PHARE	266
III	ASSERVISSEMENT DE POSITION DU FÛT D'UN ROBOT	273
IV	COMMANDE EN POURSUITE D'UNE ANTENNE DE RADAR	282
V	BRAS MAXPID	287
VI	RÉGULATION DE TENSION D'UN FILM DÉFILANT	301

■ CHAPITRE 5 : ANALYSE FRÉQUENTIELLE

I	EXEMPLE INTRODUCTIF : axe asservi du robot parallèle EX800	309
I-1	Présentation	309
I-2	Réponses fréquentielles	310
I-3	Observations - définitions	311
II	RÉPONSE PERMANENTE D'UN SYSTÈME LINÉAIRE À UNE ENTRÉE SINUS.	311
II-1	Propriété fondamentale : réponse fréquentielle d'un système stable	311
II-2	Cas des intégrateurs	314
II-3	Lieux de transfert	314
II-4	Réponse fréquentielle de systèmes en série	317
III	LIEUX DE TRANSFERT DES SYSTÈMES USUELS	318
III-1	Système intégrateur	318
III-2	Système fondamental du premier ordre	320
III-3	Système fondamental du deuxième ordre	328
III-4	Approximation d'un système fondamental du 2 ^{ème} ordre par un système du 1 ^{er} ordre	337
III-5	Système à retard pur	337
III-6	Continuité de la phase	339
IV	MÉTHODOLOGIE DE TRACÉ DU DIAGRAMME DE BODE ASYMPTOTIQUE D'UN SYSTÈME QUELCONQUE	341
IV-1	Exemple 1	341
IV-2	Exemple 2	343
IV-3	Méthode générale dans le cas des systèmes à « zéros stables »	345
IV-4	Cas particulier des systèmes à « zéros instables » (ou à réponse inverse)	346
IV-5	Notion de déphasage minimal	347
IV-6	Influence d'un retard	348

V	COMPOTEMENT DE FILTRE	348
V-1	Filtres passe-bas et autres comportements	348
V-2	Notion de bande passante	349
V-3	Bande passante et rapidité	350
V-4	Filtrage d'un signal bruité	351

EXERCICES

I	SUSPENSION AUTOMOBILE	355
II	CORRECTEUR MÉCANIQUE À AVANCE DE PHASE	359
III	OPTIQUE ADAPTATIVE	364
IV	AXE DE LACET DU ROBOT ERICC3	374
V	ROBOT POUR LA CHIRURGIE ENDOSCOPIQUE	380

■ CHAPITRE 6 : CORRECTION DES SYSTÈMES ASSERVIS

I	LA CORRECTION PROPORTIONNELLE	387
I-1	Définition et rappels	387
I-2	Chariot filoguidé MP22	390
II	LIMITE DE STABILITÉ - CRITÈRE DU REVERS	394
II-1	Notion de point critique	394
II-2	Interprétation sur le diagramme de Nyquist de la FTBO	394
II-3	Interprétation sur le diagramme de Black de la FTBO	396
II-4	Interprétation sur le diagramme de Bode de la FTBO	396
II-5	Remarque complémentaire : interprétation en termes de rapidité	403
III	MARGES DE STABILITÉ	404
III-1	Nécessité de marges	404
III-2	Marges de gain et de phase	405
III-3	Marge d'amplitude	410
III-4	Bilan	412
IV	CORRECTEURS LINÉAIRES USUELS	413
IV-1	Objectifs de la correction	413
IV-2	Correction intégrale et correction proportionnelle-intégrale	413
IV-3	Correction dérivée et correction proportionnelle-dérivée	418
IV-4	Correction proportionnelle-intégrale-dérivée PID	420
IV-5	Bras MAXPID	424
IV-6	Correction par avance ou retard de phase	426
V	QUELQUES AUTRES TYPES DE CORRECTION	427
V-1	La correction par « modèle imposé » ou « compensation de pôles »	427
V-2	La correction par boucle supplémentaire	429
V-3	Un mot sur la correction auto-adaptative	433

EXERCICES

I	SYSTÈME DE CONTRÔLE D'UN GÉNÉRATEUR DE CENTRALE	435
II	RUGOSIMÈTRE À GRANDE VITESSE	442
III	CONDUCTEUR VIRTUEL POUR VÉHICULE AUTOMOBILE	454

FICHES RESSOURCES	
• OUTILS D'ANALYSE FONCTIONNELLE	467
• ÉQUATIONS DIFFÉRENTIELLES LINÉAIRES À COEFFICIENTS CONSTANTS	471
• TABLE DES TRANSFORMÉES DE LAPLACE	474
• DÉCOMPOSITION D'UNE FRACTION RATIONNELLE EN ÉLÉMENTS SIMPLES	475
• INERTIE ÉQUIVALENTE	477
• DROITE DES MOINDRES CARRÉS	481
 INDEX ALPHABÉTIQUE	 485

AVANT-PROPOS

■ L'Automatique est la discipline qui développe les méthodes et les moyens relatifs à la commande des systèmes. Elle concerne une grande majorité de métiers aujourd'hui et tout ingénieur se doit d'en posséder une culture minimale. Ses développements sont relativement récents et la fin du XX^{ième} siècle a vu l'accélération de ses champs d'application, à une vitesse telle que le monde technologique et industriel s'est trouvé créateur de savoirs, qui jusqu'ici étaient élaborés exclusivement dans les laboratoires de recherche des universités et des grandes écoles.

Une synergie entre les développements des industriels et la formalisation qui caractérise le monde universitaire s'est alors mise en place, aboutissant à une refonte dans la manière d'aborder l'Automatique dans les différents cycles de formation. Celle-ci ne pouvait plus n'être abordée qu'en deuxième cycle, voire en troisième cycle, mais se devait de l'être au plus tôt dans la formation des ingénieurs, afin qu'ils en possèdent les bases, quels que soient leurs futurs parcours.

Dans ce contexte, l'Automatique a été introduite dans l'enseignement de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur des classes préparatoires scientifiques à la fin des années 90, ainsi que dans la majorité des licences et premiers cycles universitaires préparant aux carrières de l'industrie.

La difficulté pédagogique immédiate fut d'introduire une discipline, jusqu'ici de synthèse et enseignée en fin de formation, à de jeunes bacheliers ayant encore peu de bagages scientifiques et, pour la grande majorité d'entre eux, aucune culture technologique. L'Automatique se devait donc de se transformer en discipline initiale, conjuguant la rigueur mathématique maximale accessible aux étudiants de premier cycle à une approche intuitive, nécessaire à ce niveau, et permise à l'aide du puissant outil pédagogique que sont les travaux pratiques.

Ces travaux pratiques sont réalisés sur des systèmes issus du monde industriel. Il s'agit de diverses chaînes asservies, dont la partie opérative est de nature mécanique, afin d'être en adéquation avec le deuxième volet des Sciences Industrielles pour l'Ingénieur que constitue la Mécanique. Ces travaux pratiques permettent de combiner des activités de découverte et des activités de synthèse, dans la perspective du métier d'ingénieur. Ils permettent, en outre, de mettre en œuvre la démarche de modélisation et de confrontation des résultats à la réalité, dont la profonde compréhension est un élément essentiel à la formation des futurs ingénieurs, mais aussi très généralement de tout scientifique.



Cet ouvrage s'intéresse donc à l'**Automatique des Systèmes Mécaniques** dans cet état d'esprit.

Le cours est un cours d'Automatique au sens large, transposable à tous les systèmes commandés. Toutefois, les illustrations, ainsi que les exercices et travaux proposés, se font très majoritairement sur des systèmes mécaniques, afin de constituer un ensemble cohérent et de forger, au fil des pages, une culture des solutions aujourd'hui mises en œuvre dans ce domaine.

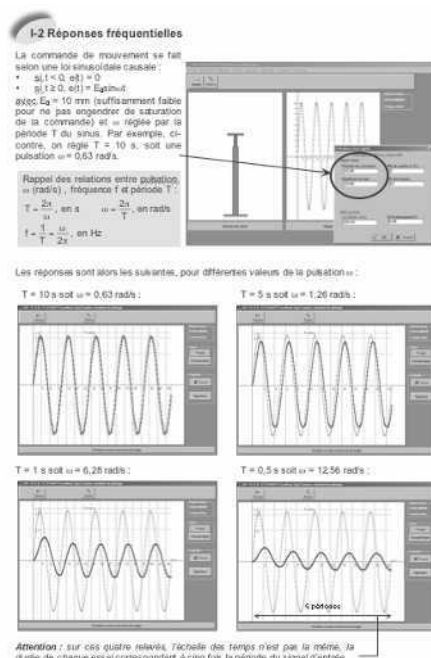
Dès les premières pages, le lecteur débutant sera donc sans doute confronté à des difficultés liées au vocabulaire technique. Bien évidemment, le vocabulaire de l'Automatique est entièrement défini. En revanche, certains éléments de vocabulaire liés à l'environnement technologique devront certainement faire l'objet de recherches personnelles de la part du lecteur. C'est une des difficultés d'un enseignement par nature pluridisciplinaire et non linéaire. Les sources d'informations pourront être les notices techniques des différents matériels du laboratoire, mais aussi toutes les sources multimédias modernes auxquelles ont aisément accès aujourd'hui les étudiants.

Une des volontés de cet ouvrage est de traduire, sous la forme usuelle d'un livre de cours, les indispensables apports des travaux pratiques. Tous les matériels utilisés sont parmi les plus classiquement présents dans les laboratoires de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur des classes préparatoires scientifiques. Avoir ces mêmes systèmes à disposition est sans nul doute favorable à la lecture et à un travail personnel approfondi. Toutefois, la description complète des matériels et des activités conduites doit permettre à tout étudiant de tirer entièrement parti de l'ouvrage malgré tout.

L'ouvrage est découpé en six chapitres, couvrant intégralement le programme d'Automatique des deux années de classes préparatoires scientifiques, qui diffère assez peu selon les filières. De temps en temps, quelques développements vont un peu plus loin, ouvrant des perspectives au lecteur. Ce contenu correspond également et globalement au programme de la majorité des IUT, licences et premières années de certaines écoles d'ingénieurs. Le lecteur qui souhaitera aller au-delà de ce contenu devra s'orienter vers des ouvrages abordant les aspects non linéaires, les systèmes échantillonnés et la représentation d'état.

Chaque chapitre est abondamment illustré d'exemples concrets, introductifs comme de synthèse. Des exercices entièrement corrigés concluent chaque chapitre. Ils sont très majoritairement issus de travaux pratiques ou de sujets de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur des concours d'entrée aux grandes écoles d'ingénieurs, tels que le Concours Commun Mines-Ponts, le Concours Central-Supélec, etc. Cet aspect devrait donner satisfaction au lecteur étudiant en classes préparatoires, pour lequel l'entraînement aux concours passe par la maîtrise de certains exercices types. Le lecteur issu de l'université trouvera là des sujets de réflexion particulièrement formateurs.

Quelques annexes référencées sous la dénomination de « fiches ressources » viennent compléter cet ensemble en fin d'ouvrage. Des liens vers ces pages sont insérés aux moments adéquats dans le cours.



■ Cet ouvrage est le fruit de plusieurs années d'expériences d'enseignement en classe préparatoire PSI* au lycée Clemenceau de Nantes et d'interventions à l'antenne de Rennes de l'ENS de Cachan. Il est difficile de lister toutes celles ou ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué aux réflexions qui ont permis sa réalisation. Mes pensées vont immédiatement à mes étudiants, dont la curiosité, l'intransigeance et la maturité intellectuelle sont le meilleur des ferments. Nombreuses ont été également les discussions pédagogiques avec mes collègues enseignants et les heures passées, ensemble, à mettre au point des travaux pratiques qui, de manière informelle, se retrouvent certainement dans ces pages.

Jean-Jacques Marchandeau, professeur en classes préparatoires au lycée Camille Vernet de Valence, a accepté l'important travail de relecture de l'ensemble de l'ouvrage. Je le remercie avec beaucoup d'amitié pour le temps qu'il y a consacré et la pertinence de ses remarques et conseils, dont j'ai essayé de tenir compte.

Je remercie également les fabricants de matériels de travaux pratiques, qui m'ont autorisé à citer leurs marques et parfois à utiliser certains de leurs documents, sans que cela revête le moindre aspect commercial.

Enfin, le dernier mot sera pour Jacqueline et Nathalie, expertes ès virgules et accords des participes, pour leur correction implacable.

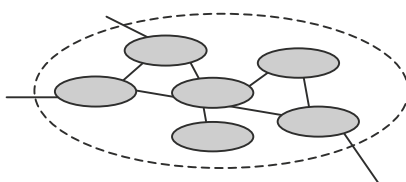
Olivier Le Gallo

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**.

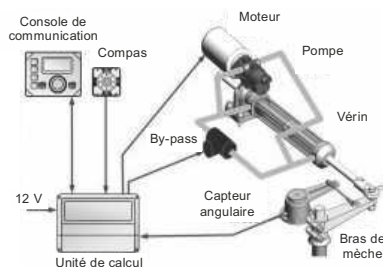
■ **Remarque** : Cette fonction répond à un besoin, exprimé ou latent. L'association d'une fonction à un besoin se fait par les méthodes de **l'analyse fonctionnelle**, non développées ici.



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 :

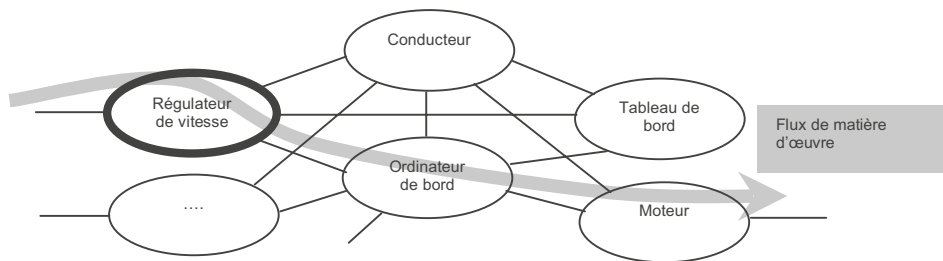
Système	Fonction	Matière d'œuvre entrante	Matière d'œuvre sortante	Données de contrôle	Sorties secondaires
Système de surveillance de la pression et de la température des pneus	Apporter au conducteur des informations concernant l'état des pneus	Pression et température de l'air dans les quatre pneus	Informations 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.

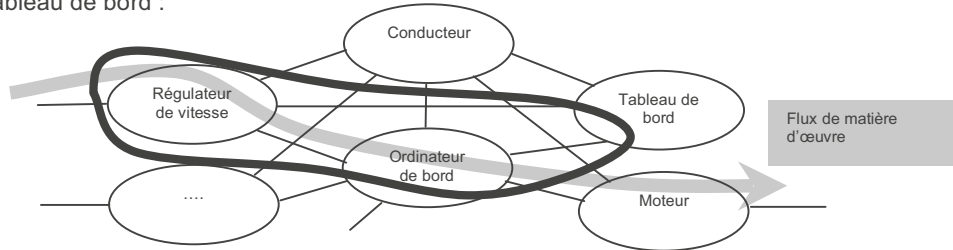


I-2 Notion de point de vue

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

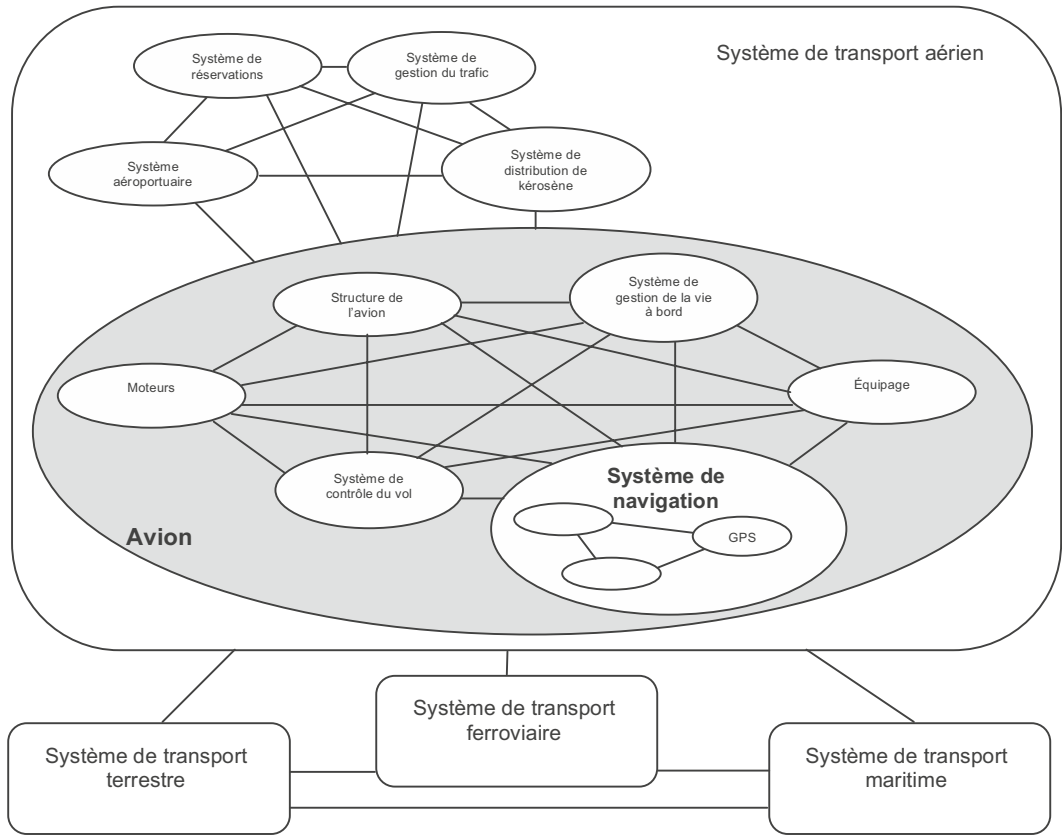
La fonction est alors une **adaptation de la vitesse** à celle du véhicule qui précède : connaissant la vitesse courante du véhicule, le système établit une nouvelle consigne de vitesse qu'il transmet à l'ordinateur de bord. Pour cela il a besoin de connaître (donnée de contrôle) la position relative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

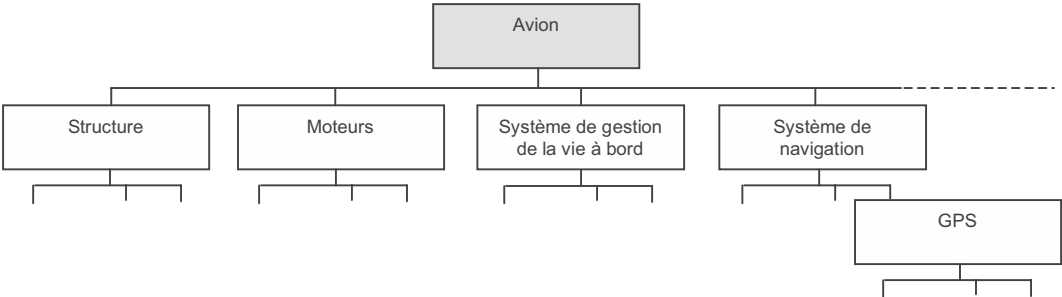
L'exemple précédent illustre, quel que soit le point de vue, la complexité des interactions qui peuvent exister entre différents systèmes partageant des matières d'œuvres ou des données de contrôles : régulateur de vitesse, ordinateur de bord, tableau de bord, etc.

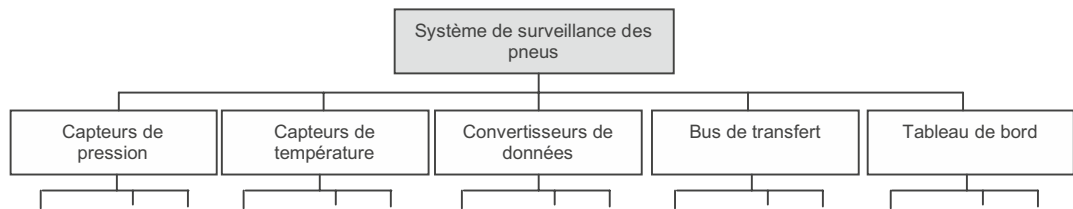
On peut ajouter, pour illustrer la complexité du propos, l'exemple des systèmes que les concepteurs d'un avion sont amenés à définir, regroupés dans le graphique ci-dessous :



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

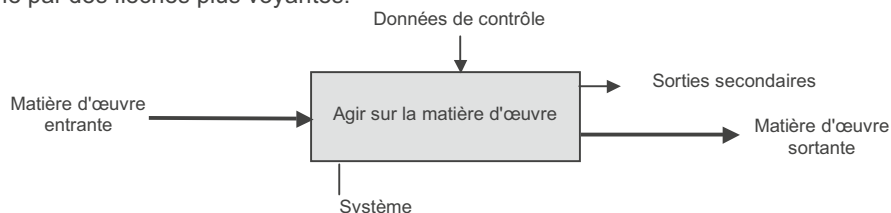
Il existe une très grande diversité de représentations graphiques des systèmes répondant aux types de systèmes rencontrés et aux objectifs de l'étude menée. Précédemment, quelques premiers outils ont été utilisés : tableaux, graphes structurels, graphes d'arborescence. Citons pour mémoire également les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



Fiche ressource "outils d'analyse fonctionnelle"

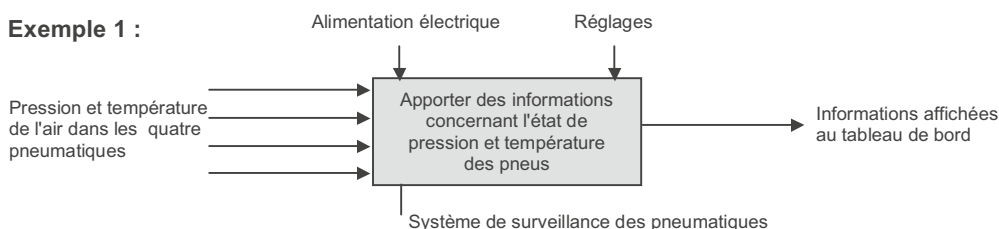
L'automaticien, nous le verrons par la suite, nécessite, au-delà des informations strictement fonctionnelles, des informations structurelles permettant, **selon son point de vue**, le suivi des différents flux de matière d'œuvre. Ainsi, il adoptera une représentation qui consiste à figurer le

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.

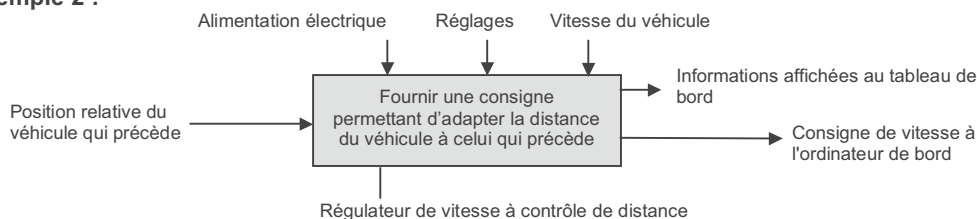


Cette représentation peut-être partielle au niveau des données de contrôle ou des sorties secondaires, selon le point de vue et donc le niveau de précision que l'on souhaite apporter à la description. Elle peut être illustrée sur les trois premiers exemples précédents :

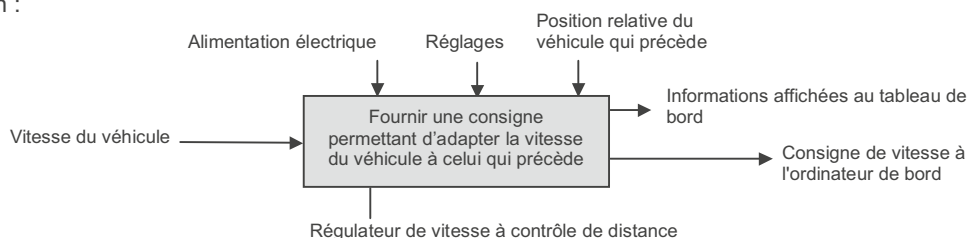
■ Exemple 1 :



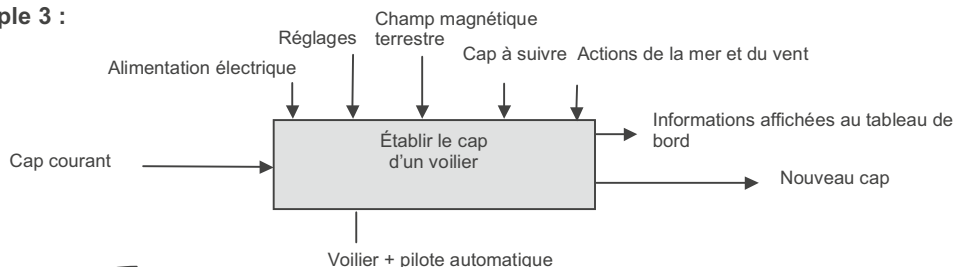
■ Exemple 2 :



Ou bien :



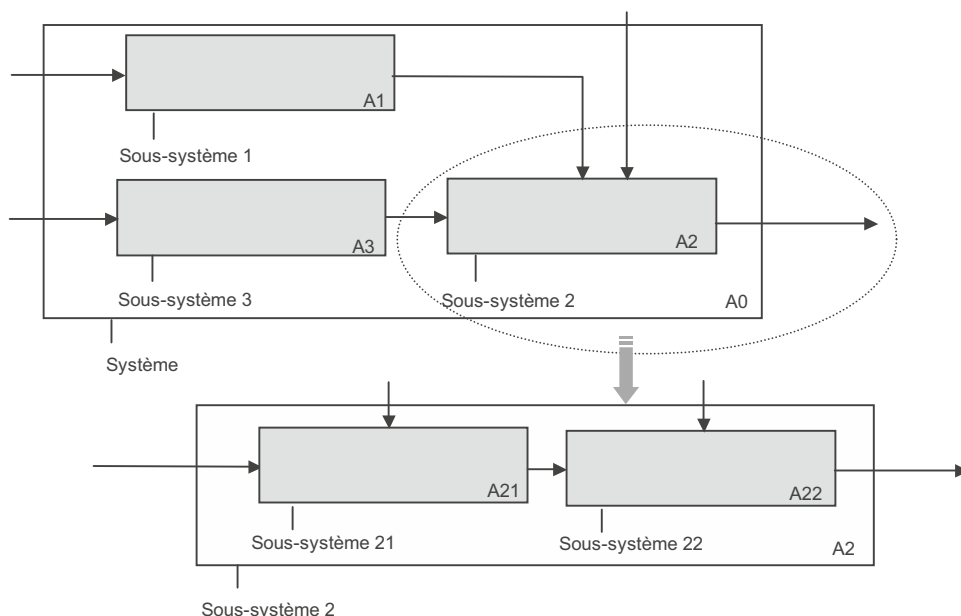
■ Exemple 3 :



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

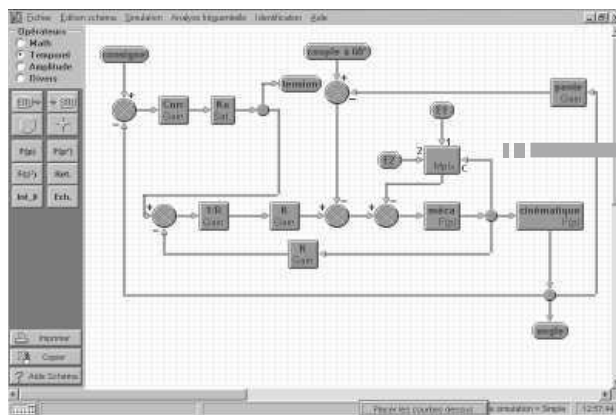
Si, dans un premier temps, les blocs fonctionnels interconnectés sont incontestablement un outil synoptique performant pour décrire la structure d'un système à travers les flux de matières d'œuvres, leur utilisation ne s'arrête pas à cette fonction de communication. De nombreuses simulations peuvent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

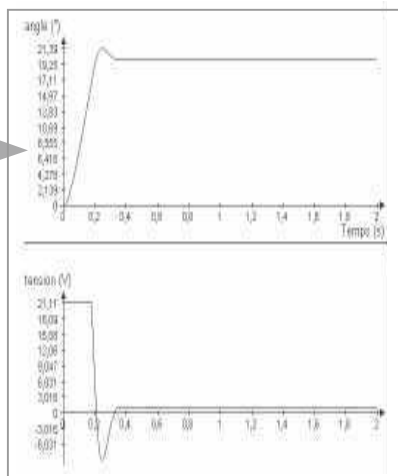
Mais l'usage principal qui va être détaillé dans cet ouvrage est d'associer **une loi de comportement** à chaque bloc fonctionnel. Une telle loi lie les sorties aux entrées. La description interconnectée traduit alors le système complet d'équations liant les différentes entrées-sorties entre elles et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

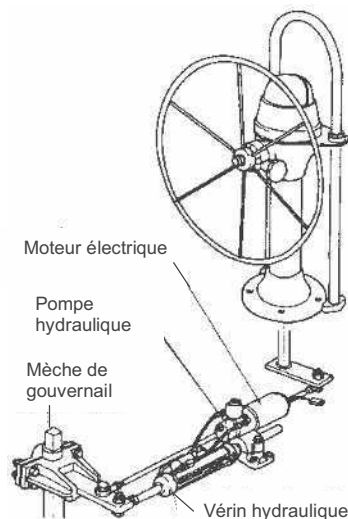
Ce système est proposé à l'équipement du laboratoire de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur des classes préparatoires scientifiques. Certains documents reproduits ci-après sont issus de la documentation conçue par Créa Technologie : <http://www.crea-technologie.com>

III-1 Description générale du système

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

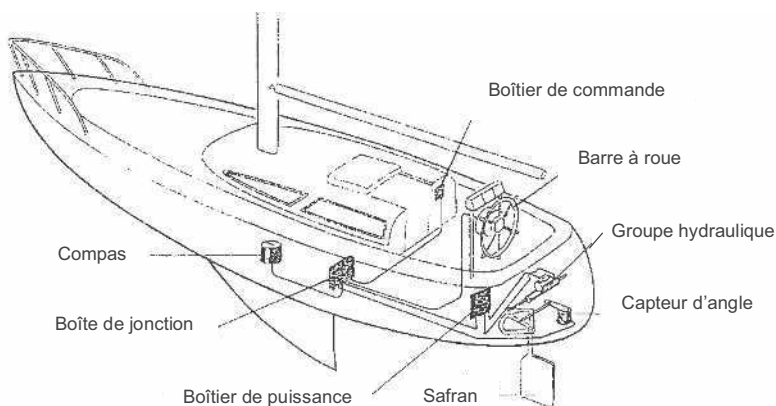
- du « safran » au contact de l'eau ;
- de la « mèche » qui est l'axe de la liaison pivot entre le safran et la coque ;
- d'une « barre franche » manœuvrée en poussant ou en tirant ou d'une « barre à roue » manœuvrée comme un volant par le barreur.

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.

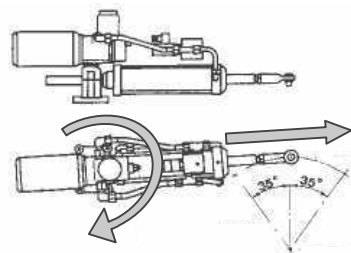
C'est le cas du système développé par les sociétés Lecomble et Schmitt (<http://www.ls-france.com>) et Navico (<http://www.navico.com>). Il comporte les éléments suivants :



- 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.

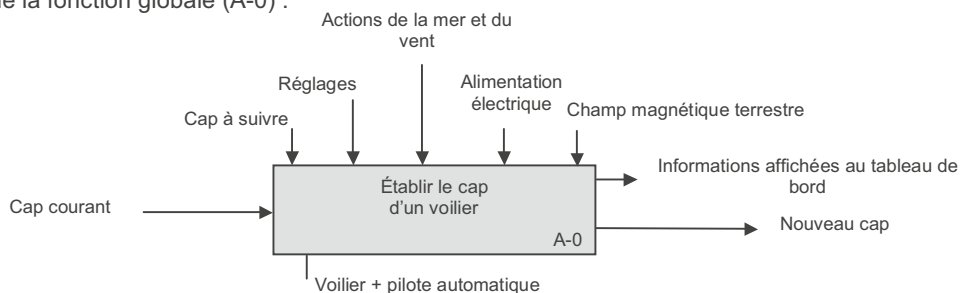
Le support du groupe se fixe sur le voilier selon une liaison adaptée à la cinématique de l'ensemble (liberté en rotation autour d'un axe parallèle à celui de la mèche). L'extrémité de la tige du vérin hydraulique est reliée à la mèche du safran.



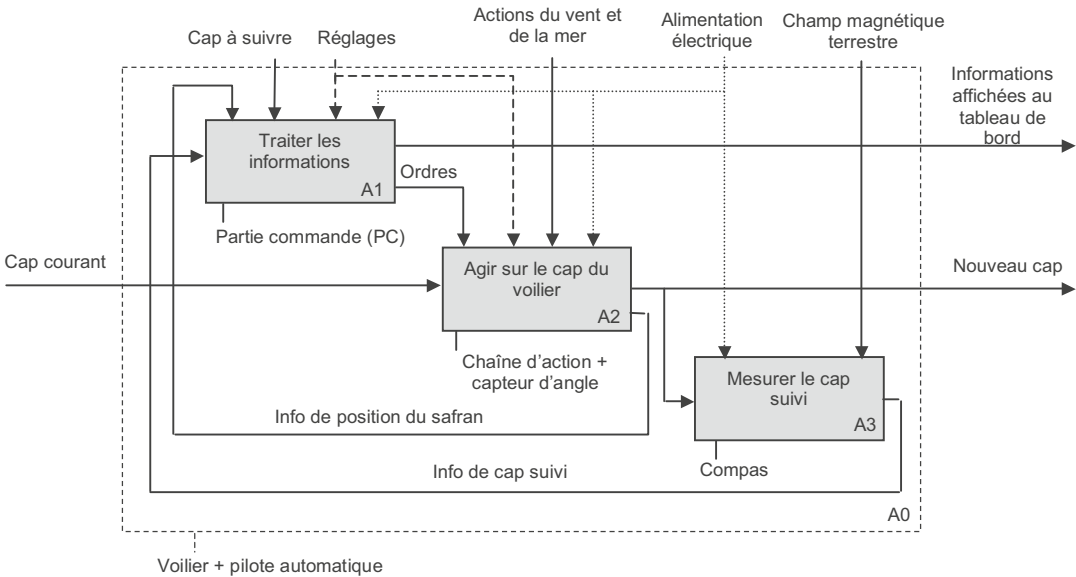
III-2 Analyse descendante

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) :



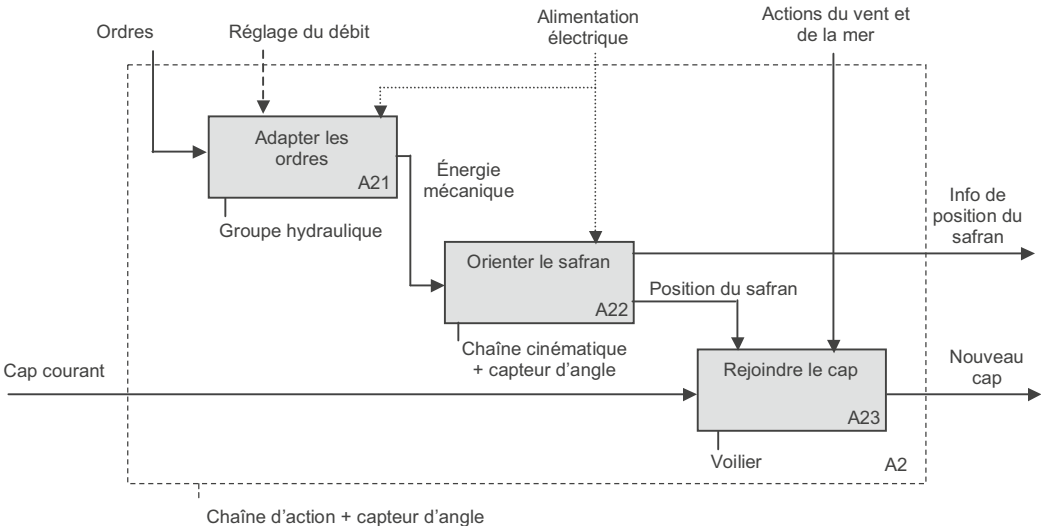
Cette fonction globale nécessite le pilote automatique et le voilier lui-même dont les limites définissent la frontière du système. Un premier niveau d'analyse peut faire apparaître les sous-systèmes suivants :



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 :



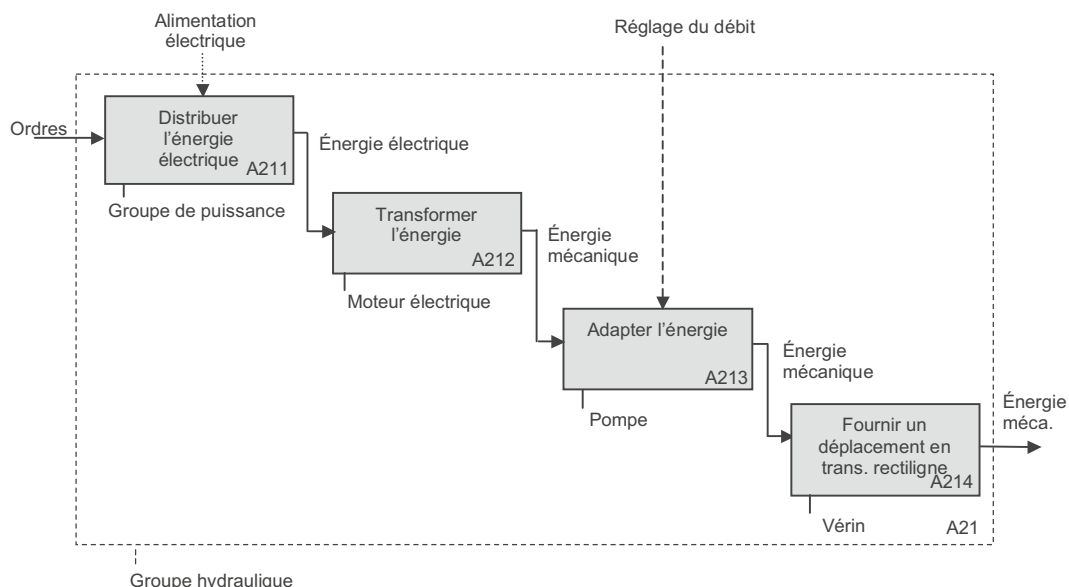
On lit sur ce diagramme que les ordres provenant de la PC (sous forme électrique basse puissance) sont transformés en énergie mécanique par le groupe hydraulique (mouvement de la tige du vérin). Un apport énergétique est nécessaire, d'où la connexion à l'alimentation électrique pour amplification. On 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 :

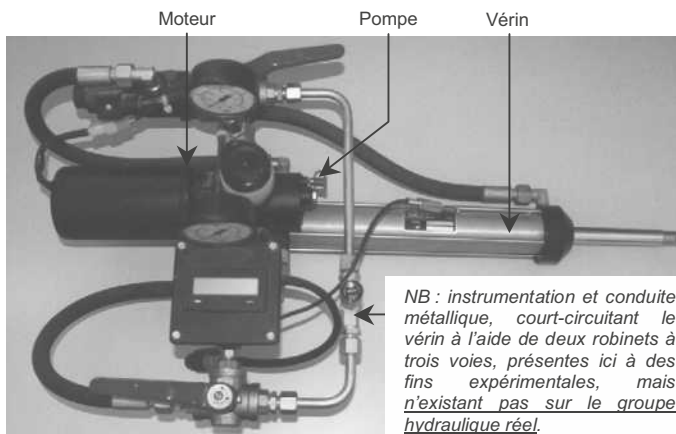


Les ordres provenant de la PC doivent commander le déplacement de la tige du vérin dans un sens ou dans l'autre. Pour cela la solution retenue est de faire tourner la pompe (qui est à double sens de marche), et donc le moteur électrique d'entraînement, dans un sens ou dans l'autre.

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 :



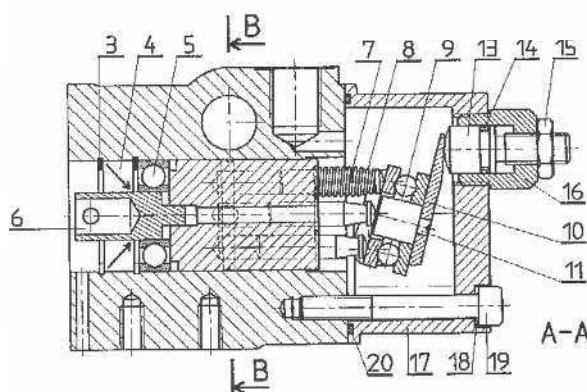
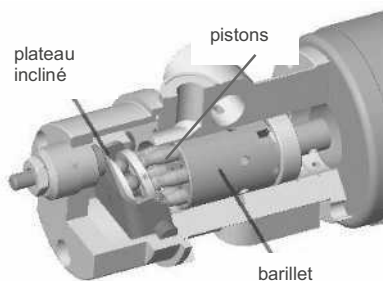
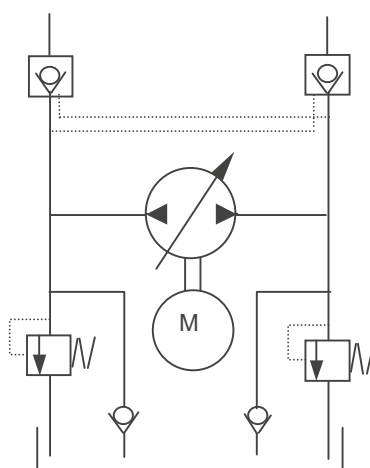
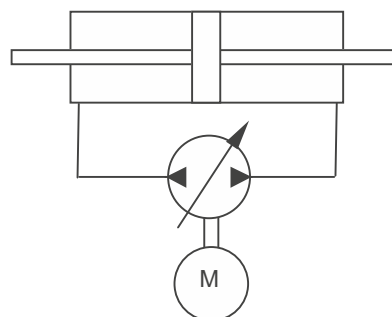
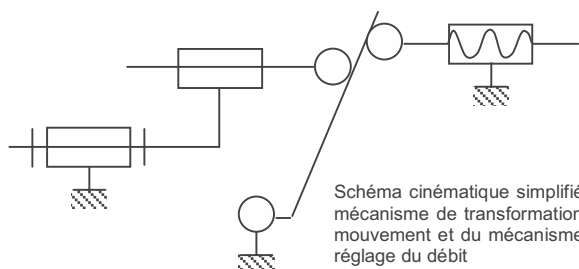
III-3 Limites de l'analyse descendante

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 :

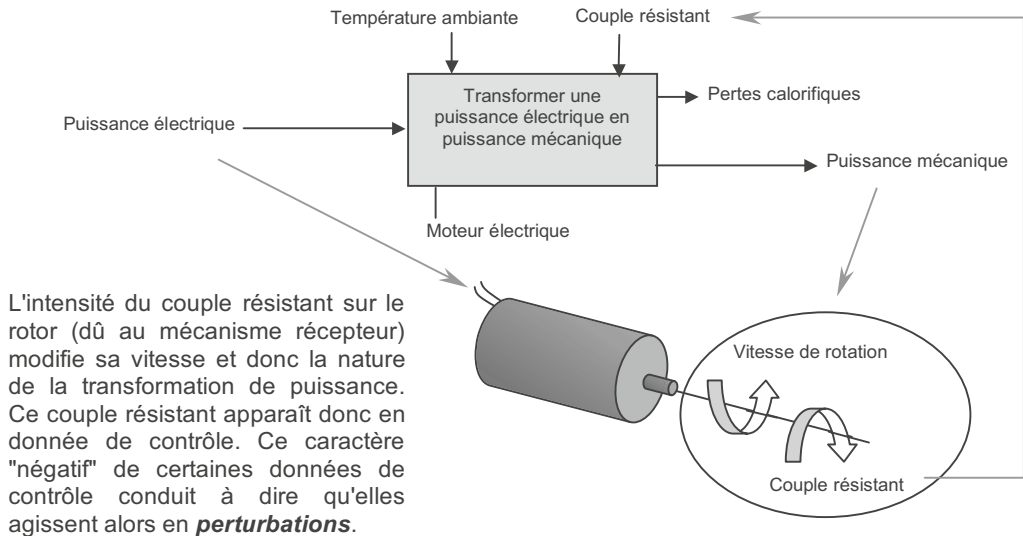
- des éléments de la schématique propre aux technologies hydrauliques permettant, par exemple, d'expliciter les solutions retenues pour assurer la sécurité en cas de surpression, ce dont il est très difficile, voire impossible, de rendre compte à l'aide de blocs fonctionnels ;
- des représentations propres 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 $e(t)$:

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