

Normalisation française

XP E 01-013

Indice de classement : E 01-013

ICS : 21.020

T1 Mécatronique

T2 Cycle de vie et conception des produits

E : Mechatronics — Lifecycle and design of products

D : Mechatronik – Produkt-Lebenszyklus und -Entwurf

Norme expérimentale publiée par AFNOR en

Les observations relatives à la présente norme expérimentale doivent être adressées à AFNOR avant le .

Correspondance

A la date de publication du présent document, il n'existe pas de travaux internationaux ou européens traitant du même sujet.

Analyse

D'après la norme NF E 01-010, la mécatronique est une démarche visant l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique dans la conception et la fabrication d'un produit en vue d'augmenter et/ou d'optimiser sa fonctionnalité. Cette démarche, qui permet d'obtenir des performances supérieures aux solutions traditionnelles, de réaliser de nouvelles fonctionnalités, et de rendre les produits mécatroniques plus compacts, nécessite la mise en place d'une approche coopérative interdisciplinaire.

Le but de cette norme est de fournir une description des processus de cycle de vie des produits mécatroniques, en s'appuyant sur l'ingénierie des systèmes, et de formaliser la démarche de conception et les différents niveaux de modèles requis.

Descripteurs

Thésaurus International Technique :

Modifications

Corrections

H:\Pôle_administratif\Sgq\Dk\mecatronique\XP_E_01-011_2009-03.doc

Membres de la commission de normalisation

Président : MME KOPLEWICZ

Secrétariat : UNM

Mme	BERTRAND	SYNDICAT DE LA MESURE
M	BLOT	MOOG
M	BOCHATON	PROFLUID
Mme	BRANTON	UTE
Mme	CHERILLAT	ARTEMA
M	CHEVALEYRE	AFF
M	CLOAREC	ARTEMA
M	DE GABRIELLI	THESAME
M	DE LA CROIX	UNIQ
M	DERIEUX	PROFLUID
MME	DUSSAUGEY	CISMA
M	FRUGIER	FIM
M	GRENOT	BNAE
MME	HARVIER	PSA PEUGEOT CITROEN
M	HUBERT	ASCO JOUCOMATIC
MME	KOPLEWICZ	UNM
M	LAGUIONIE	ETNA INDUSTRIE
M	LUBINEAU	CETIM
M	MARGAS	POMPES SALMSON
M	OSWALD	EDF
M	PRIN	LEGRIS
M	RENEVIER	AFNOR
M	SCHMITT	SCHAEFFLER France
M	SONZOGNI	BOSCH REXROTH FLUIDTECH

M	SPERI	ETNA INDUSTRIE
M	VINZIO	KSB (AMRI)

Sommaire		Page
Avant-propos	4
1	Domaine d'application	5
2	Références normatives	5
3	Mise en œuvre des processus de cycle de vie pour un produit mécatronique	6
4	Outils de description et de modélisation des produits mécatroniques	10
4.1	Généralités	10
4.2	Les différents niveaux de représentation	11
Annexe A (informative)	Historique du mot mécatronique	13
Annexe B (informative)	Exemple de réduction de coûts, à périmètre fonctionnel identique, résultant d'une démarche mécatronique	14
Annexe C (informative)	Exemple de gain en performance résultant d'une démarche mécatronique	16
Annexe D (informative)	Processus de cycle de vie	19
Annexe E (normative)	Gestion des compétences	21
Annexe F (informative)	Présentation d'outils de description et mise en œuvre	23
Bibliographie	28

Avant-propos

La mécatronique, dont un bref historique est donné en Annexe A, est un élément fort du marketing de l'innovation : elle a le pouvoir de créer de la valeur ajoutée. En supprimant des frontières existantes, elle permet de satisfaire des fonctions supplémentaires, d'accroître la prestation au client, de développer une offre nouvelle tout en baissant les coûts (voir Annexes B et C). L'objectif n'est pas une course à la technicité ; il s'agit d'offrir une réponse à des exigences auxquelles il n'était pas possible de satisfaire auparavant. La mécatronique contribue en outre au respect des réglementations de plus en plus sévères et peut apporter une plus grande sûreté de fonctionnement (fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité). C'est une solution stratégique majeure pour se différencier de la concurrence et créer de la valeur ajoutée.

La mécatronique est une démarche visant l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique dans la conception et la fabrication d'un produit en vue d'augmenter et/ou d'optimiser sa fonctionnalité (voir NF E 01-010). Cette démarche permet d'obtenir des performances supérieures aux solutions traditionnelles, de réaliser de nouvelles fonctionnalités, et de rendre les produits mécatroniques plus compacts.

Le développement mécatronique implique aussi une adaptation de l'organisation du travail et impose d'abandonner la conception par module ou par technologie au profit d'une vision globale (appelée également approche systémique ou holistique). Cette approche contribue à la performance de l'entreprise, qui doit être capable de s'organiser dans un nouveau type de processus ; elle présente l'intérêt majeur d'élever durablement l'entreprise dans la chaîne de valeur, en passant d'une offre « composants » à une offre « solutions », et de favoriser son adaptation aux mutations des marchés. Les liens entre fournisseurs et clients se trouvent resserrés et ces derniers, fidélisés.

Introduction

Au même titre que l'ingénierie des systèmes, la mécatronique nécessite de replacer la conception du produit dans son cycle de vie global avec une approche coopérative interdisciplinaire. Pour cette raison, cette norme s'appuie sur le vocabulaire et la description des processus de l'ISO/CEI 15288 *Ingénierie des systèmes et du logiciel - Processus du cycle de vie du système*. Toutefois l'application de l'ISO/CEI 15288 n'est pas un pré-requis dans le cadre de la présente norme.

NOTE 1 l'ingénierie des systèmes est définie comme suit dans ISO/CEI 26702 *Ingénierie des systèmes - Application et management du processus d'ingénierie des systèmes* : approche coopérative interdisciplinaire pour le développement progressif et la vérification d'une solution pour le système, équilibrée sur l'ensemble de son cycle de vie, satisfaisant aux attentes d'un client et acceptable par tous.

NOTE 2 Le « système » de la norme ISO/CEI 15288 correspond, dans ce document, au « produit mécatronique » ou au « composant mécatronique », tels que définis dans la norme NF E 01-010.

Cette norme n'a pas pour objet d'explicitier les notions d'ingénierie intégrée (suivant NF X 50-415 *Management des systèmes - Ingénierie intégrée - Concepts généraux et introduction aux méthodes d'application*, également appelée ingénierie simultanée, concurrente -concurrent engineering-, collaborative ou co-conception) bien que la mécatronique en utilise les concepts.

1 Domaine d'application

Le présent document concerne les activités de conception des produits et composants mécatroniques.

Après avoir fourni une description des processus de cycle de vie des produits et composants mécatroniques, en s'appuyant sur un vocabulaire et une présentation normalisés (ISO/CEI 15288), ce document spécifie les outils de description et de modélisation nécessaires à la conception des produits et composants mécatroniques.

NOTE 1 Comme illustré à la figure 1, le produit mécatronique, objet de cette norme, peut être un objet destiné à l'utilisateur final (exemple : pèse-personne), ou un produit destiné à être intégré dans un ensemble plus complexe (exemple : système ABS d'un véhicule).

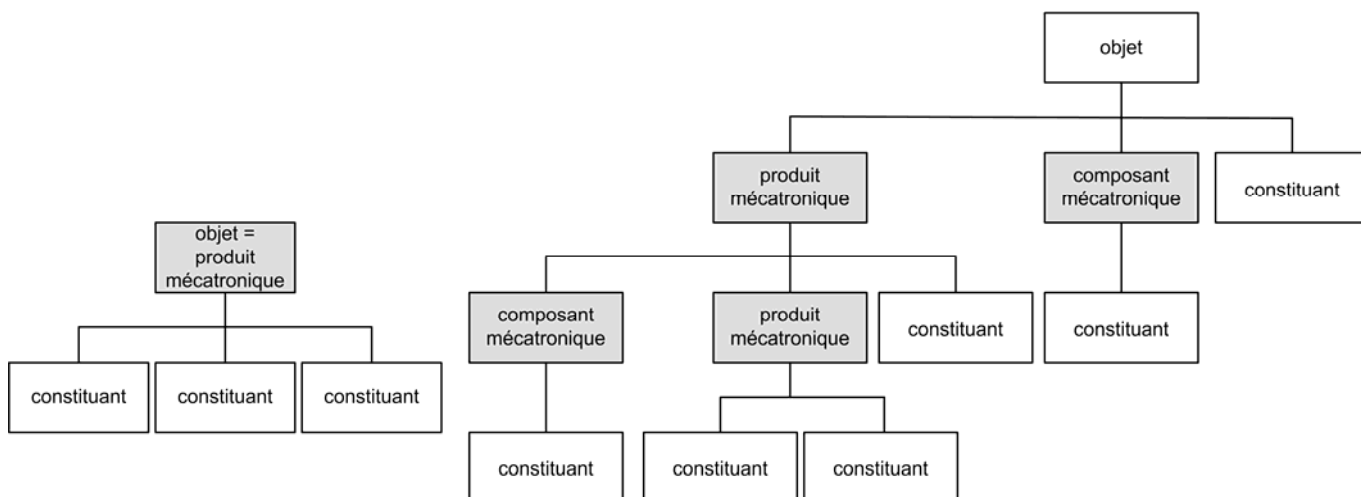


Figure 1 – Exemples de produits et composants mécatroniques, objets de cette norme

NOTE 2 Dans la suite du document, le mot « produit mécatronique » est utilisé pour « produit ou composant mécatronique ».

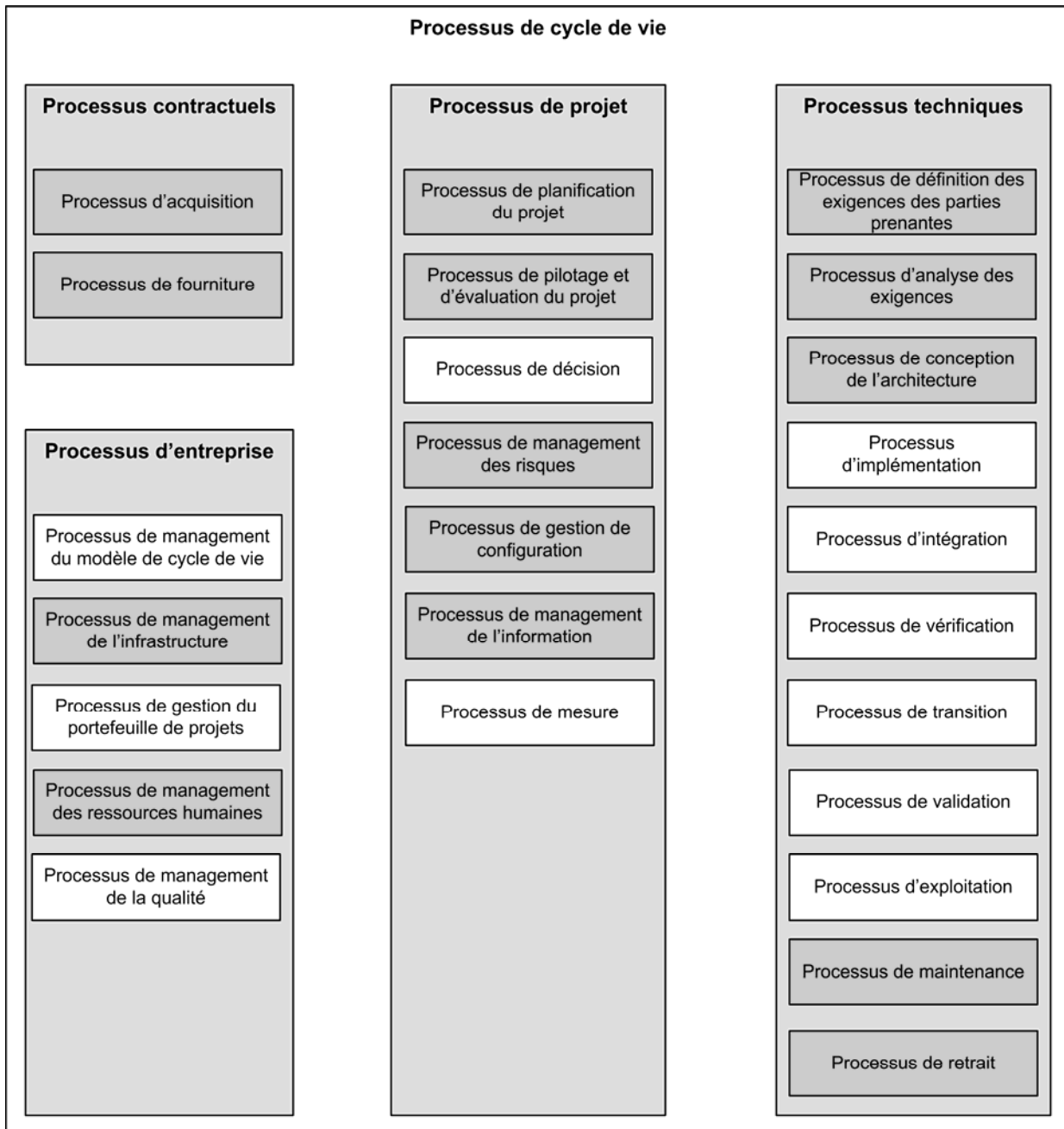
2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

3 Mise en œuvre des processus de cycle de vie pour un produit mécatronique

La mise en œuvre de certains des processus de cycle de vie illustrés à la figure 2, et principalement ceux traitant de conception, doit prendre en compte les spécificités liées à la mécatronique, et/ou les points de vigilance indiqués au tableau 1.

NOTE Voir l'Annexe D pour la description de ces processus.



NOTE Les processus faisant l'objet de commentaires et exigences dans le tableau 1 sont identifiés en grisé

Figure 2 — Processus de cycle de vie suivant ISO/CEI 15288

Tableau 1 – Processus de cycle de vie d'un système – Mise en œuvre pour un produit mécatronique

Processus (suivant ISO/CEI 15288)	Objet du processus (suivant ISO/CEI 15288)	Mise en œuvre pour un produit mécatronique	
		Commentaire	Exigence
Processus d'acquisition	Obtenir un produit ou un service qui réponde aux exigences de l'acquéreur	En faisant appel à des technologies diverses et novatrices, la mécatronique élargit le panel fournisseur/sous-traitant.	<p>Adapter le mode d'évaluation des fournisseurs.</p> <p>Ré-examiner le type de relation, qui peut passer d'une relation client/fournisseur à une relation de partenariat (exemple conception collaborative). Voir Annexe E.1, Note 2.</p> <p>Adapter le séquençage du processus au type de relation. Voir Figure E-1.</p> <p>Evaluer le besoin en compétences particulières des services achats</p>
Processus de fourniture	Fournir un produit ou un service qui satisfasse aux exigences contractuelles	La mécatronique peut faire évoluer la chaîne de valeur : de la fourniture de composants à la fourniture de solutions.	<p>Ré-examiner le type de relation, qui peut passer d'une relation fournisseur/client à une relation de partenariat (exemple conception collaborative). Voir Annexe E.1, Note 2.</p> <p>Evaluer le besoin en compétences particulières des services ventes</p>
Processus de management du modèle de cycle de vie	Définir, maintenir, et assurer la disponibilité des politiques, procédés et modèles de cycle de vie et de leurs procédures d'utilisation au sein de l'organisation	L'application stricte et complète de l'ISO/CEI 15288 n'est pas un pré-requis pour l'application de cette norme.	<p>Utiliser le vocabulaire et la description des processus de la présente norme (conformes à l'ISO/CEI 15288).</p> <p>Appliquer dans la mesure du possible les concepts développés dans cette norme.</p>
Processus de management de l'infrastructure	Fournir aux projets l'infrastructure et les services nécessaires pour que l'organisation et ses projets atteignent leurs objectifs tout au long du cycle de vie	Comme pour toute évolution d'activité, la mécatronique peut nécessiter des moyens spécifiques.	Evaluer le besoin de moyens spécifiques au niveau de la conception (exemples : travail en plateau, logiciels de modélisation, ...), des essais et de la mesure, de la production, des bâtiments (exemple : zone anti-statique)
Processus de management des ressources humaines	Mettre à disposition des personnels nécessaires et maintenir leurs compétences en fonction des besoins du marché	La mécatronique suppose des compétences spécifiques.	Sensibiliser les acteurs de l'entreprise impliqués dans le développement de produits mécatroniques à l'impact de la mécatronique dans leur activité (voir les processus

Processus (suivant ISO/CEI 15288)	Objet du processus (suivant ISO/CEI 15288)	Mise en œuvre pour un produit mécatronique	
		Commentaire	Exigence
			contractuels par exemple). Prévoir, le cas échéant, des formations adaptées (Voir Annexe E).
Processus de planification du projet	Réaliser et publier des plans utiles et efficaces pour le projet	C'est un pré-requis pour la mécatronique	Mettre en place une gestion de projet avec une équipe projet (voir Annexe E.1).
Processus de pilotage et d'évaluation du projet	Evaluer le statut du projet et diriger l'exécution des plans du projet pour assurer que le projet s'exécute conformément aux plans, aux calendriers, aux budgets, et qu'il satisfait à ses objectifs techniques	L'objectif de la mécatronique est l'obtention d'une valeur ajoutée supérieure à la simple somme des valeurs ajoutées des fonctions prises séparément (voir Annexes B et C). L'optimisation du système n'impose pas l'optimisation de ses parties.	La mécatronique n'étant pas une finalité en soi, définir le bon niveau d'intégration en fonction de l'optimum technico-économique recherché.
Processus de management des risques	Identifier, analyser, traiter et gérer les risques de façon continue	La mécatronique fait appel à des technologies diverses et novatrices, et à des filières d'approvisionnement organisées différemment de la filière mécanique (par exemple la filière micro-électronique constituée de très peu d'acteurs). En augmentant les fonctionnalités du produit, la mécatronique accroît la responsabilité et peut donc augmenter la prise de risque.	Surveiller le risque d'obsolescence et le risque fournisseur/sous-traitant (dépendance accrue). Identifier les risques nouveaux liés à l'augmentation des fonctionnalités du produit.
Processus de gestion de configuration	Etablir et maintenir l'intégrité de toutes les sorties identifiées d'un projet ou d'un processus, et les rendre disponibles aux parties concernées		Être attentif aux évolutions rapides des technologies auxquelles la mécatronique est sensible.
Processus de management de l'information	Fournir aux parties concernées des informations pertinentes, à jour, complètes, valides, et, le cas échéant, sécurisées, durant le cycle de vie et même, si nécessaire, au-delà de celui-ci		Etablir un langage commun sur la base de la norme NF E 01-010. Spécifier les formats d'échanges de données et s'interroger sur la gestion des formats (par exemple des langages orientés objet). Voir

Processus (suivant ISO/CEI 15288)	Objet du processus (suivant ISO/CEI 15288)	Mise en œuvre pour un produit mécatronique	
		Commentaire	Exigence
			article 4.
Processus de définition des exigences des parties prenantes	Définir les exigences applicables à un système, pour fournir, dans un environnement donné, les services dont les utilisateurs et les autres parties prenantes ont besoin	La mécatronique est un vecteur d'innovation de rupture ; elle peut permettre de développer une offre nouvelle et de répondre à des exigences non satisfaites auparavant.	Porter une attention particulière à cette phase. Définir les exigences de la manière la plus large possible, et tenir compte notamment de l'évolution des modèles économiques, tels que le transfert de valeur du produit au service.
Processus d'analyse des exigences	Transformer la vision des services souhaités, basés sur les exigences des parties prenantes, en une vue technique d'un produit exigé qui délivre ces services	La mécatronique offre une réponse en proposant des produits capables de percevoir leur milieu environnant, de traiter l'information, de communiquer et d'agir sur leur milieu ;	Etudier la possibilité de proposer des produits plus adaptables, plus compacts, plus respectueux de l'environnement, moins consommateurs d'énergie, offrant une meilleure disponibilité, plus ergonomiques, plus conviviaux, à coût de possession moindre, etc.
Processus de conception de l'architecture	Concevoir une solution qui satisfasse aux exigences du système		Concevoir la solution par l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique, et non par décomposition du produit en sous-systèmes métiers juxtaposés. Appliquer les outils de description et de modélisation des produits mécatroniques de l'article 4.
Processus d'exploitation	Utiliser le système et délivrer les services prévus		Spécifier le montage et la mise en œuvre du produit mécatronique, qui ne sont pas équivalents à ceux du produit mécanique dont il est issu. Fournir les conditions d'exploitation du produit mécatronique, qui peuvent être facilitées par rapport à celles du produit mécanique dont il est issu.

Processus (suivant ISO/CEI 15288)	Objet du processus (suivant ISO/CEI 15288)	Mise en œuvre pour un produit mécatronique	
		Commentaire	Exigence
Processus de maintenance	Assurer la persistance de l'aptitude du système à fournir les services		<p>Définir les conditions de maintenance du produit mécatronique, qui est facilitée par l'intégration de fonctions de diagnostic.</p> <p>Etudier la possibilité de services nouveaux, comme télémaintenance et autodiagnostic.</p> <p>Evaluer les besoins en compétences ou moyens particuliers pour les opérations de maintenance, en fonction des technologies mises en œuvre.</p>
Processus de retrait	Mettre fin à l'existence d'un système		Etudier la question du démantèlement résultant de l'intégration de parties électroniques dans la mécanique

4 Outils de description et de modélisation des produits mécatroniques

4.1 Généralités

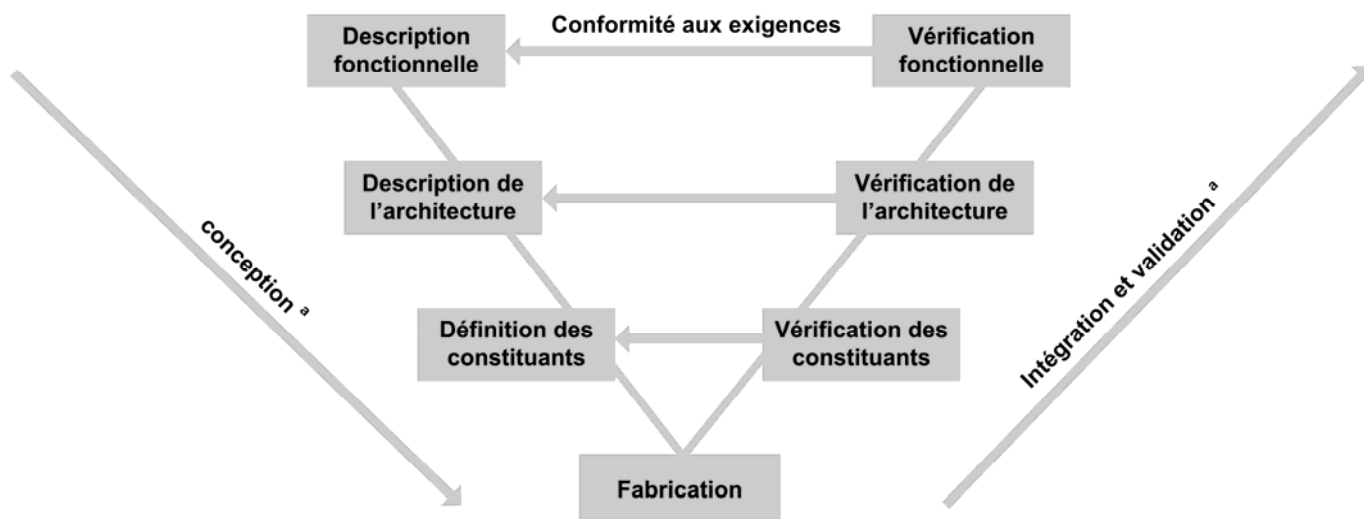
La conception d'un produit mécatronique doit se réaliser au travers d'une démarche itérative constituée d'allers/retours entre la définition fonctionnelle du produit (qui résulte de l'expression du besoin client et ses exigences) et sa définition multi-physique (architecture)¹⁾ sous forme d'une structure organisée de ses constituants matériels et logiciels.

NOTE 1 La description fonctionnelle ne fait appel qu'au résultat attendu, et non à la façon de l'obtenir.

Cette démarche de conception peut se représenter par un cycle en V (voir Figure 3).

NOTE 2 Lorsque l'on regroupe l'ensemble des phases de conception du produit à développer on a réalisé plusieurs fois la démarche du cycle en V, ce qui peut être approximé par une démarche en spirale (ou en W) dans laquelle on lève successivement les inconnues du projet.

1) l'architecture est définie comme suit dans l'ISO/CEI 42010 *Ingénierie des logiciels et des systèmes - Pratique recommandée pour la description architecturale des systèmes exigeant beaucoup de logiciels* : organisation fondamentale d'un système représenté d'une part par ses constituants, leurs interrelations, leurs relations avec l'environnement et d'autre part par les principes guidant sa conception et son évolution.



^a La partie descendante du cycle correspond à des tâches de conception, alors que la partie remontante correspond à des tâches d'intégration et sert à valider les travaux de conception par étapes (du test des constituants au test global du produit). Ce cycle peut être appliqué à la totalité du produit à développer ou à une partie jugée critique.

Figure 3 — Cycle en V

La spécificité de la mécatronique tenant à l'interaction permanente des différentes technologies et à leurs conditions d'intégration, la définition de l'architecture du produit, avec l'ensemble des constituants et de leurs interfaces, doit être considérée comme une étape clé.

C'est à ce niveau que doit être fixée la bonne combinaison technologique entre la mécanique, l'électronique, l'automatique, l'informatique pour remplir les fonctions du produit et répondre à ses exigences (y-compris la sûreté de fonctionnement).

C'est à ce niveau également que peuvent être générés les couplages souhaités, créateurs de valeur, ou ceux non souhaités.

NOTE 3 Il n'y a pas de règle universelle qui permet de déduire strictement l'architecture du produit de l'analyse du besoin fonctionnel : il existe plusieurs architectures candidates et donc plusieurs solutions possibles. L'obtention de l'architecture optimale résulte de la démarche ; cette architecture peut être conçue pour être auto-évolutive ou auto-adaptative pendant l'utilisation du produit [1] [2]

NOTE 4 le niveau optimal d'intégration fonctionnelle et d'intégration physique à atteindre est à moduler suivant le contexte technico économique du projet.

NOTE 5 les choix sont complètement dépendants de l'expertise dans les domaines fonctionnel, technologique et économique des acteurs qui la conduisent (voir Annexe E).

4.2 Les différents niveaux de représentation

Dans le cycle de conception, différentes représentations du produit mécatronique doivent être établies et exploitées, la construction et l'exploitation des modèles constituant ce qu'on appelle la démarche de modélisation. Le modèle peut avoir plusieurs formes, textuelle, graphique, physique et être décrit à l'aide d'un langage naturel, graphique ou informatique.

NOTE 1 Lorsque le produit mécatronique est lui-même constitué de produits et/ou composants mécatroniques (voir figure 1), la même démarche s'applique à ces derniers.

L'exploitation de ces modèles dans une phase de simulation doit permettre de valider et d'optimiser les options technologiques à mettre en œuvre. La cohérence entre ces modèles doit être assurée.

XP E 01-013

NOTE 2 L'utilisation d'un modèle unique suffisant pour décrire complètement le produit est généralement impossible pour les produits mécatroniques. Le formalisme de description associé au modèle dépend du niveau de représentation choisi.

Trois niveaux de représentation doivent être mis en œuvre pour la description d'un produit mécatronique (l'annexe F présente des outils de description et de mise en œuvre) :

- a) Le niveau fonctionnel : description des fonctions générales du produit mécatronique et des fonctions associées aux différents modes de fonctionnement avec leurs stratégies de déclenchement respectives. C'est à ce niveau que doit être réalisée l'analyse fonctionnelle.

NOTE 3 La description du modèle se fait souvent sous forme textuelle (cahier des charges fonctionnel) ; elle peut aussi utiliser des langages « orientés objet » comme UML ou SysML [3]

- b) Le niveau architecture (aussi appelé niveau logique, et parfois décomposé en deux sous-niveaux, les niveaux système et réseau) : description macroscopique du produit mécatronique, du comportement de ses constituants interconnectés par des flux de puissance et d'information, et des lois de commande.

NOTE 4 La description du modèle peut se faire sous forme de blocs diagrammes, de graphe des liaisons (Bond Graph) ou de « modèles multiports » (« port based model »). La description peut aussi recourir à des langages informatiques comme MODELICA [4] ou VHDL-AMS [5] notamment pour les parties électroniques.

NOTE 5 Les spécifications des constituants sont établies en fonction des données de sortie des niveaux fonctionnel et architecture, pour alimenter le niveau de définition.

- c) Le niveau de définition (aussi appelé niveau géométrique, physique ou topologique) : description fine des différents constituants d'un produit mécatronique et de leur intégration (interconnexion, assemblage, câblage, ...) nécessaire à sa réalisation (géométrie 2D ou 3D, comportement des matériaux, nomenclature, routage de cartes, plan de câblage, programme source, etc)

NOTE 6 La description du modèle se fait sous forme de dessins, graphiques, notes de calcul, organigrammes ou fichier d'échanges de données.

Annexe A (informative)

Historique du mot mécatronique

Le terme « mechatronics » a été inventé en 1969 par Mr. Tetsuro Mori [6] [7] à l'époque Executive Officer de la société japonaise « Yaskawa Electric Corporation », fabricant de composants et systèmes d'automatismes [8].

Le mot « mechatronics » est un mot-valise qui a été construit à l'époque par combinaison de « mecha » de « mechanism » et « tronics » de « electronics ».

Le terme « mechatronics » a été déposé comme marque internationale par cette entreprise en 1969, (marque enregistrée en 1971) [9] [10]. Le mot ayant une portée générale et étant utilisé de plus en plus largement dans le jargon technique, Yaskawa abandonna ses droits en 1982 [11].

Les années 1990 ont vu un développement important de l'utilisation du terme avec de très nombreuses propositions de définitions et une évolution sensible de son périmètre et de son sens.

Outre la définition originelle, on peut citer notamment quelques définitions qui ont fait l'objet de nombreuses références et citations dans la littérature technique et scientifique :

- Schweitzer, en 1989 [12]
- Harashima, Tomizuka and Fukuda, en 1996 [13], reprise dans le guide VDI 2206 en 2004 [14]
- Van Brussel en 1996 [15]
- Craig, en 1999 [16]
- Tomizuka, en 2000 [17]

On pourra se référer utilement au guide VDI 2206 [14] pour plus de détails sur l'historique du terme et son évolution d'une description technique (incorporation de composants électronique dans les mécanismes) vers une description en terme d'association de disciplines (Ingénierie mécanique et ingénierie électronique) et de processus (conception et fabrication) pour aboutir au sens actuel associant méthodologie et démarche d'ingénierie (le mot mécatronique) et description technique/fonctionnelle d'un produit (l'adjectif mécatronique).

En France, le terme « mécatronique » est apparu pour la première fois dans un dictionnaire en 2005 (Petit Larousse, édition 2005) et une définition normalisée a été publiée en novembre 2008 (NF E 01-010 Mécatronique – Vocabulaire).

Annexe B (informative)

Exemple de réduction de coûts, à périmètre fonctionnel identique, résultant d'une démarche mécatronique

B.1 Présentation

Le cas d'une motorisation (actionneur électrique avec sa commande et son contrôle) pour un équipement de la maison ; production annuelle de l'ordre de 300 000 unités/ans.

Cet exemple est un cas industriel qui a fait l'objet d'un retour d'expérience sur plusieurs années. Les valeurs mentionnées sont indicatives et doivent être considérées comme des ordres de grandeur.

B.2 Situation initiale

L'ensemble appelé motorisation est composé d'un moteur électrique (puissance 500 W), de plusieurs capteurs physiques et d'un circuit électronique de commande et de contrôle avec son logiciel embarqué. Les fonctions techniques sont réparties soit sur la partie mécanique, soit sur la partie électronique et logicielle.

Le niveau d'intégration physique étant faible, l'ensemble peut être qualifié de composant mécatronique suivant la norme NF E 01-010.

Le prix de revient est de 100 € avec la répartition suivante

- Partie mécanique : 40 €
- Partie électronique et logicielle embarquée : 40 €
- Assemblage : 20 €

B.3 Démarche mécatronique

L'application de la démarche mécatronique à la reconception du produit (augmentation du niveau d'intégration de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique, en recherchant « une valeur ajoutée supérieure à la simple somme des valeurs ajoutées des fonctions prises séparément ») a permis de répartir différemment les fonctions techniques entre les supports mécanique et électroniques. La plupart des capteurs physiques ont été supprimés. Les mêmes fonctions sont réalisées en utilisant un seul capteur physique avec une électronique plus puissante et une partie logicielle embarquée plus conséquente. Cette configuration est parfois appelée « sensorless control » ou « capteur logiciel ».

La démarche a consisté ici non pas à optimiser en coût chaque partie séparément, mais à faire une optimisation en coût global de l'ensemble « mécanique + électronique et logiciel », en acceptant localement des augmentations de coût. On voit ici que la notion d'optimisation est en pratique plus une démarche de compromis et de recherche du meilleur compromis global.

Dans cet exemple, il y a deux niveaux de compromis (selon les cas il peut y en avoir d'autres):

- 1^{er} niveau : la plupart des capteurs physiques ont été supprimés (gain). Les mêmes fonctions sont réalisées par un seul capteur physique mais qui nécessite une électronique plus puissante rendue nécessaire par la partie logicielle embarquée plus conséquente (perte).
- 2^{ème} niveau : l'utilisation d'une électronique plus puissante (perte) permet une réduction du coût du moteur électrique (moins de bobinages et moins de tôleries) (gain).

L'intégration de l'ensemble des gains et pertes sur les différents niveaux aboutit à un coût supplémentaire pour la partie électronique et logicielle de l'ordre de 4 €, mais avec un coût pour la partie mécanique réduit de 6 €.

Dans cet exemple l'apport du 1^{er} niveau est prépondérant. Le sens de transfert de fonctions et de valeurs « de la mécanique vers l'électronique » est une tendance lourde mais n'est pas systématique : l'inverse peut également être pertinent (augmentation du coût de la partie mécanique et réduction du coût de l'électronique + logiciel embarqué).

Il peut arriver également que les niveaux de compromis soient contradictoires.

Pour aboutir à ce résultat, la démarche d'optimisation, d'analyse et de compromis doit impérativement se faire sur la globalité du produit.

B.4 Situation à l'issue de la démarche mécatronique

L'architecture logique n'a pas été modifiée. Les fonctions techniques sont identiques. Le produit dans lequel ce système est monté n'a nécessité aucune modification.

L'ensemble ayant un degré d'intégration élevé (intégration fonctionnelle et physique), il peut être qualifié de produit mécatronique suivant la norme NF E 01-010.

Le prix de revient est de 98 € avec la répartition suivante :

- Partie mécanique : 34 €
- Partie électronique et logicielle embarquée : 44 €
- Assemblage : 20 €

B.5 Bilan économique

L'utilisation de la démarche mécatronique a permis dans cet exemple une réduction de 2 % du prix de revient, soit un gain économique de l'ordre de 600 k€/an, hors coûts d'études.

Annexe C (informative)

Exemple de gain en performance résultant d'une démarche mécatronique

C.1 Présentation

Cet exemple est un scénario de préconception d'un robot manipulateur rapide ("pick-and-place") qui doit manipuler des objets en contournant un obstacle. Cet exemple théorique illustre particulièrement l'impératif d'intégration au plus tôt dans le processus de conception des compétences expertes. Cet exemple est issu des travaux réalisés dans le cadre du consortium FOR2M animé par THESAME, par le Professeur Daniel Brun-Picard de l'ENSAM Aix-en-Provence²⁾

On considère une trajectoire typique, que ce robot devra parcourir à haute cadence pour transporter de part et d'autre d'un obstacle des objets dont la masse est comprise entre 10 kg et 20 kg. Elle est composée de trois segments délimités par un point de départ, deux points intermédiaires et un point d'arrivée, non alignés (Figure C.1). Les points sont distants d'une unité de longueur. Le temps alloué est de trois unités de temps au total. La force à développer par les actionneurs est proportionnelle à l'accélération. La dépense énergétique dans les actionneurs est liée au carré de l'accélération. Pour un actionneur électrique, l'accélération est proportionnelle au courant. La puissance perdue est proportionnelle au carré du courant. Elle est donc aussi proportionnelle au carré de l'accélération.

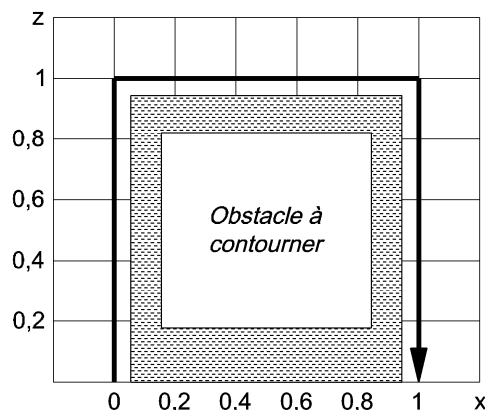


Figure C.1 — Expression du besoin

C.2 Démarche classique de conception

Une approche "naïve", mais de pratique courante, consiste à parcourir la trajectoire axe par axe, selon des segments de droite, en s'arrêtant sur chaque point intermédiaire. Pour réduire la sollicitation des actionneurs et les pertes énergétiques, il est alors utile d'étaler l'accélération dans le temps. On choisit donc d'accélérer uniformément pendant la première moitié du parcours de chaque segment de droite et de décélérer pendant la deuxième moitié. Les chronogrammes correspondants sont développés dans la première colonne de la figure C.2. Le bilan est une accélération constamment égale à ± 4 pendant les trois unités de temps. L'indice de dépense énergétique, égal à l'intégrale du carré de l'accélération, vaut donc : $3 \cdot 4^2 = 48$.

2) Annexe réalisée à partir des travaux réalisés dans le cadre du consortium FOR2M animé par THESAME, par le Professeur Daniel Brun-Picard de l'ENSAM Aix-en-Provence (pour plus de détails sur cet exemple, le comparatif des deux démarches, le choix des architectures et le dimensionnement, voir [18]).

C.3 Démarche mécatronique

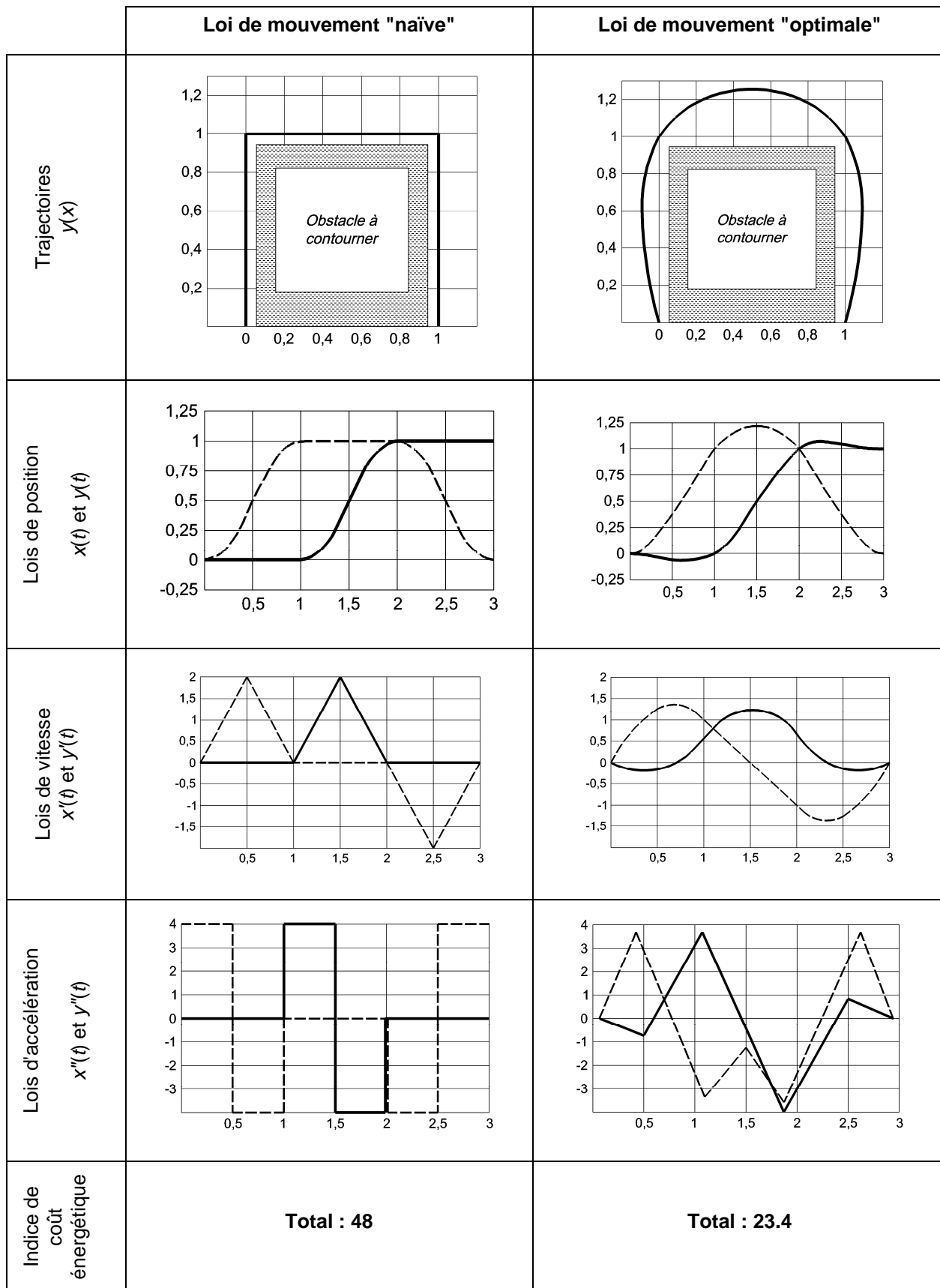
Une approche plus "optimale" résultant des connaissances de l'Automatique, consiste à appliquer une loi de mouvement de type "SPLINE cubique", n'imposant pas un arrêt sur les points intermédiaires, mais plutôt un passage à pleine vitesse. Le résultat est illustré dans la deuxième colonne de la figure C.2. Il apparaît que la vitesse et l'accélération sont significativement plus faibles que dans le cas précédent, pour un temps de parcours identique. L'indice de dépense énergétique est alors égal à 23,4 soit une réduction d'environ 50 %.

La loi optimale permet donc d'utiliser des actionneurs quatre fois moins puissants, donc quatre fois moins lourds, pour une cadence de travail identique. Certains actionneurs étant intégrés dans des éléments mobiles du robot, il y aura un effet cumulatif de l'allègement qui conduira à une solution beaucoup plus performante.

C.4 Conclusions

La démarche mécatronique dès la pré-conception a permis de dégager une solution nouvelle, repoussant les limites très au-delà des stricts besoins exprimés. Les progrès réalisés apportent ainsi une marge de chance de réussite du projet et de satisfaction des besoins du client. Ils ouvrent la voie à des applications nouvelles avec des exigences plus sévères. Les gains peuvent être quantifiés comme suit :

- Gains en performances dynamiques :
 - Vitesse maximale réduite de 30 % (réduction de l'usure et meilleure fiabilité)
 - Accélération réduite en moyenne de 50 %
 - Jerk inférieur à 10 m/s^3 alors qu'il était infini à chaque discontinuité (réduction des oscillations pendulaires et de flexion, ce qui réduit fortement le besoin de rigidifier sa structure et permet de l'alléger au maximum).
- Gain en poids : réduction des masses en mouvement de 50 %
- Gain en temps de cycle : en conservant la puissance initiale des actionneurs, réduction du temps de cycle de 33 % (passe de 3 s à 2 s)
- Gain en efficacité énergétique :
 - A masse égale, gain de 50 %.
 - Avec le gain en poids, gain de l'efficacité énergétique de 75 %.
- Gain au niveau des actionneurs pour une cadence identique :
 - réduction de la puissance de 75 % (réduction par un facteur 4)
 - réduction du poids des actionneurs de 75 %
 - réduction potentielle du coût des actionneurs
- Réduction des délais et coûts de conception, réalisation et mise en service :
 - Suppression des retours sur conception,
 - Evitement des palliatifs en phase de fabrication,
 - Atteinte à coup sûr des performances attendues,
 - Evitement des longues mises au point chez le client.



NOTE . Sur chaque chronogramme, la composante selon l'axe x est tracée en trait continu et celle selon l'axe y est tracée en trait interrompu

Figure C.2 — Comparaison du mouvement optimal et du mouvement à accélération constante

Annexe D (informative)

Processus de cycle de vie

L'objet des processus définis dans ISO/CEI 15288 est rappelé dans le tableau D.1.

Tableau D.1

Processus	Objet du processus
Processus d'acquisition	Obtenir un produit ou un service qui réponde aux exigences de l'acquéreur
Processus de fourniture	Fournir un produit ou un service qui satisfasse aux exigences contractuelles
Processus de management du modèle de cycle de vie	Définir, maintenir, et assurer la disponibilité des politiques, procédés et modèles de cycle de vie et de leurs procédures d'utilisation au sein de l'organisation
Processus de management de l'infrastructure	Fournir aux projets l'infrastructure et les services nécessaires pour que l'organisation et ses projets atteignent leurs objectifs tout au long du cycle de vie
Processus de gestion du portefeuille de projets	Démarrer et maintenir des projets nécessaires et suffisants en nombre et en qualité pour atteindre les objectifs de l'organisation
Processus de management des ressources humaines	Mettre à disposition des personnels nécessaires et maintenir leurs compétences en fonction des besoins du marché
Processus de management de la qualité	Assurer que les produits, services et l'implémentation des processus de cycle de vie satisfont à la fois les objectifs qualité de l'entreprise et la satisfaction du client
Processus de planification du projet	Réaliser et publier des plans utiles et efficaces pour le projet
Processus de pilotage et d'évaluation du projet	Evaluer le statut du projet et diriger l'exécution des plans du projet pour assurer que le projet s'exécute conformément aux plans, aux calendriers, aux budgets, et qu'il satisfait à ses objectifs techniques
Processus de décision	Sélectionner la meilleure des alternatives d'un projet
Processus de management des risques	Identifier, analyser, traiter et gérer les risques de façon continue
Processus de gestion de configuration	Etablir et maintenir l'intégrité de toutes les sorties identifiées d'un projet ou d'un processus, et les rendre disponibles aux parties concernées
Processus de management de l'information	Fournir aux parties concernées des informations pertinentes, à jour, complètes, valides, et, le cas échéant, sécurisées, durant le cycle de vie et même, si nécessaire, au-delà de celui-ci
Processus de mesure	Créer, collecter, analyser et mettre à disposition les données relatives aux produits développés et aux processus mis en oeuvre au sein de l'organisation, pour venir en appui d'un management efficace des processus, et démontrer de façon objective la qualité des produits

Processus	Objet du processus
Processus de définition des exigences des parties prenantes	Définir les exigences applicables à un système, pour fournir, dans un environnement donné, les services dont les utilisateurs et les autres parties prenantes ont besoin
Processus d'analyse des exigences	Transformer la vision des services souhaités, basés sur les exigences des parties prenantes, en une vue technique d'un produit exigé qui délivre ces services
Processus de conception de l'architecture	Concevoir une solution qui satisfasse aux exigences du système
Processus d'implémentation	Produire un élément spécifié du système
Processus d'intégration	Assembler un système fidèle à son architecture
Processus de vérification	Contrôler que les caractéristiques de conception spécifiées sont satisfaites par le système
Processus de transition	Mettre en exploitation le système dans son environnement pour fournir les services exigés par les parties prenantes
Processus de validation	Fournir des preuves objectives que les services fournis par le système en exploitation satisfont les exigences des parties prenantes, réalisant les fonctions prévues dans l'environnement d'exploitation prévu
Processus d'exploitation	Utiliser le système et délivrer les services prévus
Processus de maintenance	Assurer la persistance de l'aptitude du système à fournir les services
Processus de retrait	Mettre fin à l'existence d'un système

Annexe E (normative)

Gestion des compétences

E.1 Constitution du groupe de projet mécatronique

Le groupe de projet doit être constitué de membres et d'un chef de projet ayant les compétences spécifiées en E.2. Le chef de projet doit avoir une responsabilité et une autorité suffisantes pour piloter le projet et prendre les décisions pertinentes ; il doit être indépendant des différentes technologies mises en œuvre.

Le groupe de projet doit rassembler suffisamment de compétences pour avoir la capacité à proposer les orientations importantes, tout en restant d'une taille qui en garantit un fonctionnement efficace. Plutôt que rechercher à intégrer de façon permanente des spécialistes de tous les domaines, il est possible de solliciter certains d'entre eux au cas par cas, à titre consultatif.

NOTE 1 Au démarrage d'un nouveau développement de produit mécatronique, il est rarement possible d'estimer de façon certaine les technologies qui seront mises en œuvre. L'intégration ultérieure au sein du groupe de nouveaux spécialistes pourrait entraîner des remises en cause de certaines étapes du développement déjà acquises, et cela d'autant plus que les nouveaux entrants ont une culture technique différente.

NOTE 2 Certaines des compétences requises peuvent ne pas être disponibles au sein de l'entreprise ; il est alors possible de mettre en place des partenariats avec des entreprises ayant un savoir-faire spécifique sur l'utilisation de certaines technologies, ce qui conduit souvent à des solutions plus innovantes qu'une simple relation client/fournisseur, et peut modifier le séquençement du processus, voir figure E.1.

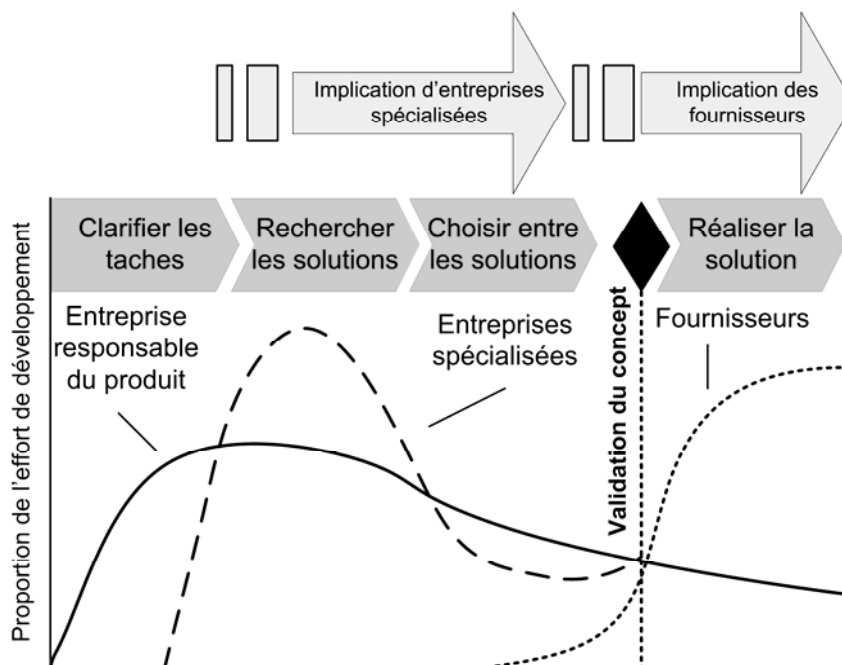


Figure E.1 — Implication de partenaires extérieurs dans le développement d'un produit mécatronique

Lors de la constitution du groupe et pendant le développement du projet, une communication efficace doit être assurée auprès de tous les membres du groupe, et aucun membre ne doit détenir à lui seul le monopole de certaines informations. Le chef de projet doit être conscient du risque lié à ce monopole, et avoir une autorité suffisante pour éviter toute influence préjudiciable au déroulement du projet.

NOTE 3 La réussite d'un projet mécatronique repose sur une coopération pluridisciplinaire efficace, dans laquelle les membres du groupe exposent et défendent leur point de vue dans le but d'obtenir une décision consensuelle..

E.2 Compétence mécatronique

La compétence mécatronique doit s'appuyer sur un minimum de compétence de spécialiste capable de mener son travail dans sa spécialité en profondeur jusqu'à son terme, avec la capacité de raccorder (d'intégrer dynamiquement, d'interfacer) son travail et d'intégrer les exigences des autres disciplines (vocabulaire, niveaux de modèles, outils, ...), dans le processus global d'innovation, conception, fabrication et exploitation.

NOTE Il semble illusoire de penser que la compétence en mécatronique s'acquière par une expertise sur l'ensemble des domaines techniques (un expert unique, spécialiste dans tous les domaines). La compétence mécatronique n'est pas non plus une compétence de généraliste qui connaît superficiellement tous les domaines mais dont l'expertise se concentre plutôt sur les processus de management plutôt que sur les processus techniques (« un spécialiste des généralités »). Voir [19].

Le profil type d'un membre d'un groupe de projet mécatronique doit correspondre à cette description de compétences.

Le profil-type du chef de projet mécatronique doit intégrer les caractéristiques précédentes, incorporer celui d'un chef de projet mais avec en plus, et de manière impérative, la capacité à faire preuve de neutralité par rapport aux diverses disciplines, ayant une vision globale du système et des connaissances techniques et méthodologiques suffisantes pour analyser et classer les solutions proposées.

Annexe F (informative)

Présentation d'outils de description et mise en œuvre

Il n'existe pas d'outil capable de gérer l'ensemble des modèles aux différents niveaux décrits en 4.2. Pour chaque niveau de représentation il existe un grand nombre d'outils informatiques permettant de construire le modèle, de simuler le comportement et parfois d'optimiser automatiquement certaines parties.

- a) Outils associés au niveau fonctionnel : les modèles graphiques de ces architectures peuvent prendre des aspects variés tels que :
- 1) Structured Analysis and Design Technic (SADT®) : la méthode SADT® est une méthode d'analyse et de conception des systèmes importants et complexes en facilitant la communication entre spécialistes de disciplines différentes. Elle fournit des outils notamment pour :

- concevoir d'une façon structurée des systèmes vastes ou complexes ;
- communiquer des résultats de l'analyse et de la conception dans une notation claire et précise ;
- contrôler l'exactitude, la cohérence et, de façon générale, la qualité de manière continue et systématique par des procédures particulières de critiques et d'approbations.

La méthode introduit les concepts suivants :

- les fonctions qui échangent et transforment les données ;
- les données manipulées par les fonctions.

La représentation des modules fonctionnels est modélisée par des boîtes reliées entre elles (voir Figure F.1). Ces boîtes (ou actigrammes) et liaisons sont régies par des règles définies par :

- les flèches indiquent les contraintes d'action, les contrôles,... agissant sur la production de valeur ajoutée ;
- les données d'entrée sont transformées en données de sortie par la fonction (verbe) indiquée dans la boîte ;
- la sortie d'une boîte peut constituer l'entrée ou le contrôle d'une ou plusieurs autres boîtes ;
- les diagrammes sont constitués d'une ou plusieurs boîtes (6 au maximum) et sont hiérarchisés en niveaux de décomposition de diagramme.

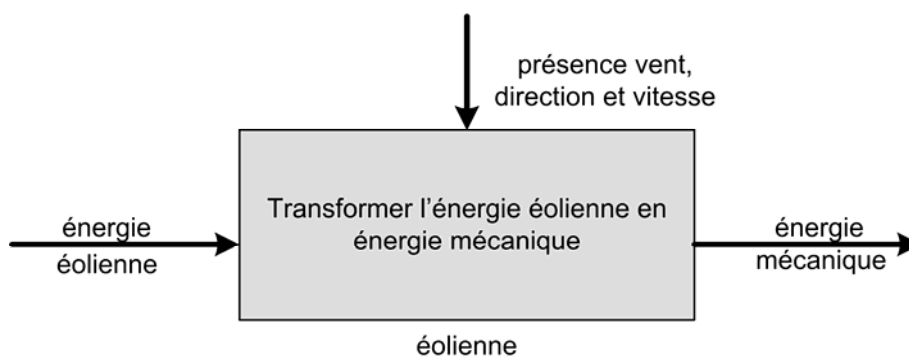


Figure F.1 — SADT® de la fonction principale d'une éolienne

La décomposition fonctionnelle est hiérarchisée entre les différents niveaux de détail, la décomposition à un niveau donné doit faire apparaître des fonctions ou des données qui sont à leur tour décomposées (approche descendante (top-down)). La figure F.2 représente l'enchaînement des boîtes avec leurs relations entre les entrées, les sorties et les contrôles.

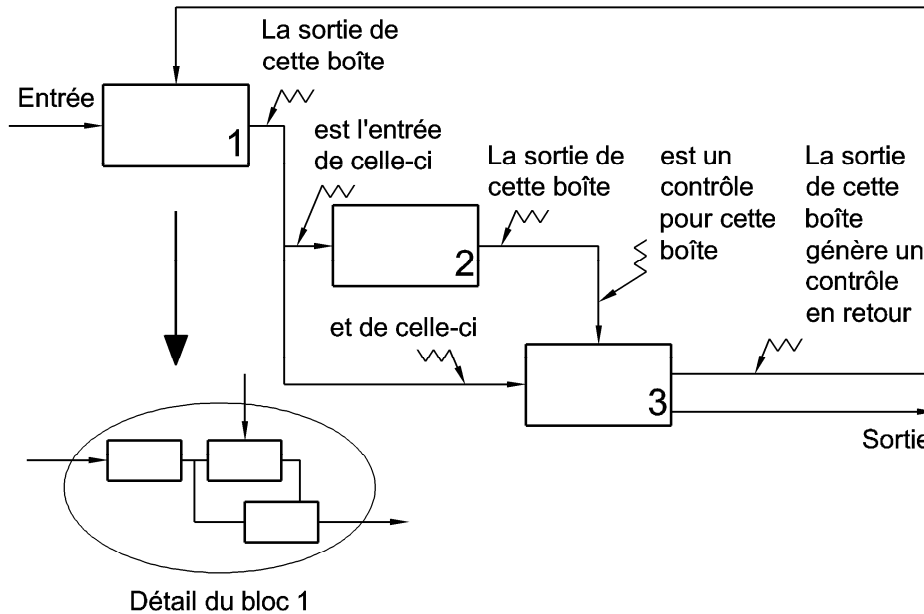


Figure F.2 — Diagramme type SADT® avec détail sur le niveau inférieur [20]

- 2) Function Analysis System Technique (FAST): La méthode FAST ordonne les fonctions suivant un ordre logique ; elle contribue à la clarification de l'état fonctionnel du produit. Elle permet :
- d'ordonner les fonctions identifiées ;
 - de vérifier la logique fonctionnelle ;
 - d'avoir une bonne connaissance du produit ou du système étudié ;
 - de prendre conscience de l'importance relative des éléments ou des structures vis-à-vis des fonctions qu'ils assurent ;
 - de mettre en évidence des synchronisations entre les fonctions indépendantes.

Le diagramme se construit de gauche à droite en plaçant à gauche la fonction principale et en se déplaçant ensuite vers la droite ou vers le bas. Les liaisons entre blocs fonctionnels sont réalisées en répondant à trois questions :

- pourquoi ou dans quel but la fonction existe-elle ?
- comment la fonction d'ordre supérieur est-elle réalisée avec des fonctions d'ordre inférieur ?
- quand est-il nécessaire de disposer simultanément de plusieurs fonctions ?

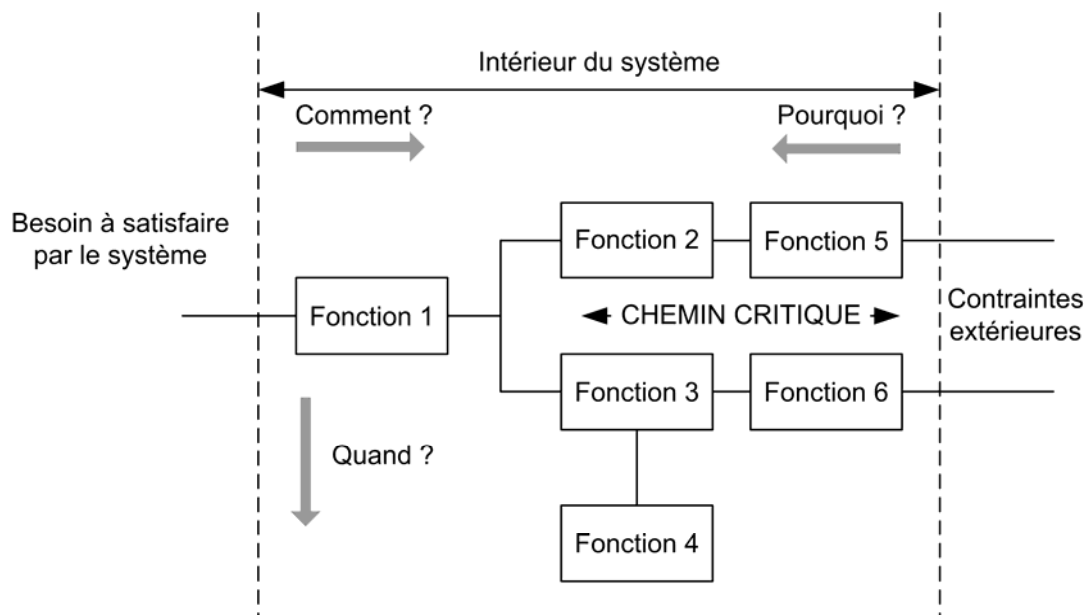


Figure F.3 — Diagramme fonctionnel d'un FAST [20]

- b) Outils associés au niveau architecture : ces outils peuvent faire appel à une modélisation analytique, qui conduit à des modèles de connaissance basés sur une mise en équation du problème, comme par exemple la méthodologie Bond Graph.

La méthodologie Bond Graph permet de spécifier chacune des interfaces du système en termes de transferts énergétiques. À l'entrée de chaque sous-système, on représente les variables de puissance. Chaque lien véhicule deux informations simultanément : l'effort e et le flux f , dont le produit représente la puissance transférée quelque soit le domaine physique (mécanique, hydraulique, électrique, magnétique, chimique, thermodynamique, optique).

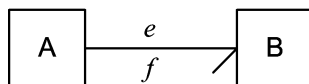


Figure F.4 — Schéma Bond Graph

Le modèle Bond Graph d'un produit mécatronique « dynamique » se situe comme intermédiaire entre le schéma physique et les modèles mathématiques associés (équation d'état linéaire ou non linéaire, équation de transfert dans le cas linéaire). La causalité permet d'écrire systématiquement et d'une façon très structurée les relations qui caractérisent l'évolution dynamique du système et de combiner équations différentielles et équations algébriques (voir Figure F.5).

NOTE Certains logiciels de simulation de systèmes admettent en entrée le modèle Bond Graph, construit à l'aide d'un éditeur graphique (port based models).

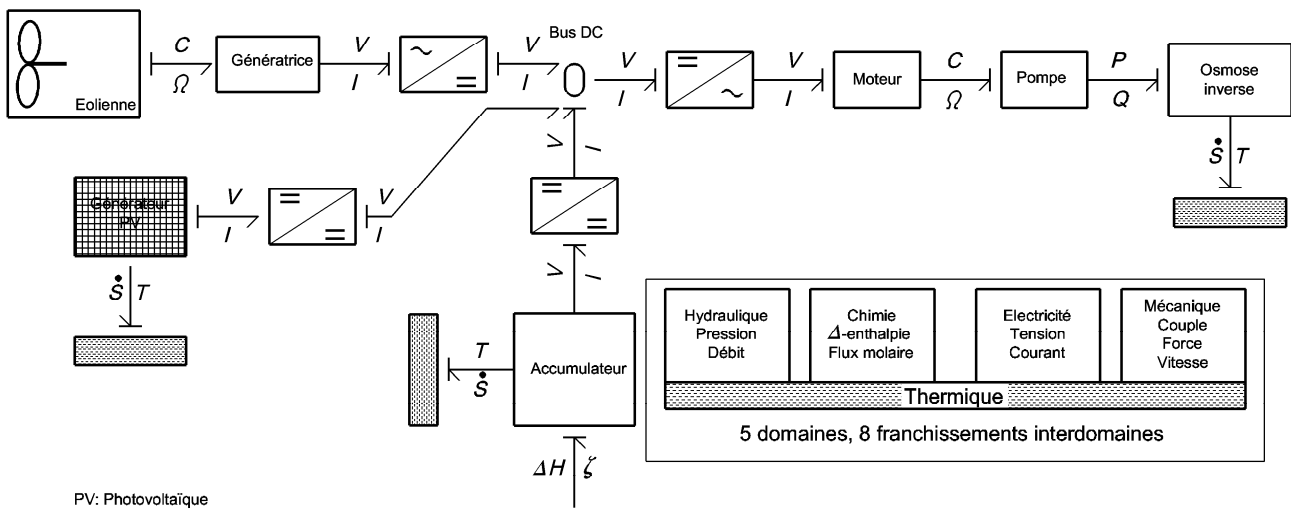


Figure F.5 — Exemple de Bond Graph d’un système hybride éolien – photovoltaïque – accumulateur alimentant une motopompe pour le dessalement par osmose inverse [20]

c) Outils associés au niveau définition : ces outils permettent la modélisation géométrique du comportement mécanique, thermique, électromagnétique, fluide de sous-ensembles du système considéré. Les outils aux éléments finis permettent d’effectuer des simulations multi physiques de manière à représenter finement les phénomènes de couplage pouvant intervenir dans des sous-ensembles du produit mécatronique

EXEMPLES modélisation par éléments finis (FEM), modélisation par éléments finis de frontière (BEM), mécanique des fluides numérique (CFD), outils de simulation multiphysiques, voir Figures F.6 et F.7.

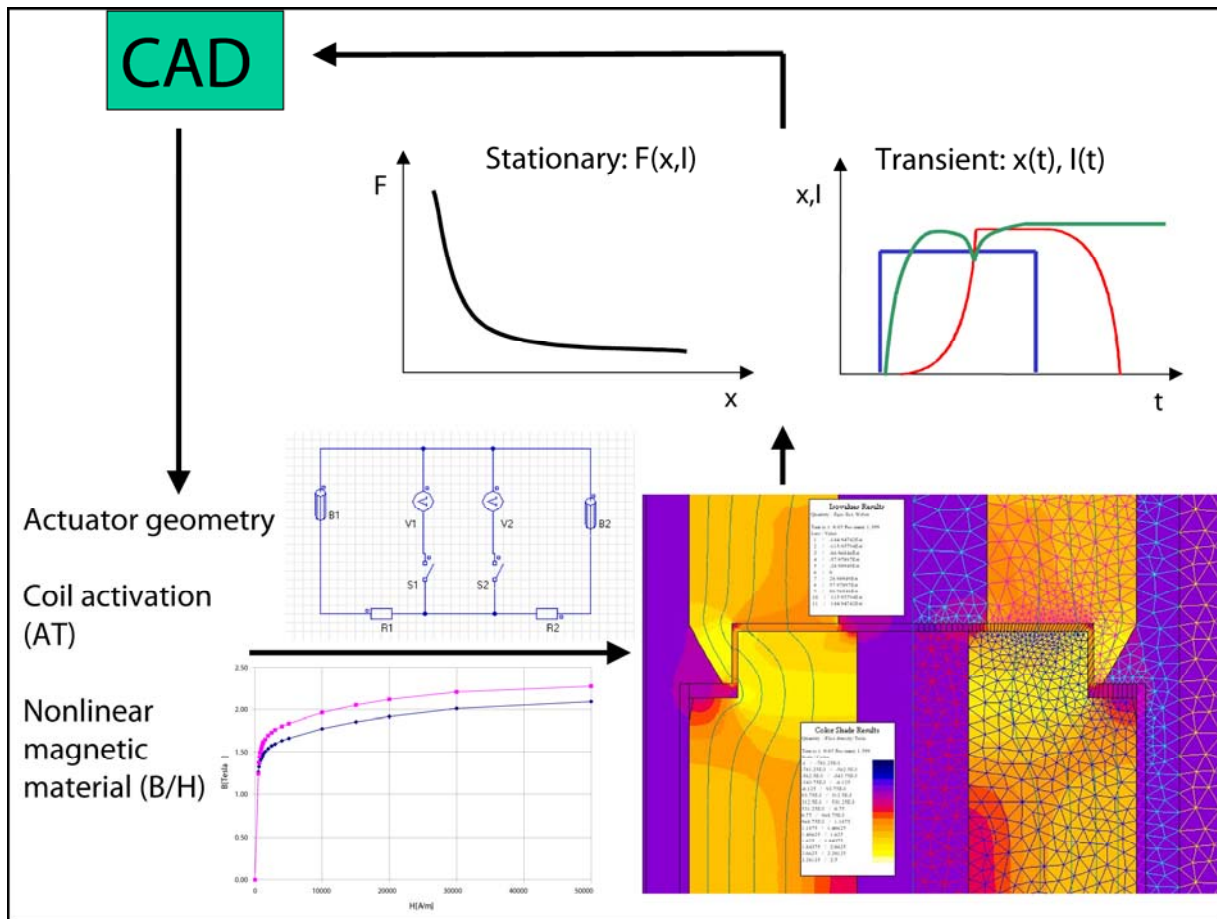


Figure F.6 — Exemple de modélisation FEM sur la partie électromagnétique d’une électrovanne

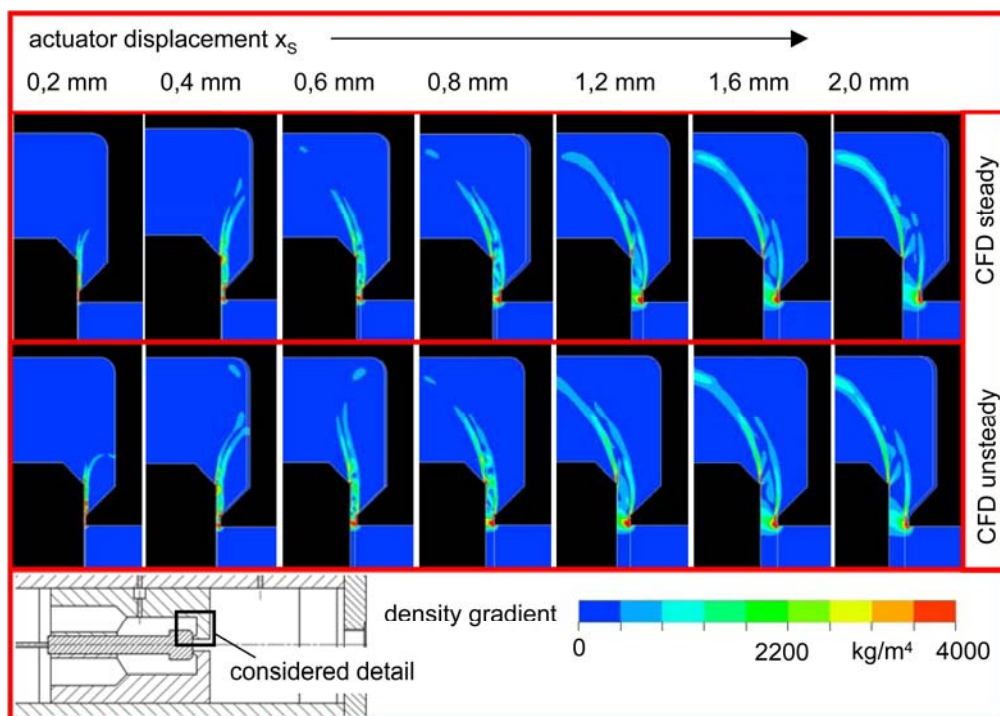


Figure F.7 — Exemple de modélisation CFD sur un système siège clapet soumis a un écoulement d'un fluide compressible

Bibliographie

- [1] P. Pujo, F. Ounnar, "Vers une approche holonique des Systèmes Mécatroniques Complexes : proposition d'un système de pilotage auto organisé et isoarchique", Journal Européen des Systèmes Automatisés, vol. 41, n° 6, pp. 673-706, 2007
- [2] GAUSEMEIER, J.; KAHL, S.: POOK, S. "From Mechatronics to Self-optimizing Systems", Self-optimizing Mechatronic Systems – Design the Future, Proceedings of the 7th International Heinz Nixdorf Symposium., HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 223, Paderborn, 2008 – ISBN 978-3-939350-42-2
- [3] <http://www.sysml.org>
- [4] <http://www.modelica.org>
- [5] NF EN 61691-1 "Automatisation de la conception - Partie 1 : manuel de référence du langage VHDL", NF EN 61691- 2 "Langages relatifs au comportement - Partie 2 : système multilogique en VHDL permettant l'interopérabilité des modèles" (<http://www.vhdl.org/vhdl-ams>)
- [6] Mori, T., "Mechatronics," Yasakawa Internal Trademark Application Memo 21.131.01, July 12, 1969.
- [7] Haruo KOZONO, Shinichi YOKOTA, Tetsuro MORI "Mechatronics - Principle for successful implementations", Keynote speech, Proc. of ICMT 2006, Mexicocity, CD-rom, (2006).
- [8] "Yaskawa Electric Corporation" est une entreprise japonaise créée en 1915 et dont le siège se trouve dans la ville de Kitakyushu, Prefecture de Fukuoka (<http://www.yaskawa.co.jp/en>).
- [9] Japan Trade Mark Kohhoku, Class 9, Shou 46-32713, 46-32714, Jan. 1971.
- [10] Japan Trade Registration No. 946594, Jan. 1972.
- [11] N. Kyura, "The Development of a Controller for Mechatronics Equipment", IEEE Transactions on Industrial Electronics, (1996), 43 (1), 30-37.
- [12] Schweitzer, G. "Mechatronik – Aufgaben und Lösungen" VDI-Berichte Nr 787, Düsseldorf: VDI Verlag, 1989, S. 1/15
- [13] Harashima, F.; Tomizuka, M.; Fukuda, T. "Mechatronics – What Is It, Why, and How?" An Editorial. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 1 (1996) 1, pp. 1/4
- [14] VDI 2206 "Design methodology for mechatronic systems" Verband Deutscher Ingenieure / Association of German Engineers, juin 2004
- [15] H. Van Brussel "Mechatronics, a powerful concurrent engineering framework", IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, vol. 1, no. 2, Jun. 1996, pp. 127-13
- [16] Craig, K., "Mechatronics at Rensselaer: a two-course senior elective sequence in Mechanical Engineering", Proceedings of the 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 452-458. (1999)
- [17] Tomizuka, M. "Mechatronics: From the 20th to 21th Century" 1. IFAC Conference on Mechatronic Systems, Vol. I, 2000, S. 1/10
- [18] D. Brun-Picard, "La mécatronique en tant que démarche de conception intégrée des systèmes à haute performance dynamique", Mecatronica, Publication trimestrielle de la Société Roumaine de Mécatronique, ISSN 1583-7653, n° Nr. 1/2004, pp. 24-30, 2004. Bucarest, Roumanie
- [19] Projet européen EUMECHA-PRO "European Mechatronics for a new Generation of Production Systems – The Roadmap" Pages 63 à 66 "Establishing a European common vision on mechatronics education" <http://www.eumecha.org>

[20] Techniques de l'Ingénieur, S8250, D3970