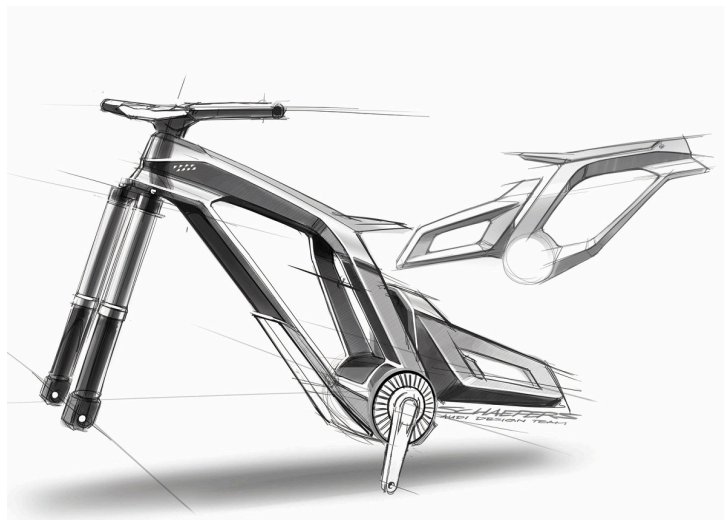


Introduction à l'ingénierie système



Objectifs

L'ingénierie système est une démarche méthodologique d'analyse et de conception des systèmes complexes au cœur du programme de sciences industrielles de l'ingénieur. L'objectif de ce cours est d'introduire les notions et outils de l'ingénierie système après avoir précisé celles de système technique complexe et de cycle de vie d'un produit. Il s'attache plus particulièrement à exposer les concepts de base, les outils de modélisation et le vocabulaire nécessaires aux activités d'analyse fonctionnelle et structurelle des systèmes.

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Notion de système	4
1.2	Systèmes techniques et complexité	5
1.3	Cycle de vie et (éco-)conception d'un produit industriel	7
2	Démarche d'ingénierie système	12
2.1	Objectifs & enjeux	13
2.2	Représentation des systèmes complexes	14
2.3	Gérer la complexité grâce aux modèles	15
2.4	Langage commun de modélisation (SysML)	16
3	Analyse fonctionnelle	18
3.1	Frontière et contexte d'étude	19
3.2	Cas d'utilisation	20
3.3	Exigences	20
3.4	Cahier des charges fonctionnel	22
4	Analyse structurelle	23
4.1	Architecture logique, composition	23
4.2	Architecture fonctionnelle, flux & interactions	25



1 Introduction

Depuis des siècles, l'Homme n'a cessé de créer et optimiser des outils et techniques pour améliorer son quotidien et sa productivité. Cette progression s'est accélérée à la fin du XVIII^e siècle avec le développement industriel et la mécanisation des outils de fabrication. Si le début du XX^e siècle a été marqué par le développement de l'automatisation et de l'organisation scientifique du travail, sa deuxième moitié a été considérablement transformée grâce au développement de la microélectronique et de l'informatique, nous propulsant dans l'ère numérique. Dès lors, de plus en plus de produits dits « intelligents » font leur apparition et il sera bientôt difficile d'imaginer la vie sans appareil ménager programmable connecté *via* un réseau Wi-Fi, sans jeux vidéo interactif ou sans téléphone portable capable de prendre des photos ou des vidéos, surfer sur Internet et lire de la musique. Initialement développés pour des systèmes aérospatiaux et de défense, les produits intelligents permettent de contrôler l'éclairage des routes, piloter des avions, guider la navigation (GPS), assister les chirurgiens au bloc opératoire, etc.

Définition 1.1 (Produit)

Résultat d'activité ou de processus.

Les produits sont dits « intelligents » quand ils intègrent une grande variété de composants comme des caméras, détecteurs de mouvement, récepteurs sans fil, capteurs de position, de son, de chaleur, d'humidité ou de champs magnétiques leur permettant d'obtenir des informations sur leur état et celui de l'environnement qui les entoure. En exploitant les informations obtenues par ces capteurs, ces produits parviennent à s'adapter en temps réel à leur environnement et/ou aux exigences de l'utilisateur. Tous ces nouveaux produits sont le fruit de la rencontre des technologies de fabrication, de l'information et de l'électronique. Certains fabricants innovants ont réalisé qu'ils pouvaient tirer profit des avancées considérables faites sur les composants microélectroniques, logiciels, mécaniques, incluant capteurs et actionneurs, pour créer des produits capables de séduire leurs clients et de devancer leurs concurrents. Le développement et la mise au point d'un produit intelligent ne sont pas chose facile car fait appel à de nombreuses disciplines de l'ingénierie¹ : génie mécanique, génie électrique, génie électronique, génie automatique, génie logiciel, génie chimique, génie industriel (sous-traitance, production, maintenance), sécurité, [...] mais aussi du marketing, du management, du droit et de l'économie. Au cœur de ces nouveaux défis, les ingénieurs occupent une place stratégique pour ne pas dire prépondérante.

Définition 1.2 (Ingénieur [1])

Le métier de l'ingénieur consiste à poser, étudier et résoudre de manière performante et innovante des problèmes souvent complexes de création, de conception, de réalisation, de mise en œuvre et de contrôle, ayant pour objet des produits, des systèmes ou des services – et éventuellement leur financement et leur commercialisation – au sein d'une organisation compétitive. Il prend en compte les préoccupations de protection de l'homme, de la vie et de l'environnement, et plus généralement du bien-être collectif.

1. Le terme « ingénierie » a été introduit assez récemment dans la langue française, par oubli du terme « génie », désignant l'art de l'ingénieur.

1.1 Notion de système

Par essence, un système est un produit artificiel de l'esprit des hommes permettant de penser une réalité complexe. Les systèmes existent dans des domaines très variés (biologie, économie, linguistique, philosophie, management des organisations, etc.). Dans le cadre de la formation scientifique, les systèmes techniques seront particulièrement étudiés, mais les méthodes de raisonnement peuvent être transposées à tout système.

Définition 1.3 (Système)

Un système est une association structurée d'éléments (sous-systèmes ou composants) qui interagissent les uns avec les autres d'une manière organisée pour accomplir une finalité commune appelée fonction globale.

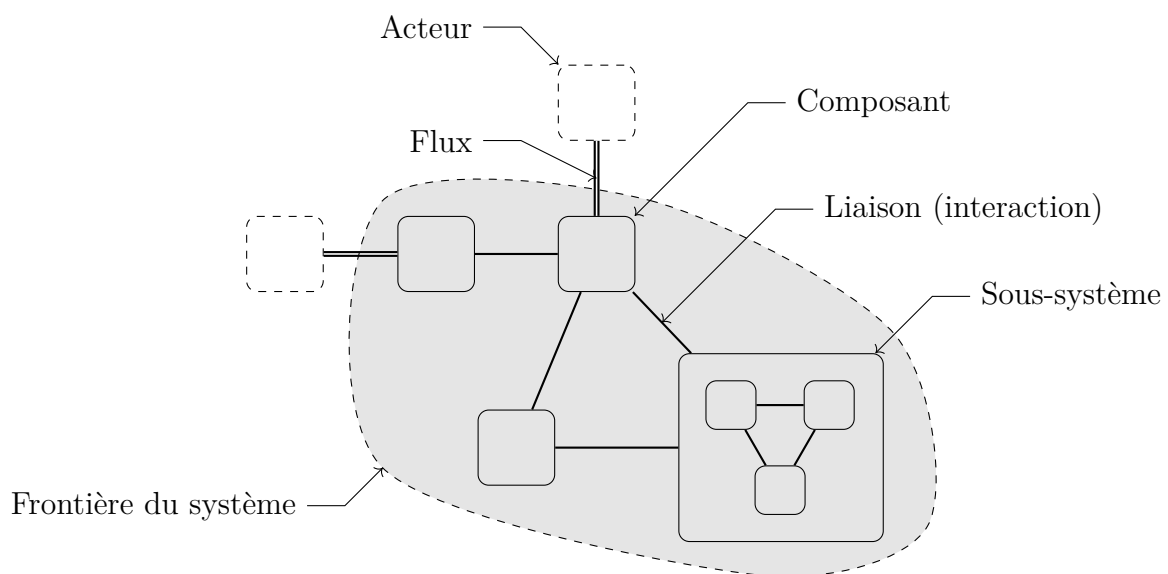


FIGURE 1 – Représentation schématique d'un système.

Par définition, un système est entièrement déterminé par la connaissance de l'ensemble de ses composants et des interactions entre eux et avec son environnement appelé le **milieu extérieur**. La **frontière d'un système** est une limite fictive qui permet de distinguer tous ses composants du milieu extérieur. Un système n'est jamais isolé du milieu extérieur, mais au contraire il interagit avec lui sous forme de **flux** d'énergie, de matière ou d'information. Pour étudier un système, il faut donc non seulement analyser ses constituants, les liaisons entre ses constituants, mais aussi les relations avec les **acteurs** du milieu extérieur (utilisateurs, autres systèmes, environnement et normes) qui définissent les limites du système (figure 1).

On peut compléter ces propositions en constatant qu'un élément d'un système peut être lui-même un système : on parle alors de **sous-système**. Comme un système peut-être lui-même un élément d'un système plus grand, vous verrez parfois apparaître la notion de **système de systèmes**. Enfin, il est indispensable de retenir qu'un système a toujours une finalité exprimée : il sert à quelque chose !

Remarque 1.1 (Un système n'est pas qu'un ensemble !)

Il est important de retenir qu'un système n'est pas un ensemble d'éléments dont le comportement pourrait être déterminé à partir de la somme directe des comportements des éléments qui le composent.

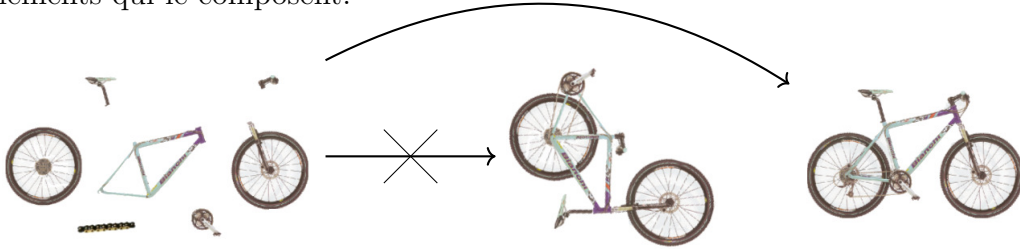


FIGURE 2 – Connaître tous les composants du système vélo ne suffit pas pour comprendre son fonctionnement.

Un système doit donc toujours être défini par :

- des éléments (composants) ;
- les interactions entre éléments (liaisons) ;
- les interactions avec son environnement (flux).

1.2 Systèmes techniques et complexité

Parmi toutes les catégories de systèmes, les sciences industrielles de l'ingénieur ont pour objectif d'étudier les systèmes techniques ou industriels, par nature artificiels car créés par l'homme pour remplir une ou plusieurs fonctions précises.

Définition 1.4 (Système technique)

Un système technique ou produit industriel est formé d'éléments (matériels, logiciels, compétences humaines, processus) intégrés de telle sorte qu'ils fournissent, du fait de leurs interactions, les services correspondant à sa mission.

Un système technique est toujours conçu et réalisé de façon à satisfaire un **besoin** exprimé par un utilisateur ou un client. Les systèmes techniques peuvent ainsi être classés selon leur domaine d'application, c'est à dire le milieu physico-économique dans lequel ils évoluent et pour lequel ils ont été conçus. On distingue, par exemple, le domaine des transports (avion, automobile, tramway, drone, système de navigation, ABS, ESP, suspensions actives, etc.), de l'énergie (centrale nucléaire, {éo,hydro}lienne, panneau photovoltaïque, four solaire, etc.), l'industrie agroalimentaire ou de production manufacturière (machine-outils, chaîne de transfert et de conditionnement, outils de mesure, etc.), de l'électronique grand public (*smartphone*, ordinateur portable), de l'électroménager ou de la domotique (store automatisé, ouvre-portail, réglage de luminosité ou de température), des travaux publics (pelle mécanique, grue, camion-vibrant, carotteuse, tunnelier) ou agricoles (tracteur, moissonneuse-batteuse), le domaine médical (dispositif d'imagerie IRM, échographe, robot chirurgical, hémodyseur, prothèse ou organe artificiel), de la défense, de l'aérospatiale, des services, du jouet, etc. (figure 3).

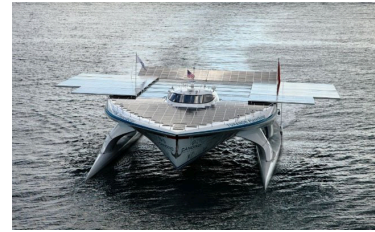
Transports



Concept car EX1 (© Peugeot)



Sky Whale (© AWWA)



Planetsolar (© Tûranor)

Énergie



Éolienne (© Alstom)

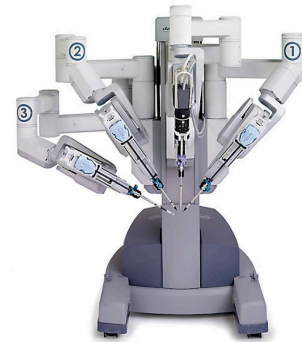


Hydrolienne (© EDF)

Médical



IRM (© Siemens)



Robot chirurgical da Vinci
(© Intuitive Surgical)

Loisirs



Drone modèle S
(© Ciné-drone)



Robot Nao

(© Aldebaran Robotics)

Industrie



Chaîne de transfert (© Ariel)



Centre d'usinage
(© Deckel Maho)



Chaîne de conditionnement
(© Serac)

FIGURE 3 – Exemples de systèmes techniques par domaines d'application.

Les produits modernes sont bien souvent des systèmes complexes pluri-techniques dont le comportement dépend d'un grand nombre de paramètres. Cette complexité se manifeste tant (i) du point de vue de l'architecture, avec des systèmes de systèmes qui « s'emboîtent » les uns aux autres, que (ii) du point de vue des fonctionnalités inhérentes aux possibilités croissantes qu'offrent les différentes technologies.

Définition 1.5 (Système complexe)

Un système est dit complexe lorsque les interactions liant ses composants sont multiples et interdépendantes et telles que le comportement global ne puisse être directement prévisible à partir des comportements élémentaires des composants.

L'analyse des systèmes complexes mobilise des compétences pluri-disciplinaires et requiert une organisation intellectuelle différente de celle des systèmes simples. Un système simple s'étudie habituellement par un raisonnement déductif du type : « *hypothèses* → *modèle* → *résultat* → *conclusion* » par isolement des phénomènes élémentaires (validé par une expérience par exemple) ou en établissant directement des relations de cause à effet. C'est la démarche principalement utilisée pour étudier les phénomènes physiques ou chimiques. Un système complexe s'étudie en triant les entrées et sorties significatives, en hiérarchisant l'organisation interne en niveaux, en cherchant des relations (souvent non causales) entre paramètres, en identifiant des critères de comparaison, des boucles de rétroaction ou en proposant des solutions ou modèles partiellement valides.

1.3 Cycle de vie et (éco-)conception d'un produit industriel

La notion de « cycle de vie » est indissociable d'un système ou d'un produit industriel. Elle exprime les différentes étapes qui vont de l'identification du besoin à l'origine de sa conception jusqu'à l'élimination ou au recyclage de ses constituants (figure 4).

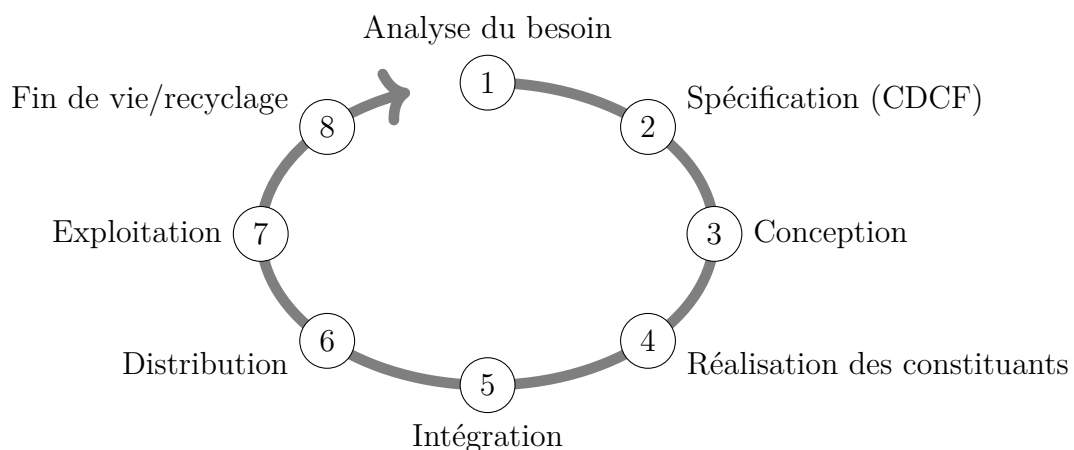


FIGURE 4 – Cycle de vie d'un produit.

Un « client » est obligatoirement au départ de la démarche de conception d'un système. La première action consiste à définir le besoin, c'est à dire ce qu'il attend précisément du produit afin que la solution technique conçue, produite et livrée corresponde à ses attentes.

Définition 1.6 (Besoin)

Un besoin est une nécessité ou un désir éprouvé par l'utilisateur (le client) potentiel. Il concerne la nature de ses attentes et non le volume du marché. Il peut être exprimé ou implicite (besoin non exprimé actuel ou futur).

Exemple 1.1 (Besoin de se rendre à Paris...)

Vous pouvez exprimer le besoin de vous rendre à Paris. Plusieurs produits peuvent satisfaire ce besoin, par exemple :

- une paire de chaussures de sport ;
- un segway (photo ci-contre) ;
- un véhicule hybride ;
- un hélicoptère.

Il est évident que parmi ces produits, certains vous satisferont plus ou vous seront plus abordable que d'autres. Il est donc de première importance de bien spécifier les attentes de l'utilisateur afin que le produit conçu soit en phase avec ses attentes.



La compréhension du **contexte** est essentielle pour caractériser le besoin d'un client, c'est-à-dire exprimer clairement les caractéristiques ou qualités du système attendues par le client. Le terme « contexte » désigne un ensemble d'**acteurs** (utilisateurs ou autres systèmes) avec lesquels le système interagit sous forme de **flux** d'énergie, de matière ou d'information. Le contexte et les besoins du client sont formalisés sous forme d'exigences.

Définition 1.7 (Exigence)

Une exigence énonce une capacité ou une contrainte que doit satisfaire un système.

Les exigences peuvent être de nature fonctionnelle (performances en vitesse, effort), technique (contraintes induites par l'utilisation de certains constituants, type d'énergie ou tension d'alimentation), environnementale (hygrométrie ou température du milieu ambiant), légale (normes de sécurité, de pollution, etc.), pratique (échange de données numériques), énergétique ou esthétique. Chaque exigence doit être quantifiable et donc correspondre à une grandeur physique mesurable pour pouvoir vérifier si le système produit satisfait le besoin du client. L'ensemble des exigences sert à établir un contrat entre le client et le concepteur du futur système appelé le cahier des charges fonctionnel.

Définition 1.8 (Cahier des charges fonctionnel (CDCF))

Le cahier des charges fonctionnel est un document de structure normalisée formalisant le besoin du client ainsi que l'ensemble de ses exigences, sans spécifier de solution technique.

Le cahier des charges fonctionnel permet de modéliser les attentes du client au sens où il doit traduire de façon univoque « le rêve du client ». Une fois le cahier des charges décidé, une première solution technique est imaginée.

Définition 1.9 (Solution technique)

Une solution technique correspond au choix adopté par un industriel pour satisfaire un ensemble d'exigences.

Le choix d'une solution technique est la première étape de la démarche de conception d'un système. Pour étudier sa faisabilité, il est nécessaire de quantifier les écarts entre les performances de cette solution technique imaginée par l'industriel et les performances du produit désiré par le client et spécifiées dans le cahier des charges. La maîtrise de ces écarts est un enjeu majeur de la démarche de conception et à chaque étape du processus de conception il est indispensable de pouvoir quantifier le taux d'exigences satisfaites par la solution technique imaginée (figure 5).

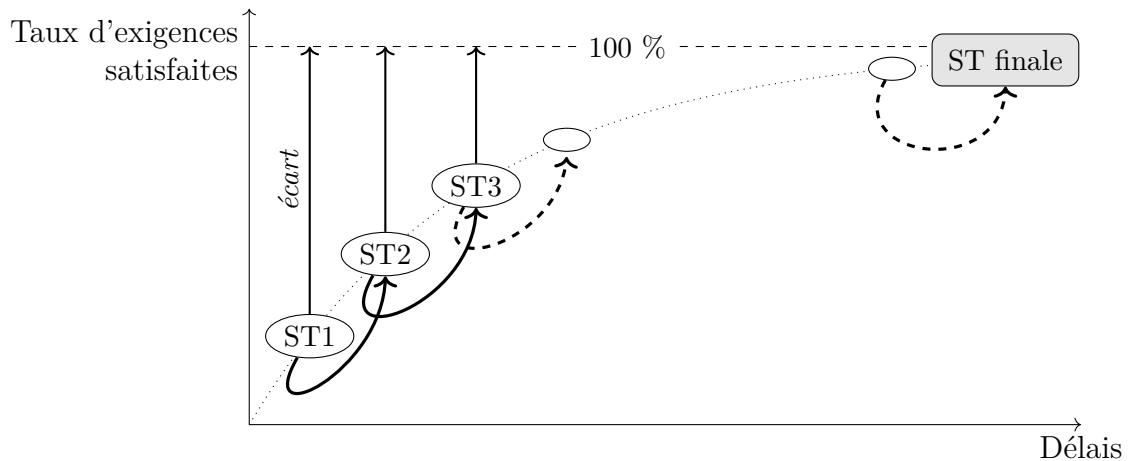


FIGURE 5 – Illustration du processus itératif de conception visant à satisfaire l'ensemble des exigences et faisant apparaître les solutions techniques (ST) successives non commercialisées à cause d'un écart trop important par rapport au CDCF.

De par sa nature, le processus de conception vise à minimiser des écarts (quantifiés) entre les performances estimées de la solution technique et celles spécifiées dans le cahier des charges. C'est par essence un processus itératif et la phase de conception est souvent associée à une organisation appelée cycle de conception en « V » qui se décline en deux phases (figure 6). Dans la phase descendante, le problème global est morcelé en sous-problèmes et des choix technologiques sont proposés pour aboutir à la définition de chaque composant. Dans la phase ascendante, la solution technique est vérifiée graduellement à l'aide d'expérimentations réelles ou virtuelles (modèles simulés). En suivant le « V » de gauche à droite, il s'agit de :

Concept d'opération (CONOPS) identifier et documenter les principaux besoins des clients, les capacités globales du système, les rôles et les responsabilités ainsi que les mesures de performances pour la validation du système en fin de projet ;

Caractéristiques techniques du système dresser une liste décrivant les caractéristiques techniques vérifiables et répondant aux besoins du client définies pendant l'étape CONOPS ;

Conception de haut niveau concevoir une architecture de système de haut niveau répondant aux caractéristiques techniques et permettant la maintenance, les mises à jour et l'intégration à d'autres systèmes ;

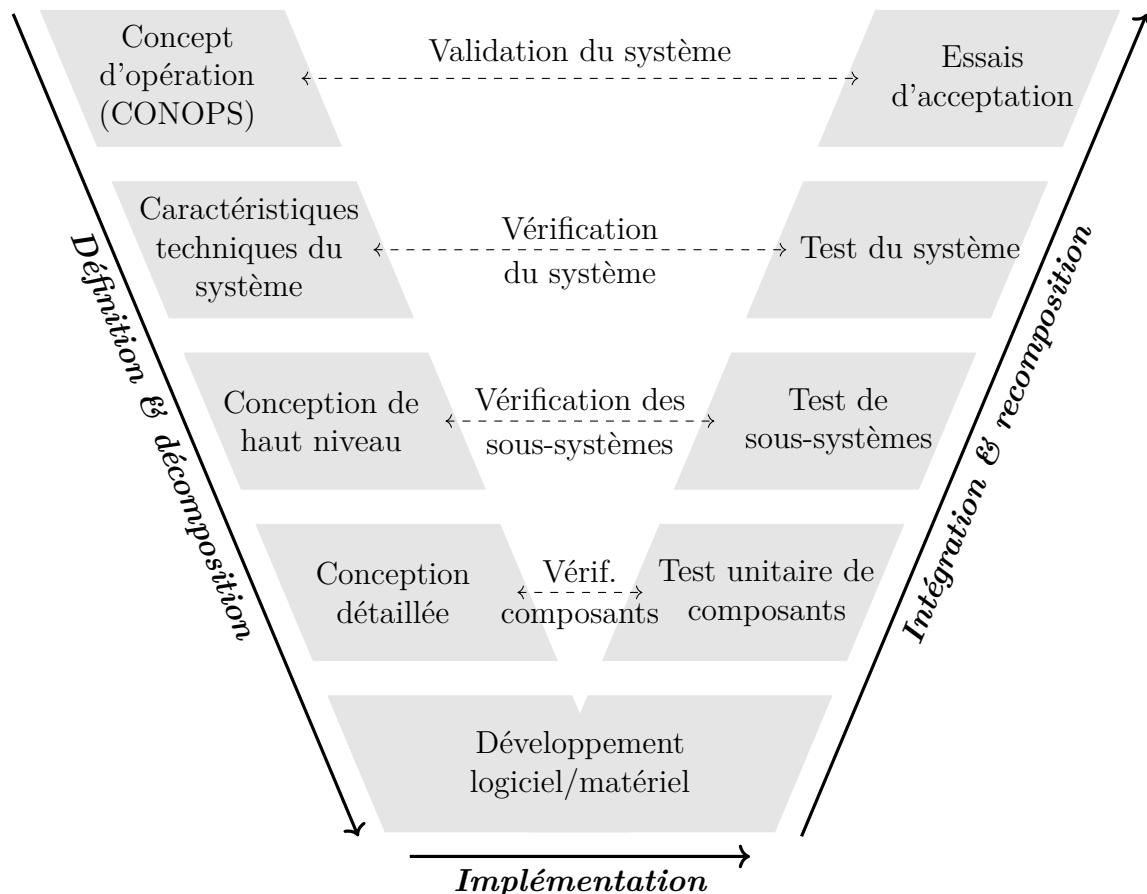


FIGURE 6 – Démarche de conception en « V » d'un produit.

- Conception détaillée** détailler la conception jusqu'au niveau des composants et allouer les exigences à ce niveau. Les composants seront identifiés de manière à permettre leur développement ou leur achat dans le respect du budget initial ;
- Développement logiciel/matériel** choisir la technologie adéquate, développer le matériel et le logiciel identifiés en conception détaillée ;
- Test unitaire/de dispositifs** tester les composants unitairement et vérifier leur bon fonctionnement sur la base des exigences allouées en conception détaillée ;
- Test de sous-systèmes** intégrer les composants logiciels et matériels pour en faire des sous-systèmes, tester et vérifier chaque sous-système sur la base des exigences de haut niveau ;
- Test de système** intégrer les sous-systèmes et tester le système complet sur la base des exigences ; vérifiez que toutes les interfaces ont été correctement implémentées et que toutes les exigences et contraintes ont été respectées ;
- Essais d'acceptation** vérifier que le système respecte toutes les exigences et atteint bien les objectifs fixés.

Remarque 1.2 (Tests, itération & coût)

Pour concevoir de façon robuste et efficace, les écarts doivent être vérifiés à chaque étape du processus d'intégration : c'est le rôle des tests de la phase ascendante du processus de conception en « V » (figure 6). Si l'écart obtenu à l'issue d'un test est trop grand, il y a itération, c'est à dire modification des paramètres de la solution technique. La phase de conception redémarre alors au niveau descendant du test qui a échoué avec pour objectif de se rapprocher des spécifications du cahier des charges et donc du besoin du client. Après un certain nombre d'itérations, la solution technique finit généralement par respecter la plupart des exigences (figure 5).

Vous comprendrez aisément que le coût induit par les itérations de bas niveau (définition des composants) est beaucoup moins important que celui induit par celles de plus haut niveau. En particulier, les défauts constatés après la mise sur le marché peuvent être plus de cent fois plus chers à résoudre que les défauts détectés pendant la phase d'analyse des exigences. Aussi, pour maîtriser les coûts de développement d'un système, il est de première importance de vérifier rapidement et dès le plus bas niveau les performances des systèmes conçus.

Le processus d'industrialisation comprend les phases de réalisation et d'intégration. La réalisation comprend toutes les étapes permettant l'extraction de la matière première jusqu'à l'assemblage des parties mécaniques et électroniques. L'intégration comprend les étapes de développement logiciel de programmation et de débogage. Le cycle d'industrialisation est caractérisé par le choix pour chaque pièce de ses formes, d'un ou plusieurs matériaux et de procédés de fabrication. Les solutions d'industrialisation sont toujours le résultat d'un compromis au niveau du **triptyque produit-matériau-procédé**.

Après avoir été produit, tout système doit être distribué. L'étape de distribution peut nécessiter une étape d'homologation ou de certification. La distribution proprement dite inclue généralement une phase de transport et de commercialisation pour les produits manufacturés, mais peut, dans le cas de solutions industrielles, comprendre une phase d'installation et d'essais de qualification.

Une fois distribué, tout système a pour vocation à être exploité selon les usages envisagés par le cahier des charges fonctionnel. La phase d'exploitation d'un système inclut généralement des phases de maintenance ou de mises à jour. Ces phases de vie doivent elles aussi être prévues dès le début de la conception du système, tout comme la fin de vie du système et son démantèlement puis le recyclage de ses composants.

Remarque 1.3 (Éco-conception)

La production des biens et services affecte de façon significative notre environnement. L'éco-conception est née d'une volonté politique et sociale visant à diminuer l'impact environnemental des produits à chaque étape de leur cycle de vie. Elle est désormais imposée par des normes et réglementations de plus en plus drastiques imposant notamment l'utilisation de matériaux recyclables ou issus de ressources naturelles non nocives et une minimisation de l'énergie consommée et des différentes pollutions.

Remarque 1.4 (Quantification des écarts en SII)

Une grande partie des activités réalisées en travaux pratiques de sciences industrielles de l'ingénieur ont pour objectif de quantifier les écarts entre les performances du système souhaité, celles du système réalisé et celle du modèle du système simulé. Il s'agit de :

- vérifier les performances attendues d'un système complexe (écart 1) ;
- valider une modélisation à partir d'expérimentations (écart 2) ;
- prévoir les performances d'un système à partir d'une modélisation (écart 3).

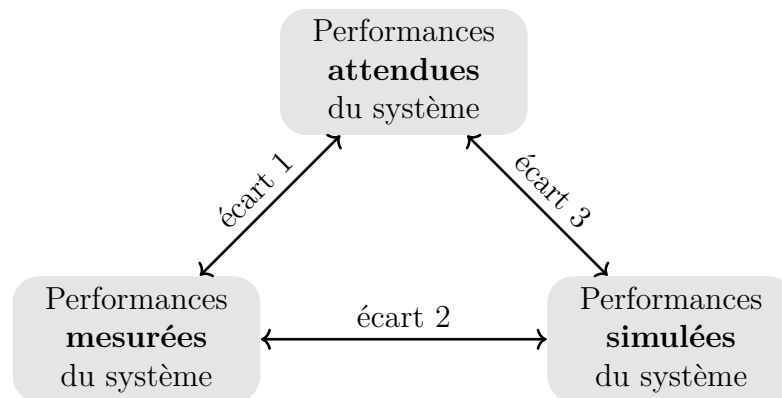


FIGURE 7 – Définition des écarts entre les performances attendues, mesurées et simulées d'un système.

2 Démarche d'ingénierie système

Vous n'êtes-vous jamais demandé comment la NASA parvenait à mettre au point des systèmes aussi complexes que les missions Apollo ? Comment des équipes éclectiques composées d'ingénieurs, de programmeurs, d'équipementiers et autres sont-elles parvenues à travailler ensemble pour permettre à l'homme de marcher sur la lune ? Cela n'aurait sans doute pas été possible sans le recours à l'ingénierie système.

Définition 2.1 (Ingénierie système [2])

L'ingénierie système (ou ingénierie de systèmes) est une démarche méthodologique générale qui englobe l'ensemble des activités adéquates pour concevoir, faire évoluer et vérifier un système apportant une solution économique et performante aux besoins d'un client tout en satisfaisant l'ensemble des parties prenantes.

L'ingénierie système est portée au niveau international par l'*international council on systems engineering* (INCOSE). Elle est organisée en chapitres. Le chapitre français est l'association française d'ingénierie système (AFIS [2](#)). Les pratiques d'ingénierie système sont principalement répertoriées dans trois normes : la norme ISO/IEC 15288 qui adopte le point de vue d'une entreprise participant à des projets d'ingénierie système, la norme ANSI/EIA 632 qui hiérarchise les processus techniques de transformation du besoin en solution et la norme IEEE 1220 qui définit les processus de conception.

2.1 Objectifs & enjeux

Née de la rencontre du monde industriel des « grands projets » (aérospatiale ou défense) et du monde informatique, considéré comme celui des systèmes complexes, l'ingénierie système vise à créer des systèmes aussi vastes que complexes répondant à un ensemble précis d'exigences techniques et commerciales et ce, en optimisant un ensemble de critères stratégiques pour l'entreprise (qualité, coût, délais, rentabilité, etc.).

L'ingénierie système est à la fois une pratique et un processus qui englobe le management du projet (lui-même considéré comme un système), la conception du système et des produits contributeurs destinés à la conception, la modélisation, la fabrication, jusqu'au démantèlement du système. En tant que pratique, elle privilégie la vue d'ensemble : les fonctions et le comportement global d'un système, les interfaces avec les acteurs (utilisateurs et autres systèmes), l'interaction de ses sous-systèmes et la manière d'associer les différentes disciplines de sorte à garantir leur synergie. En tant que processus, elle se veut une approche robuste et structurée de développement des systèmes en mobilisant tous les efforts techniques des différents domaines et métiers de l'entreprise (figure 8).

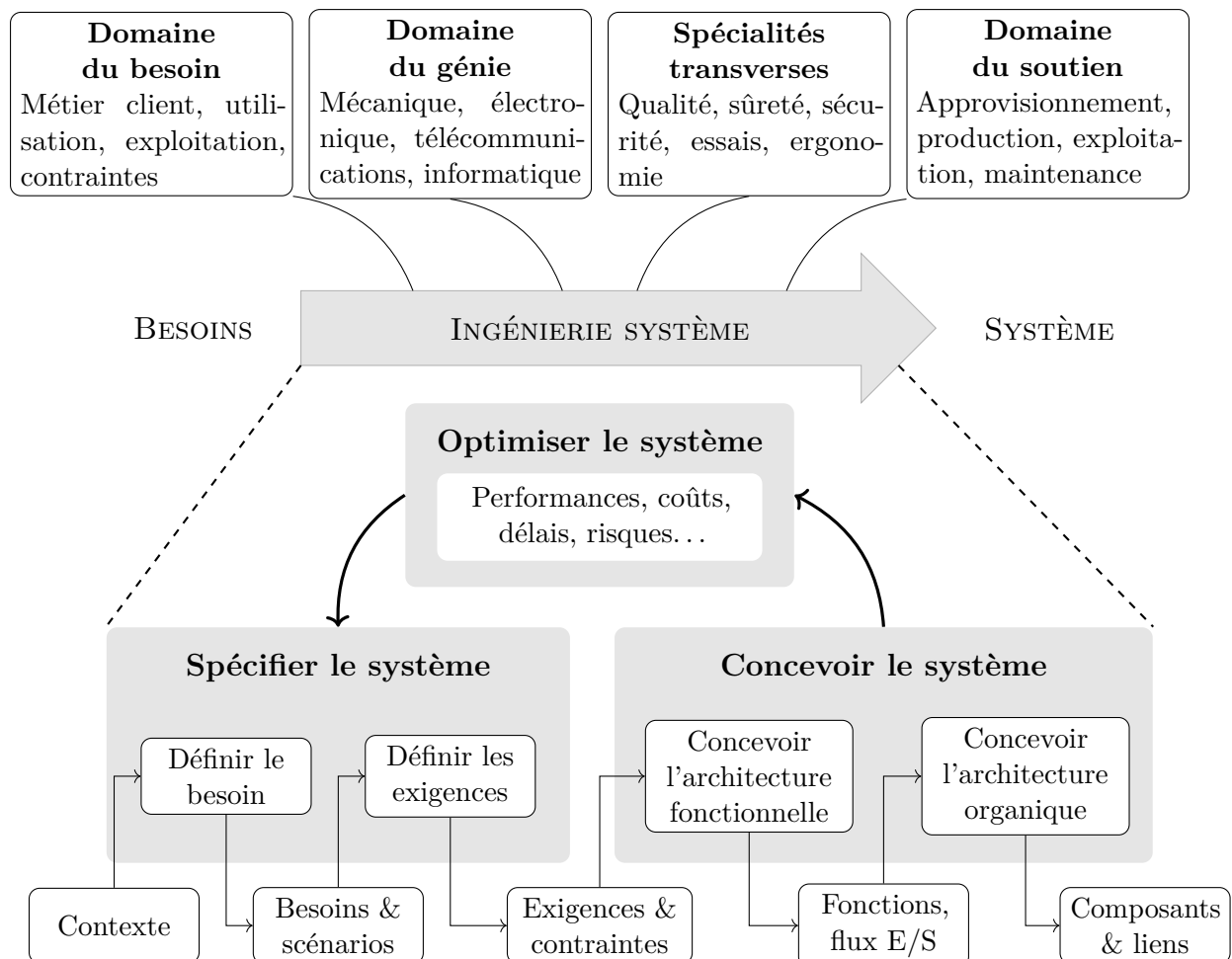


FIGURE 8 – Processus d'ingénierie système.

Un des enjeux majeurs de l'ingénierie système est de permettre à différentes équipes de travailler, communiquer et de faire avancer la conception d'un système en utilisant une même source documentaire. En effet, la conception d'un système, *a fortiori* par une démarche coopérative et pluridisciplinaire, conduit inévitablement à une accumulation de documentations qui doivent toutes être croisées et mises à jour pour maintenir la cohérence et respecter les spécifications du système. L'**unicité des informations** permet de gérer en configuration l'ensemble des éléments (exigences, modèles, simulations ou documents associés). De plus, tout processus d'optimisation étant le résultat de compromis entre différentes solutions envisageables, il est impératif que toutes les décisions prises au cours d'un projet soient dûment justifiées, documentées et archivées. La **traçabilité** est un point clé de l'ingénierie système.

Remarque 2.1 (Documentation des exigences)

Un point stratégique de l'ingénierie système est la documentation des exigences que doit respecter un système. En effet, à chaque niveau d'exigence correspondra un investissement et il est impératif – pour la survie de l'entreprise – que chaque exigence traduise bien les besoins du client et que chaque niveau spécifié soit précisément documenté et argumenté. C'est le rôle de l'ingénierie des exigences.

2.2 Représentation des systèmes complexes

La transformation d'un besoin émergeant en la définition d'un système lui apportant une solution met en œuvre de multiples activités intellectuelles pour lesquelles il est nécessaire de s'appuyer sur différentes représentations. Dans une approche d'ingénierie système, un système (complexe) peut être envisagé selon trois points de vues :

Besoin & exigences ?

Ce point de vue permet de définir précisément la finalité, les missions et les objectifs du système en explicitant les exigences et les contraintes de fonctionnement qu'il doit satisfaire.

Fonctions & comportements ?

Ce point de vue permet de définir les fonctions et les différents cas d'utilisation du système en spécifiant ses différents états, ses interactions avec l'environnement et les activités de ses constituants. Cette approche permet d'étudier l'évolution temporelle (ou dynamique) du système et son mode de pilotage.

Structure ?

Ce point de vue permet de définir l'architecture structurelle ou organique du système en faisant apparaître ses différents constituants, leurs liens d'assemblage et leurs interactions sous forme de flux d'énergie, de matière ou d'information.

À ce stade, il est important de mentionner que si ces trois points de vues sont naturellement complémentaires, ils sont aussi inter-connectés puisque les exigences sont satisfaites par des fonctions et des comportements eux-mêmes exécutés par des constituants (figure 9).

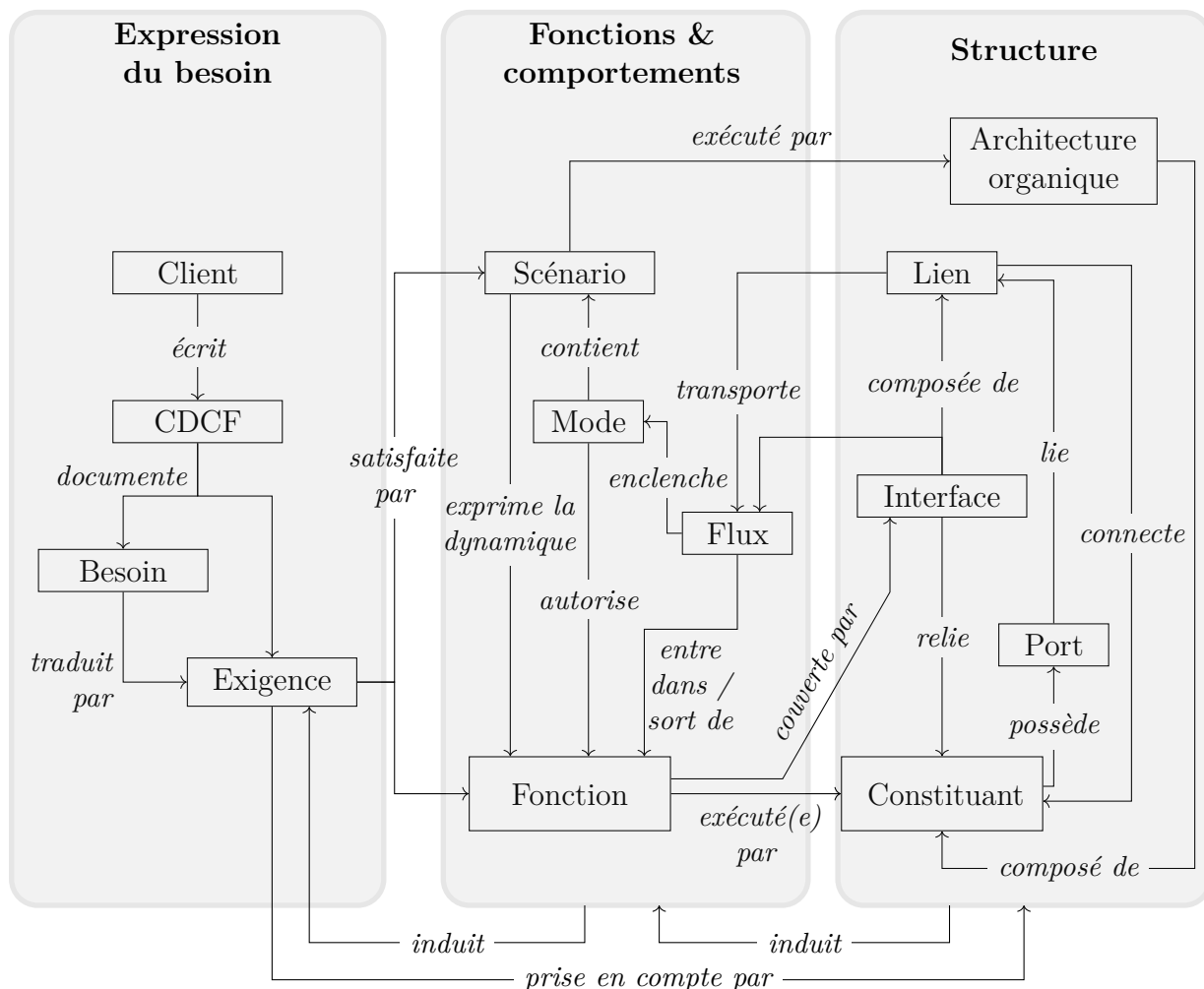


FIGURE 9 – Méta-modèle de l'ingénierie système.

Dans un système complexe, les flux de matière, d'énergie ou d'information échangés entre les composants, les relations non triviales entre la structure et les fonctions ne permettent pas de décrire un système simplement sous la forme d'un texte ou d'un discours et l'utilisation d'un modèle devient rapidement indispensable.

2.3 Gérer la complexité grâce aux modèles

Les métiers mis en œuvre en ingénierie système ont, de tout temps, utilisé des modèles allant des représentations les plus concrètes, telles que les plans ou modèles réduits, aux plus abstraites, telles que les systèmes d'équations. Ils sont indispensables pour appréhender, conceptualiser, concevoir, estimer, simuler, valider, justifier des choix ou communiquer.

Définition 2.2 (Modèle)

Un modèle est une représentation abstraite d'un système construite dans un but précis et qui ne contient donc qu'un ensemble restreint d'informations – supposées pertinentes.

La modélisation peut se présenter sous de nombreuses formes. Le niveau le plus simple peut être un tableur utilisé pour calculer certaines propriétés empiriques mais cela peut aller jusqu'à une simulation informatique interactive très complexe.

Exemple 2.1 (Système anti-collision)

Imaginons, par exemple, que vous cherchiez à comprendre comment le système automobile que vous développez traite les données de collision et les transmet au service d'intervention. Vous devez étudier les données relatives aux capteurs de la voiture et la manière dont celle-ci interagit avec le système externe. Vous ne voulez cependant pas être gêné par des détails superflus tels que les schémas de câblage ou la position des composants. Le bon modèle ne vous montrera que ce dont vous avez besoin !

Comme par nature l'ingénierie système est une démarche coopérative et interdisciplinaire, il est fondamental de disposer d'une représentation commune du système avec un langage compréhensible par tous les corps de métiers. Cette représentation doit permettre de recueillir les exigences liées au produit, de définir les fonctions du système qui permettront de les satisfaire, de distribuer ces fonctions sur différents composants, potentiellement au sein de différents sous-systèmes, et enfin de définir la géométrie de ces composants et la façon dont ils s'assemblent au sein d'une maquette numérique du produit. La gestion associative de ces différents points de vues permet l'intégration des aspects comportementaux dans la définition des systèmes complexes dans leur environnement et de leur traçabilité fonctionnelle. Cette approche a pour objectif d'assurer :

- une continuité entre le modèle géométrique (la maquette numérique) et les différents niveaux de modélisation des systèmes (fonctionnelle, logique et comportementale) ;
- une unicité des informations permettant de gérer en configuration l'ensemble des éléments (exigences, modèles, simulations, documents associée, etc.) ;
- une complétude du spectre des simulations à des fins de validation (simulations logiques, comportementales et réalistes).

2.4 Langage commun de modélisation (SysML)

En 2001, l'International Council on Systems Engineering (INCOSE) ainsi que l'Object Management Group (OMG) ont mis en place un programme destiné à promouvoir un langage commun pour la modélisation de systèmes. Quelques années plus tard, le langage SysML (*System Modeling Language*) était né. Développé sur la base du langage UML (*Unified Modeling Language*) pour le développement logiciel, SysML est un langage destiné à la modélisation des systèmes et des systèmes de systèmes.

Comme son nom l'indique, le langage SysML n'est pas une méthode, mais un ensemble d'outils graphiques définis par un méta-langage et qui offrent au concepteur toutes les facilités pour construire un modèle à forte cohérence sémantique. Il permet de spécifier les systèmes, de concevoir, définir et analyser leur structure et leur fonctionnement dynamique, de simuler leur comportement afin de valider leur faisabilité avant leur réalisation. Il intègre les composants physiques de toutes technologies, les programmes, les données et les énergies, les personnes, les procédures et les flux divers. Il sert aussi de référentiel unique pour gérer le développement et la documentation d'un projet.

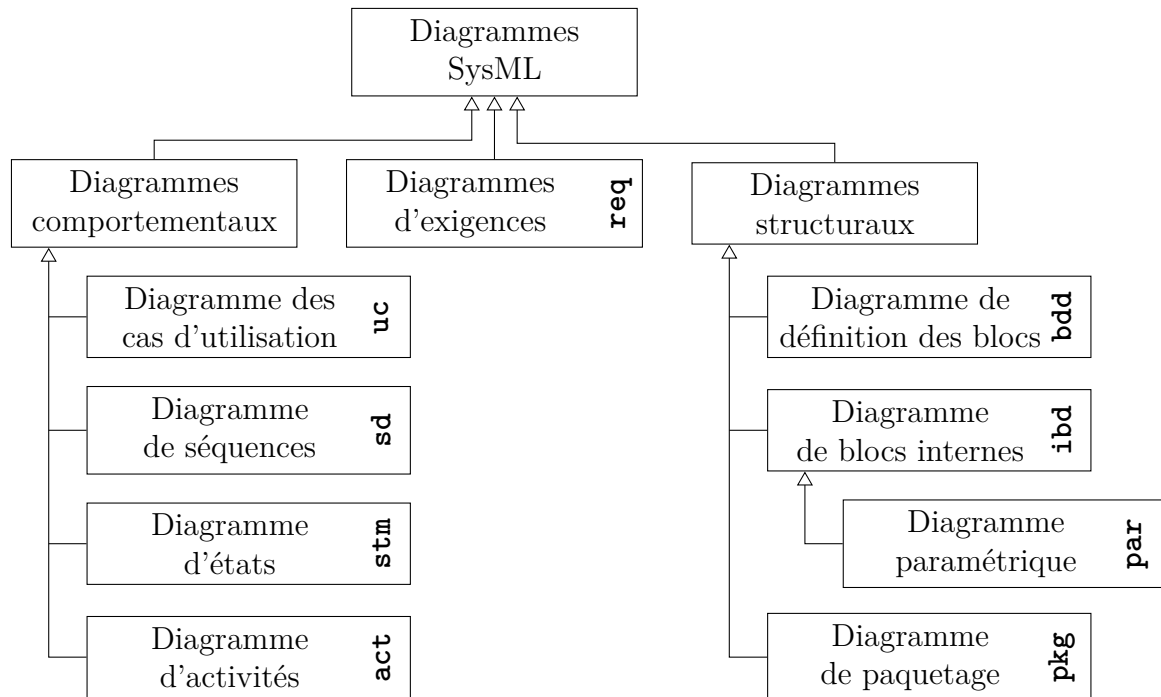


FIGURE 10 – Diagrammes SysML.

Le langage SysML se base sur la notion de bloc qui peut être utilisée pour représenter du matériel, du logiciel, des installations, du personnel ou tout autre élément de système. Il repose sur un ensemble de neuf diagrammes qui traduisent chacun un des trois points de vues de l'ingénierie système (figure 10).

Analyse du besoin

1. diagramme d'exigences (*requirement diagram*, **req**) : pour décrire les exigences du système et montrer quels composants permettent de les satisfaire ;

Analyse comportementale

2. diagramme des cas d'utilisation (*use case diagram*, **uc**) : pour représenter les rôles des acteurs qui utilisent le système et pour quoi faire de façon synthétique ;
3. diagramme de séquences (*sequence diagram*, **sd**) : pour décrire les interactions entre différentes entités et/ou acteurs. Cette représentation est également un excellent vecteur de communication dans une équipe pour discuter d'une solution envisageable ;
4. diagramme d'états transitions (*state machine diagram*, **stm**) : pour représenter tous les états et transitions possibles d'une entité ;
5. diagramme d'activités (*activity diagram*, **act**) : pour montrer l'enchaînement des actions et décisions au sein d'une activité complexe ;

Analyse structurelle

6. diagramme de définition des blocs (*block definition diagram*, **bdd**) : pour représenter toutes les entités (logiques, physiques) qui constituent le système ;

7. diagramme de blocs internes (*internal block diagram*, **ibd**) : pour spécifier l'organisation interne d'un élément du système et les communications inter-entités ;
8. diagramme paramétrique (*parametric diagram*, **par**) : pour représenter les contraintes du système et les équations qui le régissent ;
9. diagramme de paquetage (*package diagram*, **pkg**) : pour montrer l'organisation logique du modèle et les relations entre paquets.

Chaque diagramme représente un point de vue particulier d'une partie du modèle du système. Afin de le repérer, chaque diagramme est représenté dans un cadre avec un cartouche précisant la nature du diagramme dans le coin supérieur gauche (figure 11).

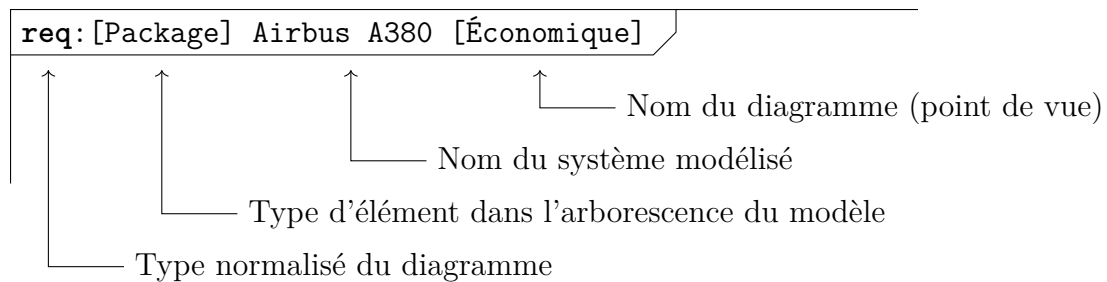


FIGURE 11 – Exemple de cartouche d'un diagramme SysML.

Le type du diagramme, repéré par son identifiant (**req**, **uc**, **sd**, **stm**, **act**, **bdd**, **ibd**, **par** ou **pkg**), est obligatoirement indiqué car il permet d'associer la sémantique indispensable à la lecture du modèle. Les autres arguments, bien qu'optionnels, sont systématiquement renseignés par les logiciels dédiés (comme MagicDraw utilisé au lycée).

3 Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle d'un système a pour objectif d'appréhender son fonctionnement en vue de le concevoir, de l'améliorer ou de diagnostiquer l'origine de ses dysfonctionnements. Cette analyse permet d'identifier les exigences auxquelles répond le système, la matière d'œuvre sur laquelle il agit, les fonctions internes ou externes qu'il réalise et de mettre en regard ses fonctions avec les solutions technologiques.

Exemple 3.1 (Balance de ménage Halo®)

Pour illustrer la démarche et les outils d'analyse fonctionnelle, nous étudierons la balance de ménage Halo® (figure 12). Cette balance de cuisine permet de mesurer la masse d'aliments liquides ou solides jusqu'à 4 kg grâce à son large plateau en verre qui accepte tous les récipients. La précision de la mesure annoncée est de 1 g. Cette balance est proposée dans un grand choix de couleurs des plus classiques aux plus tendances afin de s'intégrer à toutes les cuisines, son faible volume (25 cm × 20 cm × 4 cm) assure



FIGURE 12 – Balance de ménage Halo®.

une manipulation et un rangement aisés. Un mode de tarage automatique permet à la fois de prendre en compte la masse du récipient mais aussi de réaliser un pesage cumulatif de différents ingrédients d'un mélange en les ajoutant successivement dans le même bol. Un mode de conversion kg/L permet d'obtenir l'équivalent en volume d'eau de la quantité pesée. Cette balance fonctionne avec une pile Cr2032 fournie à l'achat.

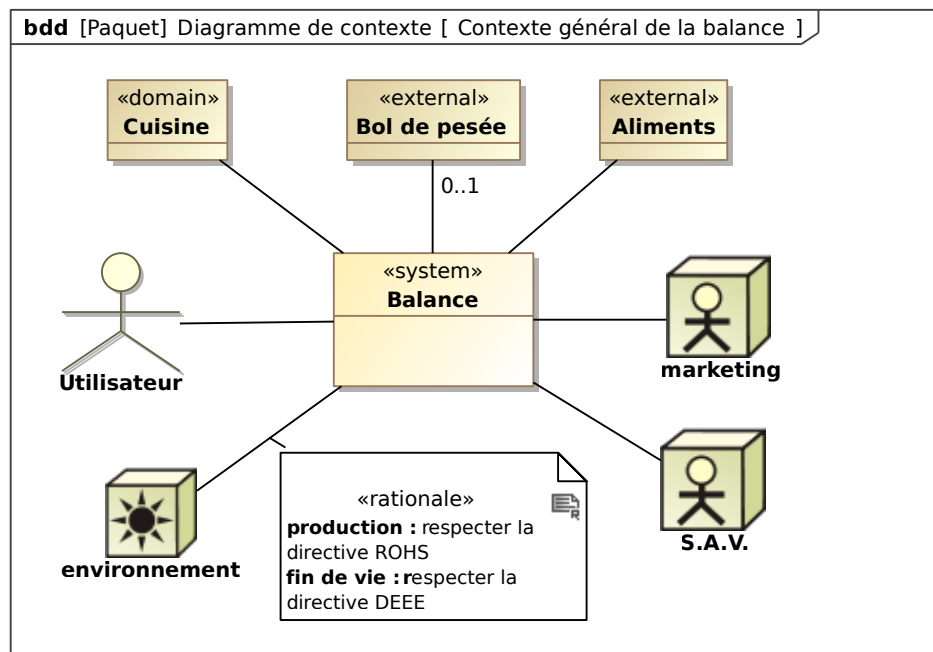
3.1 Frontière et contexte d'étude

Un système interagit avec l'environnement extérieur. Pour étudier un système, il faut donc non seulement analyser ses constituants, les liaisons entre ses constituants mais aussi les relations avec les acteurs qui définissent les limites du système. Avant de mener une étude, il est indispensable de bien définir la frontière du système.

Le **diagramme de contexte** permet de définir la frontière d'étude et en particulier de préciser la phase du cycle de vie étudiée (généralement la phase d'utilisation). Il répond à la question « Quels sont les acteurs et éléments environnants du système ? ». Le système étudié et les acteurs (humains ou systèmes) sont représentés avec un diagramme de définition des blocs (bdd). Il n'y a pas de syntaxe spécifique à utiliser.

Exemple 3.2 (Balance Halo)

Exemple de diagramme de contexte de la balance Halo.



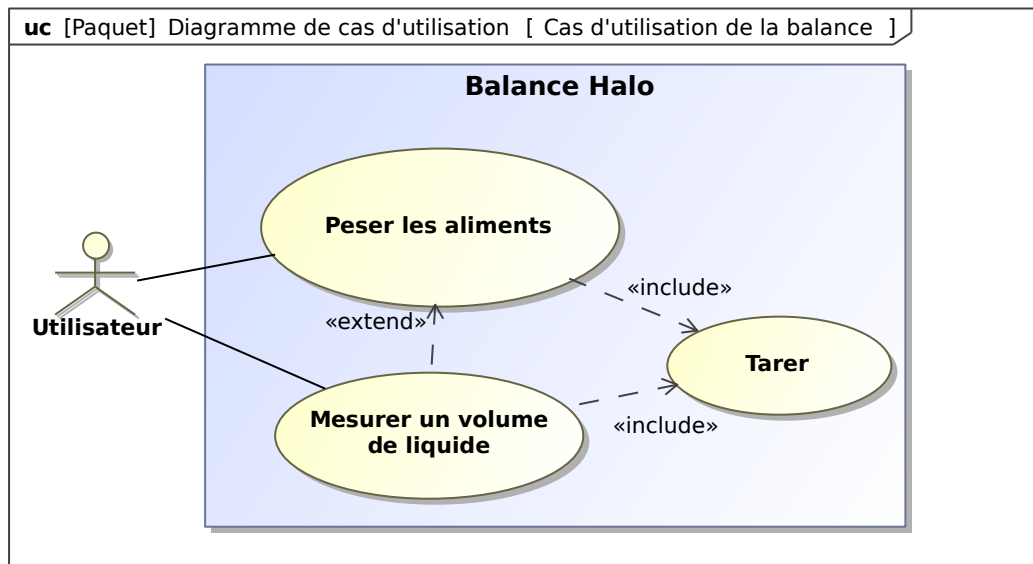
Dans ce diagramme, on retrouve les différents acteurs susceptibles d'avoir un rôle sur le système « Balance ». La cuisine est considérée comme le domaine d'utilisation et le bol de pesée et les aliments sont considérés comme des systèmes extérieurs. Sur le lien entre la balance et le bol de pesée figure l'annotation 0..1 mentionnant le nombre d'occurrences possibles, ici 0 ou 1. Si sur ce diagramme figure le S.A.V., dans ce qui suit, on se limitera au cas d'utilisation courante avec l'acteur principal appelé utilisateur.

3.2 Cas d'utilisation

Le diagramme de cas d'utilisation montre les fonctionnalités offertes par le système. Il répond à la question « Quels services rend le système aux différents acteurs? ». Un acteur est un utilisateur ou un élément extérieur (bloc).

Exemple 3.3 (Balance Halo)

Exemple de diagramme de cas d'utilisation de la balance Halo.



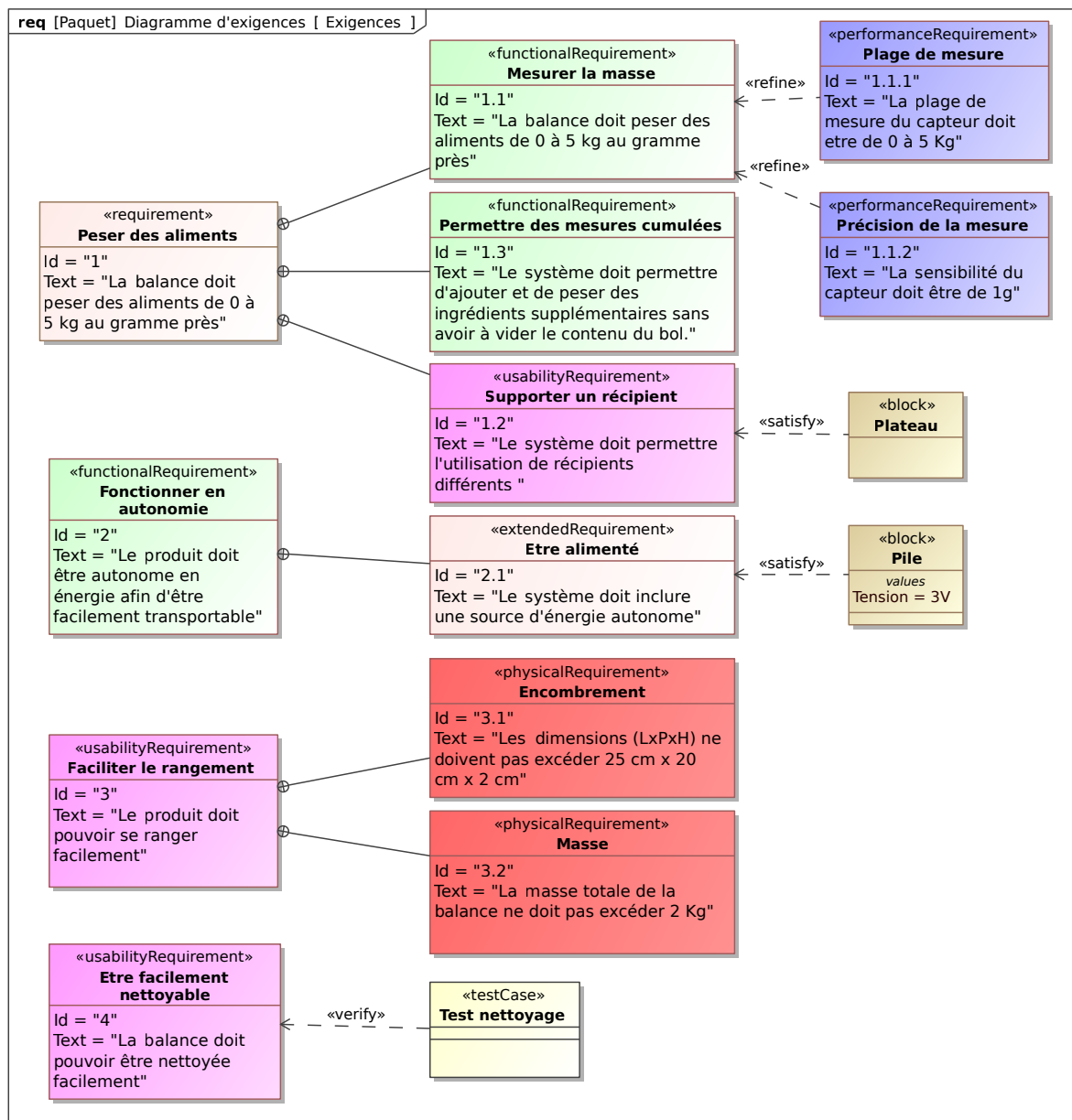
La fonction *peser des aliments* peut être étendue à la mesure du volume d'un liquide moyennant une conversion. Cette extension (non nécessaire à la pesée) est signifiée par un lien $\leftarrow$ sur lequel figure la mention « **extend** ». De même, la mesure d'une masse d'aliments implique d'avoir au préalable taré la balance. La fonction *tarer* est donc incluse dans la fonction de pesée ; ce qui est signifié par un lien d'inclusion $\rightarrow$ sur lequel figure la mention « **include** ».

3.3 Exigences

D'un point de vue global, un système industriel est vu comme générateur de prestations, conçu pour satisfaire un utilisateur. Le diagramme des exigences liste l'ensemble des capacités ou contraintes que doit satisfaire le système. Ce peut être des fonctions devant être réalisées avec des niveaux de performances, des conditions de fiabilité, traçabilité, etc. Les exigences servent à établir le contrat entre le client et les réalisateurs du système. Elles peuvent être décomposées en plusieurs exigences (lien de contenance), précisées par une autre exigence (lien de raffinement) ou dépendre d'une autre (lien de dérivation). Chaque exigence doit être quantifiée pour pouvoir évaluer le degré de satisfaction attendu par le client et des tests (**TestCase**) doivent être prévus. Ils sont reliés à l'exigence qu'ils permettent de vérifier avec un lien de vérification. Enfin, les éléments permettant de satisfaire une exigence (en général des blocs) lui sont reliés avec un lien de satisfaction. Les différents types de liens sont précisés dans la table 1.

Exemple 3.4 (Balance Halo)

Exemple de diagramme d'exigences de la balance Halo.



On retrouve sur ce diagramme les quatre exigences principales de la balance. Les exigences fonctionnelles de mesure de masse et de mesure cumulée sont évidemment contenues dans l'exigence de pesée. L'exigence de mesure de masse est précisée par les exigences de plage de mesure et de précision (lien « **refine** »). Sur ce diagramme on voit aussi apparaître des blocs de composants reliés à une exigence avec un lien « **satisfy** » qui précise ainsi que ces composants (ou sous-systèmes) permettent de satisfaire les exigences qu'ils pointent. De même, un essai (« **TestCase** ») relié à une exigence avec un lien « **verify** » permet d'indiquer la procédure de vérification de l'exigence (cf. tests de la phase d'intégration du cycle de conception en « **V** », figure 6).

Symbole	Lien	Description
$\oplus$ —	Contenance	Précise la décomposition d'une exigence principale (coté $\oplus$) en exigences unitaires.
« refine » ← - - - - -	Raffinement	L'exigence pointée par la flèche est précisée par celle à l'autre extrémité.
« deriveReq » ← - - - - -	Dérivation	L'exigence en queue de flèche dérive de celle pointée.
« satisfy » ← - - - - -	Satisfaction	L'exigence pointée par la flèche est satisfaite par l'élément (bloc) en queue de flèche.
« verify » ← - - - - -	Vérification	L'exigence pointée par la flèche peut être vérifiée par le test (TestCase) en queue de flèche.

TABLE 1 – Différents liens du diagramme d'exigences.

3.4 Cahier des charges fonctionnel

L'identification de la frontière d'étude, des cas d'utilisation et des exigences permet de définir le cahier des charges fonctionnel (CDCF) d'un système. Il regroupe l'ensemble des fonctions que devra satisfaire le système. À chaque fonction seront associés un ou plusieurs critères de performances et leurs niveaux associés.

Exemple 3.5 (Balance Halo)

Exemple de cahier des charges fonctionnel de la balance Halo.

Fonctions	Critères	Niveaux	Flexibilité
Peser des aliments	Plage de mesure	0 à 5 kg	0
	Précision de mesure	1 g	0
Fonctionner en autonomie	Tension continue	0 à 12 V	1
	Batterie(s)	Standard	0
Faciliter le rangement	Encombrement (L×P×H)	25 × 20 × 2 cm	1
	Masse	< 2 kg	1
Résister au milieu ambiant	Humidité relative	5 à 95 %	1
	Température	−10 à 45 °C	1
Plaire à l'utilisateur	Coloris		2
	Formes arrondies	Rayons > 2 mm	2

4 Analyse structurelle

Le fait qu'un système soit constitué d'éléments (composants ou sous-systèmes) implique que leur assemblage suive une logique fonctionnelle et donc suppose une architecture du système que l'on peut aborder selon deux points de vues complémentaires :

- l'architecture logique, faisant apparaître la composition d'un système, en dissociant notamment le système régulé (partie opérative) du régulateur (partie commande) ;
- l'architecture fonctionnelle, faisant apparaître les chaînes d'énergie et d'information associées aux échanges de flux entre composants.

4.1 Architecture logique, composition

La première étape de l'analyse de structurelle d'un système est d'étudier sa composition en le décomposant en sous-systèmes et composants. Cette décomposition doit faire apparaître l'architecture logique du système, étroitement liée à la notion d'assemblage. Comme les systèmes complexes sont quasiment tous automatisés, ils sont systématiquement décomposés en une partie opérative appelée le système régulé et une partie commande appelée leur régulateur (figure 13).

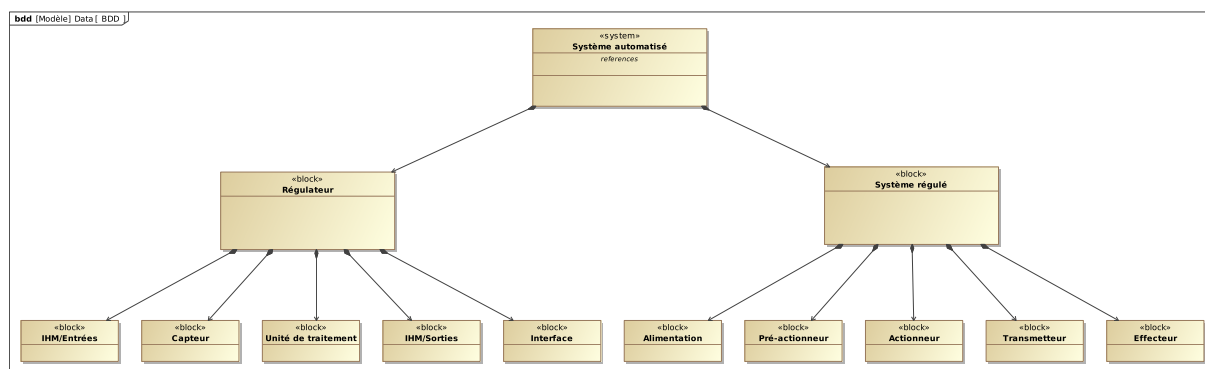


FIGURE 13 – Architecture logique d'un système automatisé.

La modélisation de l'architecture logique d'un système est réalisée avec un diagramme de définition de blocs (bdd). Ce diagramme permet de répondre à la question « qui contient quoi ? » et permet de voir rapidement la structure hiérarchique globale du système. Chaque sous-système ou constituant est représenté par un bloc (« block ») qui doit impérativement avoir un nom. Chaque bloc est relié à un autre par un lien sur lequel peut être précisé le nombre d'occurrences (si différent de 1). Les blocs de niveaux différents sont reliés par un lien de composition ou d'agrégation (s'il est optionnel). Les blocs de même niveau sont reliés par une association. Ces trois types de liens sont précisés dans la table 2.

Il n'y a aucun objectif d'exhaustivité dans un diagramme de définition des blocs et chaque modélisation peut être plus ou moins détaillée en fonction de la finesse et des objectifs de l'étude. Si l'architecture logique d'un bloc n'est pas développée, alors seront mentionnés sous la bannière **parts** les composants ou sous-systèmes qui le constituent.

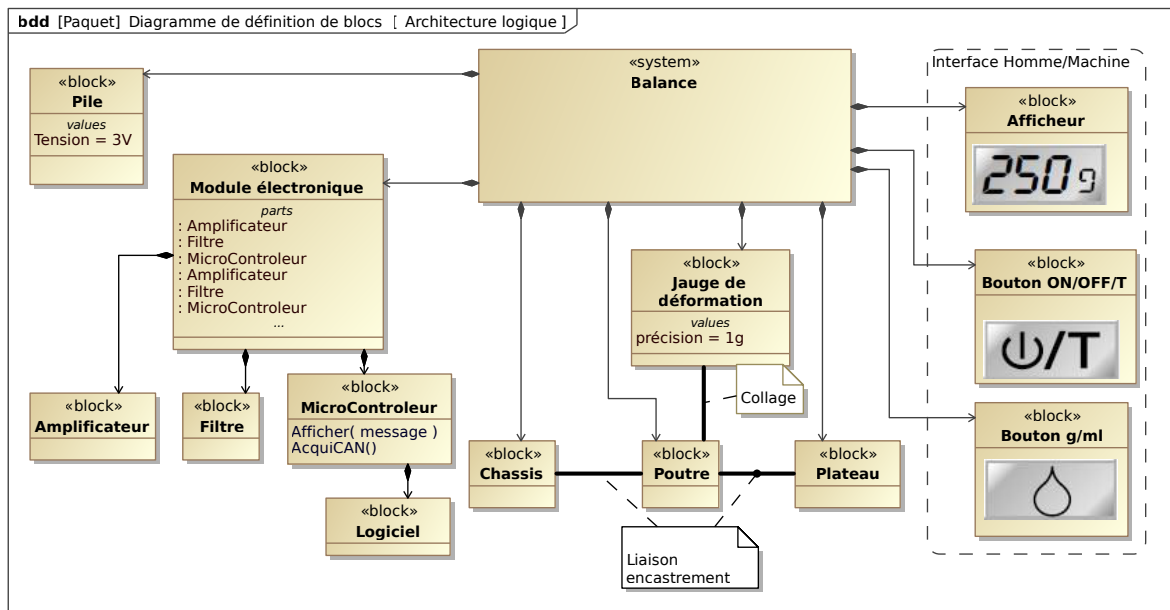
Symbole	Lien	Description
◆ →	Composition	Le bloc conteneur (coté ◆) a nécessairement besoin du bloc contenu (coté →) pour fonctionner.
◇ →	Agrégation	Le bloc conteneur (coté ◇) n'a pas nécessairement besoin du bloc contenu (coté →) pour fonctionner : c'est une « option ».
← →	Dérivation	Les blocs n'ont pas de relation hiérarchique.

TABLE 2 – Différents liens du diagramme de définition des blocs.

Enfin, chaque bloc peut contenir des informations complémentaires relatives à des paramètres (**params**), des valeurs caractéristiques (**values**), des contraintes (**constraints**) entre les paramètres ou des références (**references**).

Exemple 4.1 (Balance Halo)

Exemple de diagramme de définition des blocs montrant l'architecture logique de la balance Halo.



Sur ce diagramme, on note que la balance comporte des constituants principaux (pile, châssis, plateau, etc.) nécessaires au fonctionnement de la balance, ce qui est précisé par des liens de composition. Des annotations sont précisées avec un rectangle au coin haut-droit replié (collage, liaison encastrement). On peut aussi noter que le module électronique n'est que partiellement décomposé : le filtre ou l'amplificateur sont évidemment fabriqués à partir de composants électroniques non mentionnés ici.

4.2 Architecture fonctionnelle, flux & interactions

Suivant la décomposition logique en partie commande et partie opérative, l'architecture fonctionnelle des systèmes complexes automatisés peut généralement être décomposée en deux types de chaînes fonctionnelles :

- une chaîne d'information associée à la commande par le régulateur ;
- une chaîne d'énergie associée à la partie opérative du système.

Comme leurs noms le suggère, ces deux chaînes traduisent respectivement les échanges entre les blocs du système sous forme de flux d'information et d'énergie (figure 14).

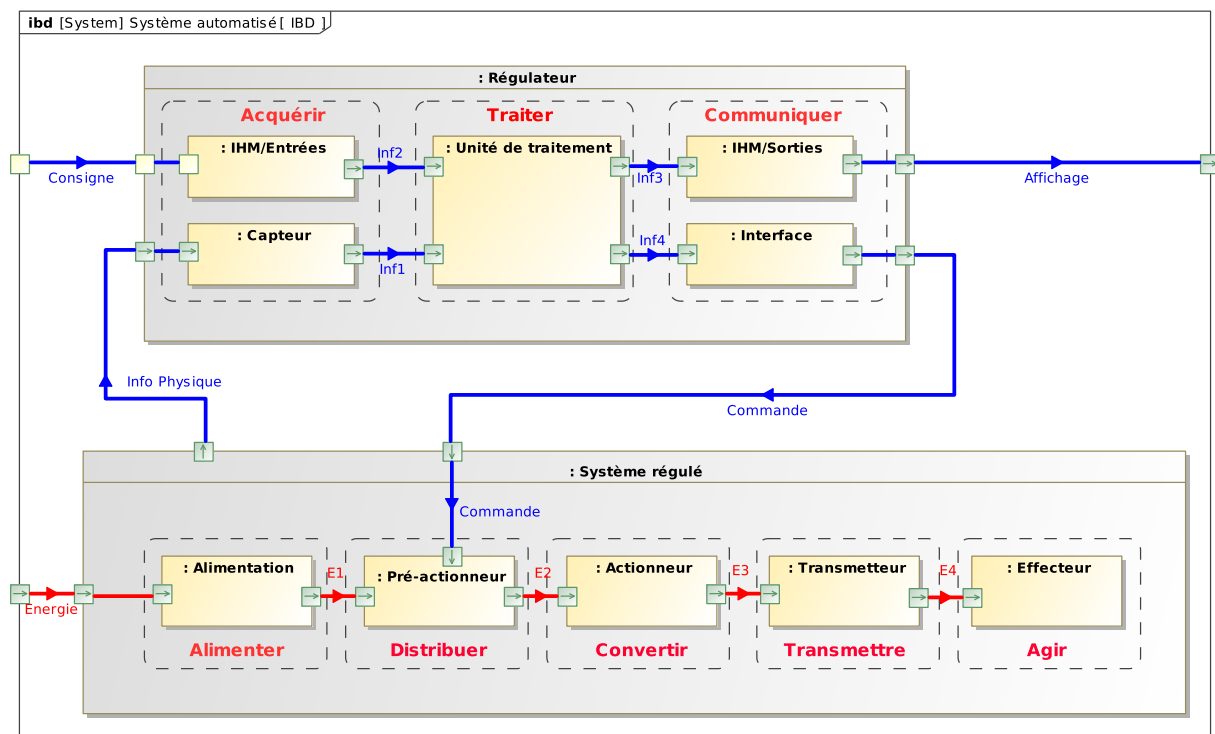


FIGURE 14 – Architecture fonctionnelle d'un système automatisé.

Remarque 4.1 (Architecture fonctionnelle)

L'architecture fonctionnelle décomposée en une chaîne d'énergie et une chaîne d'information permet de fournir une première grille de lecture pour analyser un système complexe. Elle ne peut pas être la solution pour décrire parfaitement tous les systèmes, mais elle doit être un outil permettant de faire un bilan des macro-fonctions qu'il est possible de réaliser. Chacune des fonctions peut être présente ou absente sur le système. Dans le cas où la fonction est présente, elle peut être assurée par un ou plusieurs composants.

La modélisation des interactions internes à un bloc est réalisée avec un diagramme de blocs interne (ibd). Chaque point d'interaction d'un bloc avec l'extérieur est appelé un **port**. Il en existe deux types :

- le port standard  hérité de l'UML et qui correspond à une interface d'entrée ou de sortie de commande, de contrôle ou de réglage ;
- le port de flux (*flow port*), qui peut être unidirectionnel  (entrée ou sortie) ou bidirectionnel  et qui correspond à une interface par laquelle transite de l'énergie, de la matière ou de l'information.

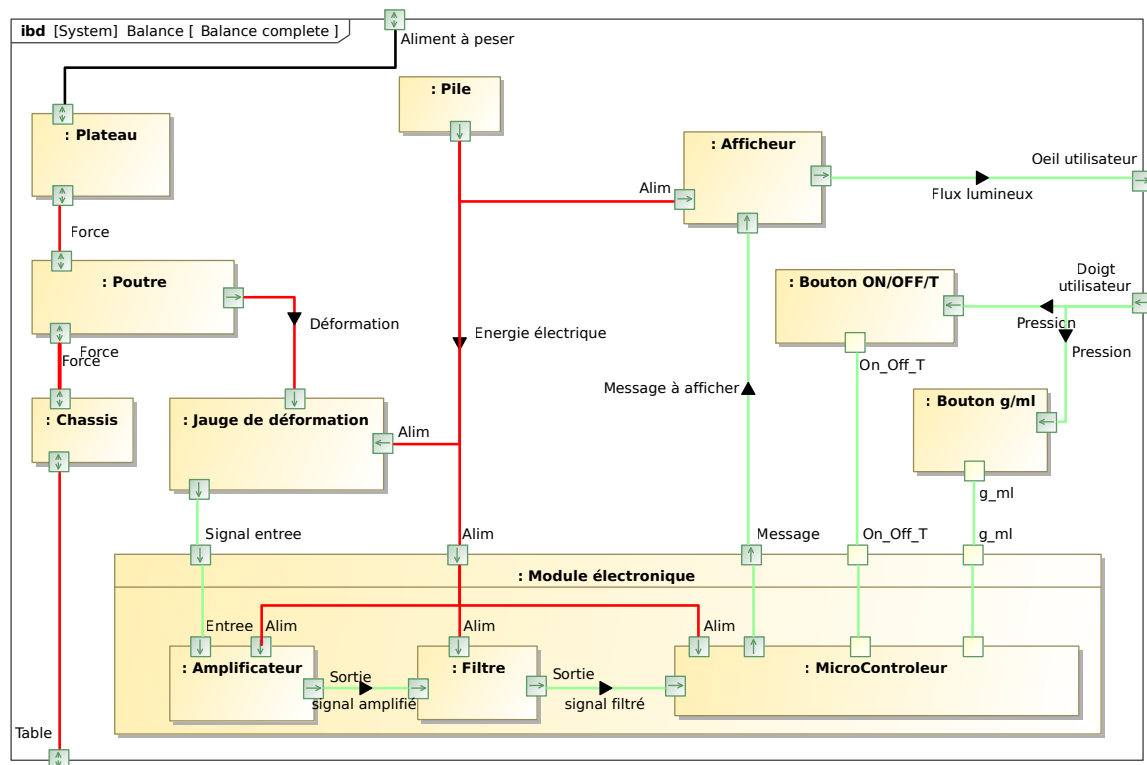
Les ports de différents blocs sont reliés par des **connecteurs** sur lesquels doivent être précisés la nature et le sens (si unidirectionnel) des flux échangés.

Remarque 4.2 (Représentation des flux)

Le langage SysML étant graphique, il est important d'allouer une couleur pour chaque type de flux. L'usage que nous avons au lycée est de représenter les flux d'**énergie** en rouge, les flux de **matière** en noir et les flux d'**information** en vert ou bleu.

Exemple 4.2 (Balance Halo)

Exemple de diagramme de blocs internes montrant les échanges d'énergie (en rouge), de matière (en noir) et d'information (en vert) entre les composants de la balance Halo.



Sur ce diagramme, on peut voir exactement les mêmes blocs que sur le diagramme de définition des blocs à la différence que cette fois ils sont placés dans leur bloc conteneur (cas de l'amplificateur, du filtre et du micro-contrôleur du module électronique). On distingue très clairement le flux d'énergie électrique qui va de la pile aux différents

constituants, le flux de la pesée, initialement sous forme de matière avec la dépose des aliments sur le plateau et qui se transforme en énergie de déformation de la poutre qui étire (comprime) les jauges de déformation. Cette déformation génère un signal électrique de faible amplitude (quelques mV) qu'il est nécessaire d'amplifier puis de filtrer afin d'avoir un signal électrique exploitable par le micro-contrôleur. Ce dernier, à partir des informations issues des boutons et du signal filtré, génère un message affiché par l'afficheur.

On notera avant de poursuivre que les échanges internes au module électronique auraient pu être « externalisés » dans un ibd propre, faisant alors disparaître de ce diagramme l'amplificateur, le filtre et le micro-contrôleur.

Remarque 4.3 (Flux d'énergie, puissance)

Les flux d'énergie se traduisent sous la forme d'une puissance (en Watt [W]), définie comme le produit d'une grandeur de type **effort** et d'une grandeur de type **flux**.

Domaine	Effort	Flux
Électrotechnique	Tension U en V	Courant I en A
Mécanique de translation	Force F en N	Vitesse V en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Mécanique de rotation	Couple C en $\text{N}\cdot\text{m}$	Vitesse de rotation ω en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
Hydraulique – Pneumatique	Pression P en Pa	Débit Q en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Thermique	Température T en K	Flux d'entropie Q en $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$

Références

- [1] CTI, *Références et orientations, tome 1, Version 2012-2015*.

La CTI (Commission des Titres d'Ingénieur) est un organisme indépendant, chargé par la loi française depuis 1934 d'habilitier toutes les formations d'ingénieur, de développer la qualité des formations, de promouvoir le titre et le métier d'ingénieur en France et à l'étranger. Plus d'informations : <http://www.cti-commission.fr/>

- [2] AFIS - Association Française d'Ingénierie Système.

Plus d'informations : <http://www.afis.fr/>

Compétences visées

La démarche d'ingénierie système est au cœur des activités de sciences industrielles de l'ingénieur. À l'issue de la séquence d'introduction à l'ingénierie système, vous devrez être capable d'analyser tout ou partie d'un système selon un point de vue structurel ou fonctionnel et notamment :

- situer un système dans son domaine d'activité et identifier le besoin qu'il satisfait (raison d'être) ;
- identifier sa fonction globale et ses caractéristiques ;
- analyser et savoir interpréter son contexte et ses cas d'utilisation ;
- décrire et modéliser son architecture logique ;
- décrire son architecture fonctionnelle incluant les flux d'énergie, de matière ou d'information ;
- identifier des performances parmi les exigences et savoir leur associer les composants qui permettent de les satisfaire ;
- analyser, interpréter ou compléter un diagramme SysML.

Remarque 4.4 (Modélisation du comportement des systèmes)

L'objectif des sciences de l'ingénieur est de mettre en place des démarches d'analyse et de conception des systèmes complexes. Ces démarches nécessitent de modéliser le comportement des composants du système et de leurs interactions. Seulement la modélisation du comportement des systèmes nécessite des outils et méthodes spécifiques qui ne peuvent être détaillés dans un cours d'introduction et qui feront l'objet de séquences dédiées tout au long de l'année.

* *
*