

Ce cours, dont l'objectif est de savoir interpréter les principaux **outils de description** de la (les) **fonction(s)**, la **structure** et le **comportement** d'un **système complexe pluri-technologique**, s'appuie le cœur artificiel CARMAT, conçu pour remplacer le cœur chez les patients atteints d'insuffisance cardiaque que ce soit dans l'attente d'une greffe ou de façon définitive.



Cœur artificiel CARMAT

QR code vers *mnsi.fr* :



Vidéo société CARMAT du cœur artificiel support de ce cours

1. Introduction à l'ingénierie système	2
1.1. Notion de système pluri-technologique	2
1.2. Cycle de vie en V et éco-conception	2
1.3. Les outils de modélisation système.....	3
2. Le point de vue Fonctionnel : de la définition du besoin à la définition des exigences	4
2.1. Le besoin	4
2.2. Cahier des charges fonctionnel	4
2.3. Modélisation du besoin et diagramme des cas d'utilisation (Use Case Diagram -uc-) ..	5
2.4. Modélisation des exigences et diagramme des exigences (Requirement Diagram -req-) ..	5
3. Le point de vue Structurel : définition des solutions techniques	7
3.1. Diagramme de définition de blocs	7
3.2. Diagramme de blocs interne	7
4. Notion de chaînes fonctionnelles	8
4.1. Principaux constituants de la chaîne de puissance	11
4.2. Principaux constituants de la chaîne d'information	12

1. Introduction à l'ingénierie système

L'**ingénierie système** est une **approche scientifique interdisciplinaire** qui permet d'appréhender la conception de systèmes complexes. Elle passe en partie par l'analyse de solutions antérieures afin de répondre à de nouvelles problématiques.

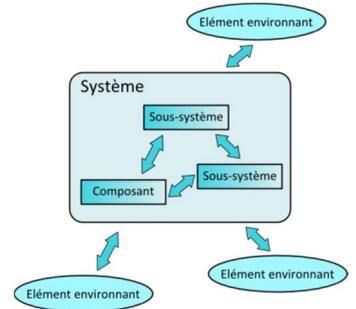
1.1. Notion de système pluri-technologique

Un **système** réalise une **fonction globale** dans le but de répondre à un **besoin** d'un client utilisateur.

Un **système** est une **association structurée d'éléments**, sous-systèmes ou composants, qui **interagissent** d'une manière **organisée** pour accomplir une finalité commune.

Ces éléments peuvent être nombreux et les interactions (**échanges** de **Matière (M)**, d'**Énergie (E)** ou d'**Information (I)**) de formes différentes : on parle alors de **système complexe pluri-technologique**.

Tout système s'insère également dans un **milieu environnant** constitué lui-même de plusieurs éléments. Le système doit s'adapter, apporter une **valeur ajoutée** et générer un minimum de perturbations.



Exemples de systèmes complexes pluri-technologiques :



Robot chirurgical DA VINCI



Smartphone - Tablette

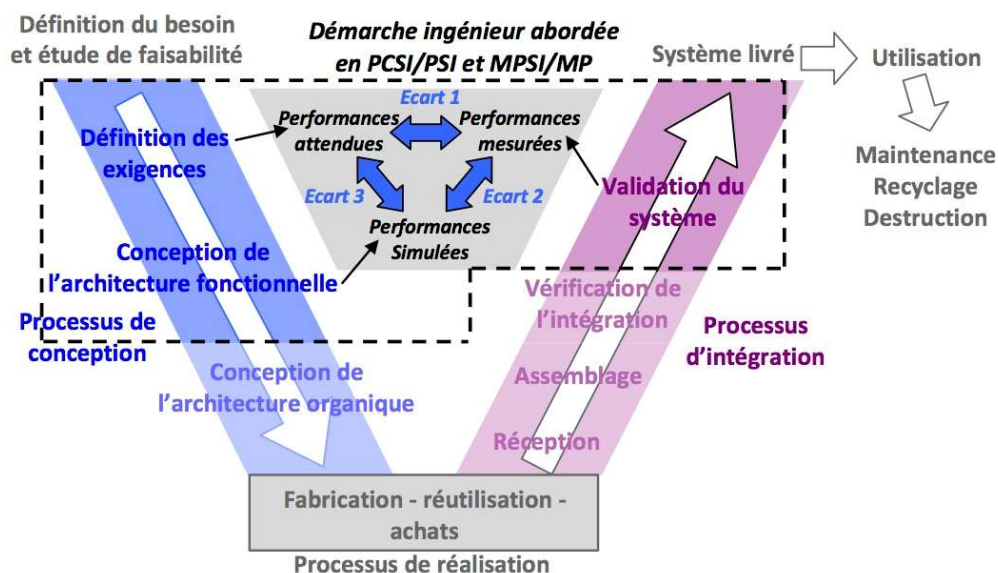


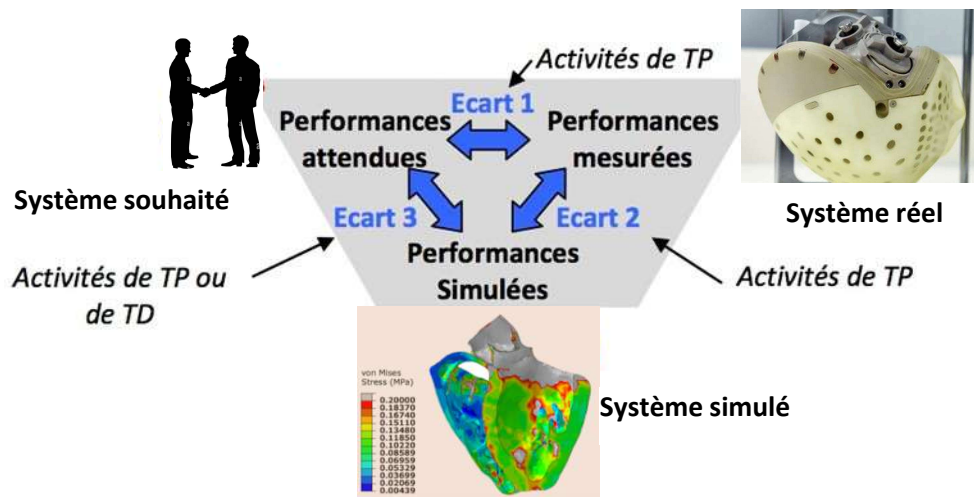
Falcon 7X

1.2. Cycle de vie en V et (éco-)conception d'un produit industriel

La notion de « **cycle de vie** » est indissociable d'un système. Elle recense les **différentes étapes** qui vont de l'identification du **besoin** à l'origine de sa conception jusqu'au **recyclage** de ses constituants.

Actuellement l'accent est mis sur la **minimisation** de l'**impact environnemental** à **chaque étape du cycle de vie**. Il s'agit d'**optimiser la consommation** d'énergies et de **matières premières** et de **minimiser les émissions nocives** pour l'environnement.





Cycle de vie simplifié et cycle en V simplifié d'un système complexe pluri-technologique et illustration des activités en CPGE inscrites dans la démarche ingénieur

1.3. Les outils de modélisation système

Le développement d'un système, tout au long de son cycle de vie, est un travail collaboratif. Cela signifie que chaque acteur doit être en permanence informé des évolutions initiées. Dans ce cadre, il est donc indispensable qu'ils utilisent des moyens communs :

- une maquette numérique (CAO pour Conception Assistée par Ordinateur) unique et partagée,
- un langage unique et compréhensible par tous les métiers et complétant les informations de la maquette CAO,
- des modélisations du système basées sur cette maquette et ce langage.

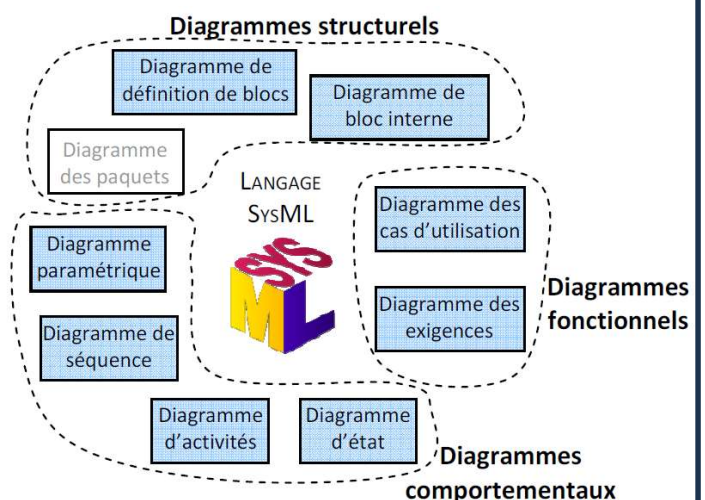
Une des solutions vers laquelle se tournent certaines entreprises est le langage SysML, pour Systems Modeling Language. Adapté à l'ingénierie système (IS), il provient d'outils adaptés à l'ingénierie informatique (UML).

Il a l'avantage de proposer différents **outils de description graphique**, des **diagrammes**, permettant de **décrire le système** dans les différentes phases du cycle, en complément de la maquette numérique.

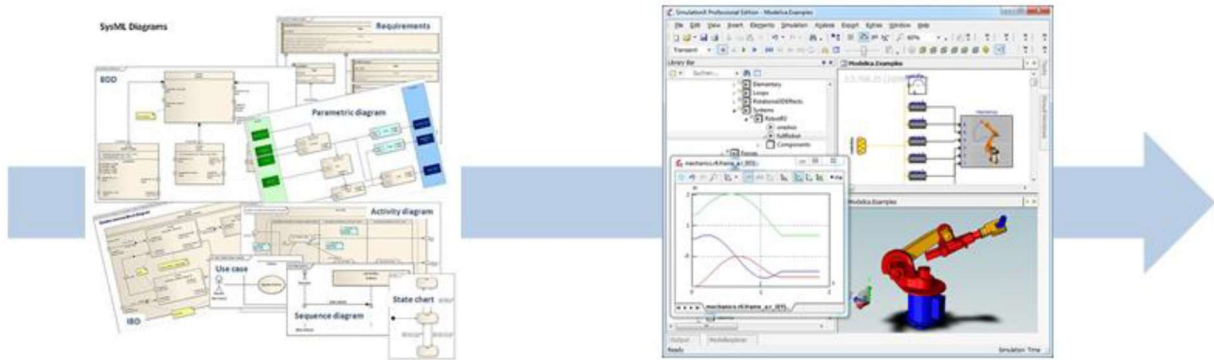
Les **diagrammes interagissent entre eux** grâce à des logiciels dédiés, ce qui permet de répercuter immédiatement toute modification à l'ensemble des acteurs concernés par le projet.

Les différents diagrammes SysML modélisant un système sont construits selon 3 points de vue :

- Le **point de vue fonctionnel** qui consiste à décrire les actions effectuées par le système pour répondre à la question « A quoi sert-il ? » ;
- Le **point de vue structurel** qui consiste à décrire les composants du système, son environnement ainsi que les relations entre ces composants pour répondre aux questions « De quoi est-il composé ? » et « Comment est-il organisé ? » ;
- Le **point de vue comportemental** qui consiste à modéliser le produit et son environnement au sein d'une théorie afin de répondre, par la simulation (multiphysique le plus souvent), à la question « Quelles sont ses performances ? ». (Ces diagrammes seront abordés ultérieurement dans l'année).



Maquettes et **diagrammes** sont complétés par des **logiciels de simulation**. Grâce à ces derniers, on peut ainsi anticiper la façon dont va se comporter un système avant même d'avoir réalisé un premier prototype.



Cette année, concernant ces outils de modélisation :

- vous utiliserez des modèles CAO sous Solidworks,
- vous devrez savoir lire des modèles représentés sous la forme de diagrammes SysML,
- vous réaliserez des simulations numériques dans l'environnement CAO afin d'évaluer des performances,
- vous réaliserez des simulations multi-physiques (sous Matlab/Simulink ou Scilab/Xcos) afin d'évaluer des performances.

2. Le point de vue Fonctionnel : de la définition du besoin à la définition des exigences

2.1. Le besoin

Le besoin correspond à la nécessité ou au désir éprouvé par l'utilisateur potentiel.

La définition du besoin est la première étape du projet industriel. C'est une phase qui justifie la création d'un système et qui permet de définir en termes d'exigences ce que le système devra faire pour répondre correctement au(x) besoin(s) exprimé(s) par les clients utilisateurs potentiels.

2.2. Cahier des charges fonctionnel

Tous les éléments définis lors de la définition du besoin sont regroupés dans un document contractuel de référence : **le Cahier des Charges Fonctionnel (CDCF)**. L'objectif de la mise en place d'un cahier des charges fonctionnel est double :

- avant la conception du système, il permet au client donneur d'ordres, de fixer les objectifs à atteindre (performances, fiabilité, esthétique...) en rapport avec l'utilisation prévue,
- tout au long du cycle en V, il permet au client donneur d'ordres et aux acteurs travaillant sur le projet de vérifier que le système conçu est conforme au(x) besoin(s) exprimé(s).

Exemple de Cahier des charges simplifié pour la prothèse CARMAT :

Id.	Exigence	Critère	Niveau	Flexibilité
1.2	Respecter les normes sur les implants chirurgicaux	Norme NF EN ISO 14708	Respect total	Aucune
1.3.3	La prothèse doit se rapprocher de la masse d'un cœur naturel	Masse	900 g	max
1.5	Le système doit être autonome et rechargeable.	Durée d'autonomie	10 h	10 %

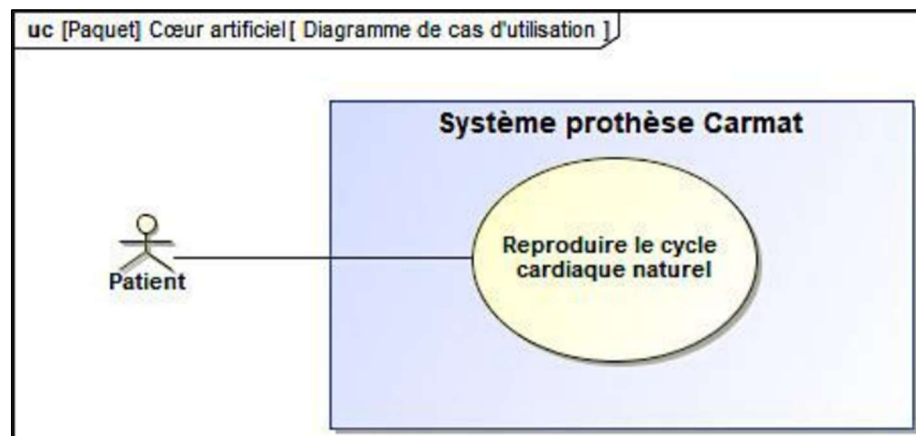
Cette partie fondamentale décrit et définit les différentes **fonctions de service** du système ainsi que les contraintes et les **critères** d'appréciation qui y sont associés. Il doit aussi apparaître, associées à ces critères, des spécifications permettant de fixer le **niveau d'exigence requis**, correspondant le plus souvent à une grandeur mesurable. Dans la mesure du possible, il est conseillé d'ajouter une indication de la **flexibilité** pour les niveaux d'exigence : soit sous une forme symbolique (ex : impératif, négociable,...) soit sous une forme numérique (ex : $\pm 0,5^\circ$). **Ces flexibilités permettent à l'ingénieur de créer un système moins contraint donc moins cher.**

2.3. Modélisation du besoin et diagramme des cas d'utilisation (Use Case Diagram -uc-)

Le besoin se modélise par la fonction globale du système. Elle répond à la question « dans quel but ? » et est exprimée sous la forme d'un verbe à l'infinitif suivi d'un complément, c'est une action exprimée en termes de finalité.

Le diagramme SysML des **cas d'utilisation** (**Use Case Diagramme –uc-**) permet d'exprimer la **fonction globale** d'un système. Il permet aussi d'exprimer les **services attendus** par différents types d'utilisateurs, nommés **acteurs**. Par défaut, il exprime l'**attente de l'acteur utilisateur**.

Exemple de diagramme de cas d'utilisation pour décrire la fonction globale de la prothèse CARMAT :



Les objectifs principaux des diagrammes de cas d'utilisation sont :

- de définir tous les cas d'utilisation découlant de la **fonction globale** afin d'identifier toutes les actions réalisables en utilisant le système,
- d'identifier toutes les **interactions avec les acteurs extérieurs** au système qui réalisent et/ou subissent ces actions.

2.4. Modélisation des exigences et diagramme des exigences (Requirement Diagram -req-)

L'ensemble des exigences liées aux besoins de l'utilisateur ou aux contraintes des éléments du milieu extérieur peut être regroupé dans le diagramme des exigences (Requirement Diagram – req –).

C'est un diagramme fonctionnel. Il décrit les exigences du cahier des charges.

Une **exigence** exprime une **capacité** ou une **contrainte à satisfaire par le système**. Elle peut exprimer une fonction que devra réaliser le système ou une condition de performance technique, physique, de sécurité, de fiabilité, d'ergonomie, d'esthétisme... Chaque exigence peut être exprimée par une phrase qui contient : « **le système doit...** ».

Lecture :

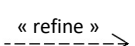
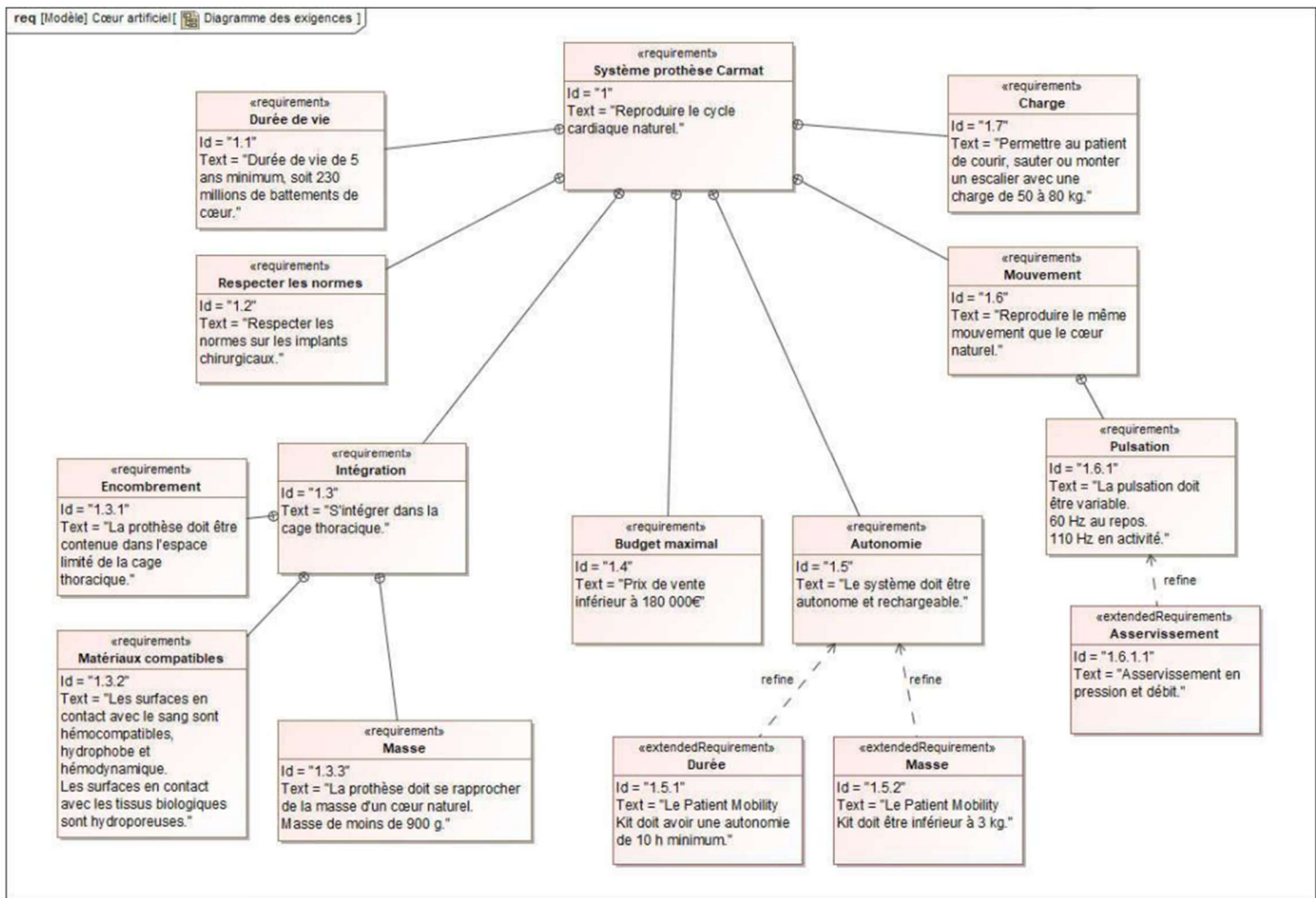
-  **Contenance** : exemple : la sous-exigence 1.1 est « contenue » dans l'exigence 1.
-  **Raffinement** : ajout de précisions, par exemple de données quantitatives.

Diagramme des exigences partiel pour la prothèse CARMAT :



Lecture :

- **Contenance** : exemple : la sous-exigence 1.1 est « contenue » dans l'exigence 1.
- « refine » **Raffinement** : ajout de précisions, par exemple de données quantitatives.

3. Le point de vue Structurel : définition des solutions techniques

Une fois les exigences et les cas d'utilisation définis, l'entreprise conçoit une solution. Cette solution correspond généralement à une combinaison de reconduction de l'existant pour les fonctions que l'entreprise sait déjà bien réaliser et d'innovations pour toutes les fonctions innovantes.

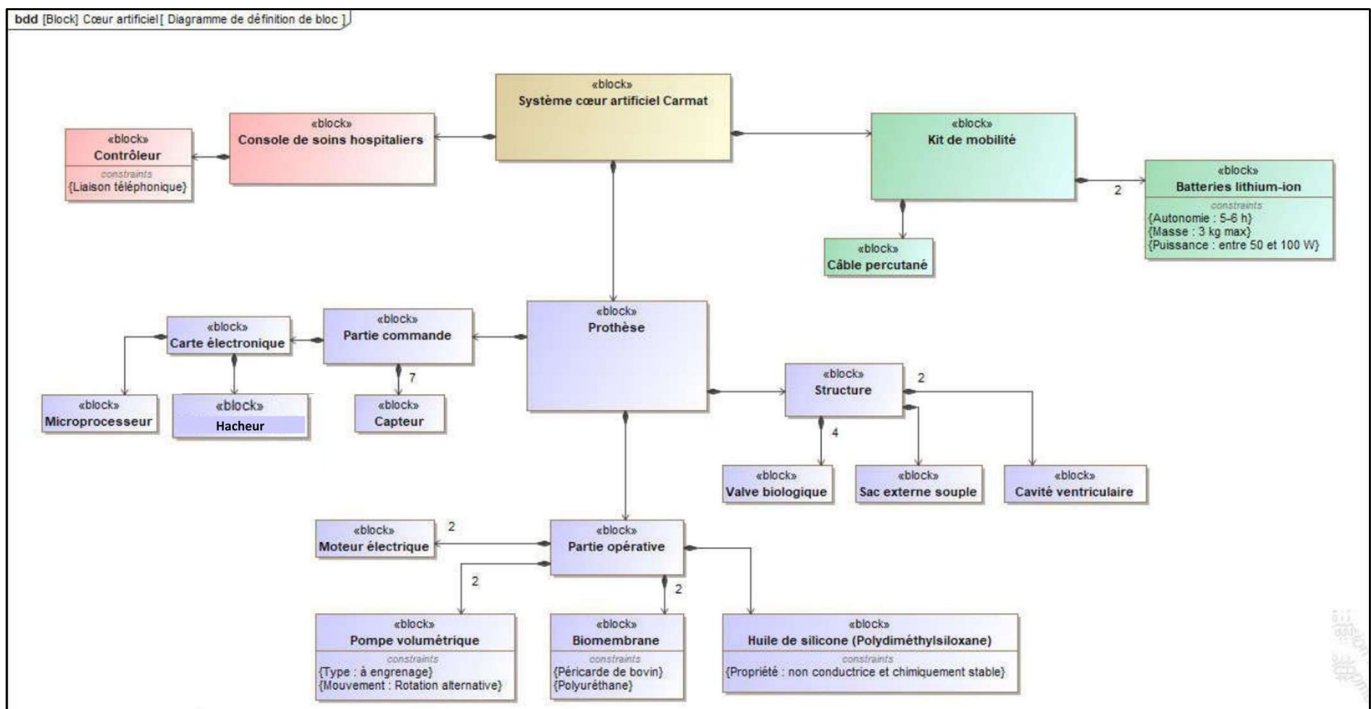
Il existe à ce stade deux diagrammes SysML qui permettent de formaliser les solutions techniques retenues : ce sont le diagramme de définition de blocs (Block Definition Diagram – bdd –) et le diagramme de blocs interne (Internal Block Diagram – ibd –).

Le diagramme de définition de blocs est utilisé pour définir les éléments structurels de base du système alors que le diagramme de blocs interne est utilisé pour définir les liens structurels qui existent entre les différents blocs.

3.1. Diagramme de définition de blocs (Block Definition Diagram – bdd –)

Le diagramme Sysml de **définition de blocs (Block definition diagram – bdd)** modélise l'architecture structurelle (composé, composant) du système en répondant à la question « **qui contient quoi ?** ».

Exemple de bdd pour la prothèse CARMAT :



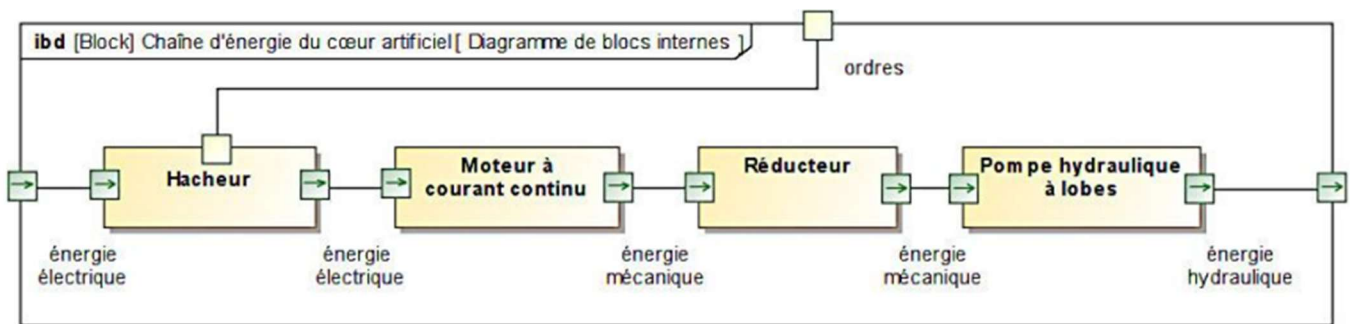
Il permet de visualiser en un clin d'œil la structure du système en représentant les liens entre les blocs de niveau différent par une composition (trait comportant un losange du côté du contenant).

3.2. Diagramme de blocs interne (Internal Blocks Diagram – ibd –)

Le diagramme Sysml de **blocs interne (Internal blocks diagram – ibd)** représente la manière dont interagissent les blocs, par leurs connections et leurs flux d'échanges : **Matière, Énergie, Information (MEI)**.

Il introduit la notion fondamentale de **port** qui correspond à un point d'interaction avec l'extérieur du bloc. On distingue principalement 2 types de ports :

Exemple d'ibd partiel pour la prothèse CARMAT :



Le diagramme de blocs internes est un digramme structurel qui permet d'identifier les échanges de matière, d'énergie et d'information (MEI) entre les constituants :

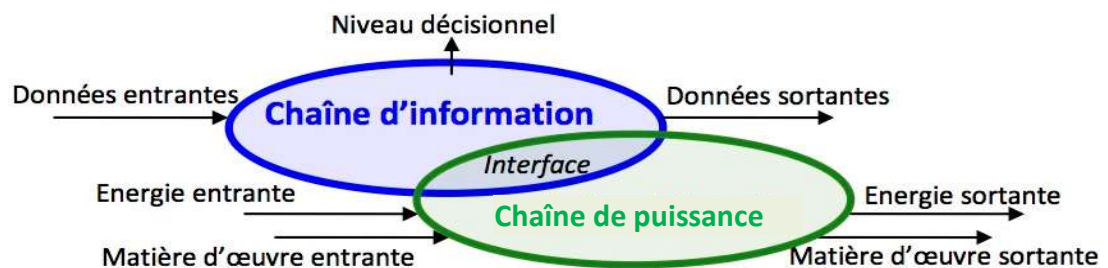


ports modélisant les flux MEI (hors informations logiques) ;

ports modélisant des services (informations logiques).

4. Notion de chaînes fonctionnelles

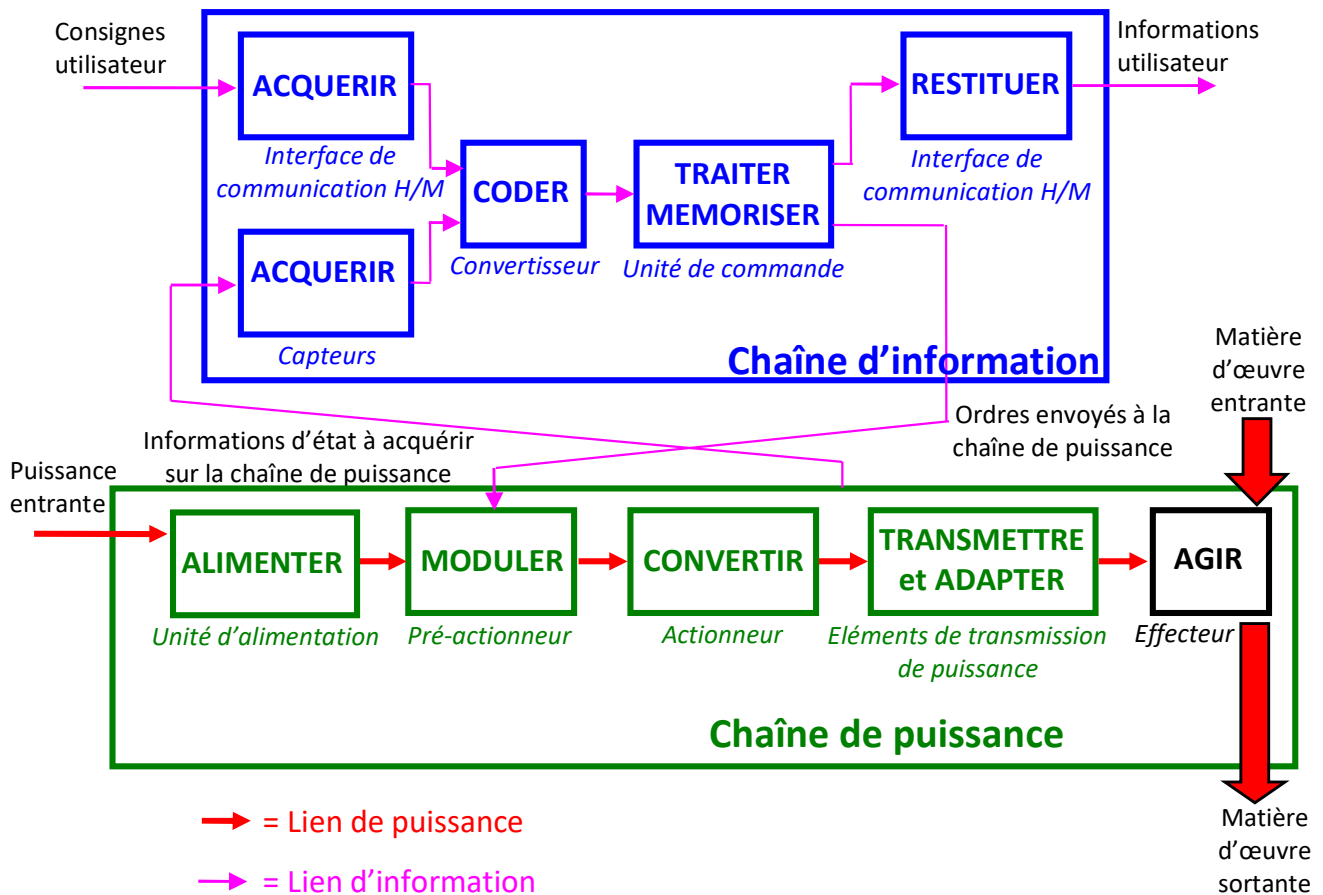
L'ensemble des constituants peut être représenté sur un schéma représentant deux chaînes. L'une s'intéresse et agit sur le flux de données, c'est la **chaîne d'information**, l'autre s'intéresse et agit sur les flux de matière et d'énergie, c'est la **chaîne de puissance** (parfois appelée chaîne d'énergie).



Le modèle **chaîne de puissance** / **chaîne d'information** est très performant pour décrire la structure des systèmes peu complexes car, quelque-soit le système étudié, il permet un cadre structuré et systématique pour l'analyse et la description.

Il reste toutefois limité pour les systèmes très complexes car il ne permet pas notamment de décrire le système en utilisant des niveaux de raffinement différents. Le diagramme structurel SysML qui permet de réaliser cela est le diagramme de blocs interne (Internal Bloc Diagram – ibd –).

Chacune des deux chaînes peut être décomposée en un certain nombre de fonctions élémentaires :



Remarques :

- La **chaîne d'information** acquiert des informations en provenance de l'extérieur et de la chaîne de puissance (données de vitesse, d'effort, de température,... de ses différents constituants) et des consignes qui feront varier l'ordre envoyé à la chaîne de puissance (notion d'asservissement qui sera vue au cycle 2).
- La **chaîne de puissance** réalise la modification d'une **matière d'œuvre** par l'intermédiaire d'un **effecteur**.
- Un **pré-actionneur** est le composant recevant l'**ordre** de l'**unité de commande**.
- Chaque composant de la chaîne fonctionnelle est associé à une **fonction** et à une **famille de composants**.

On pourra aussi distinguer les différents types de **puissances transmises** dans la chaîne de puissance : électrique, mécanique de rotation, mécanique de translation, électromagnétique, thermique...

Une puissance [Watt : W] est une grandeur scalaire, produit de deux grandeurs variables :

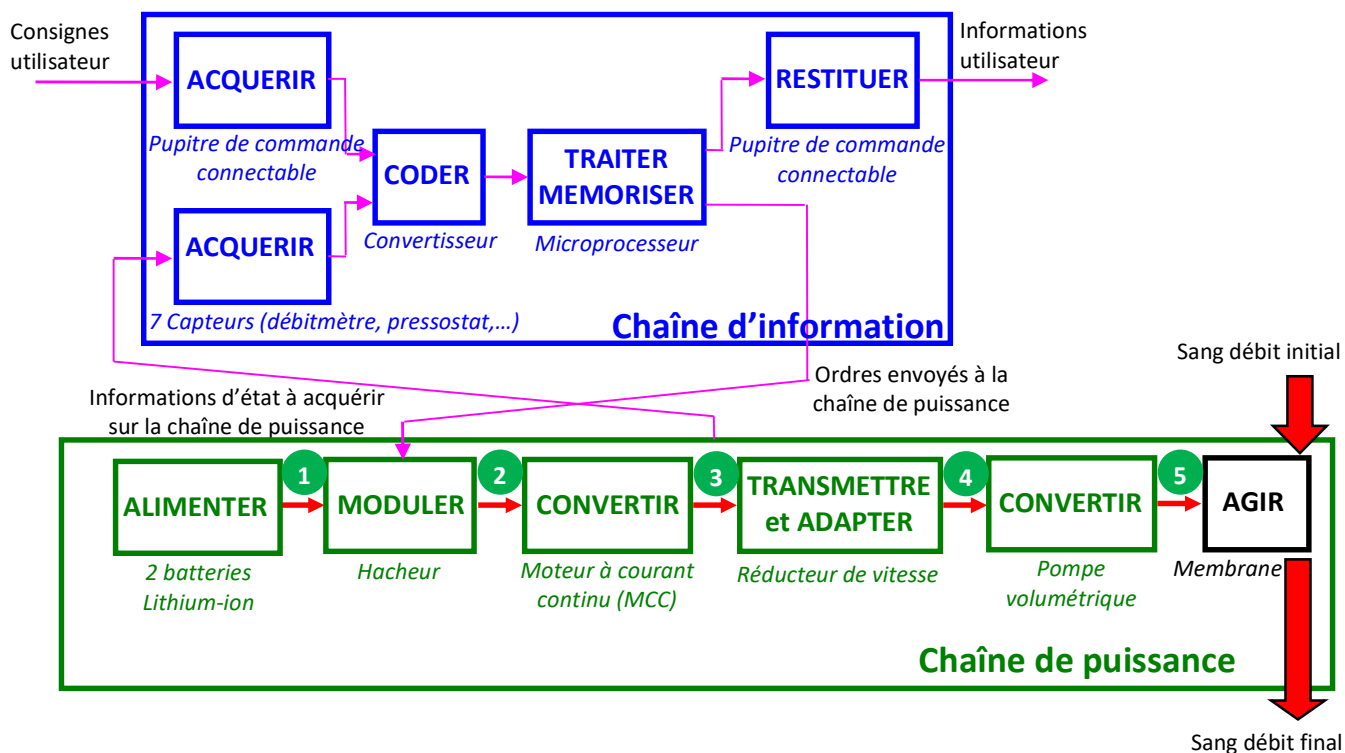
- l'une d'entre elles est appelée « **flux** » et est notée **f(t)**
- l'autre est appelée « **effort** » et est notée **e(t)**

La puissance est alors le produit de la grandeur de flux et de la grandeur d'effort.

	Puissance électrique	Puissance mécanique de rotation	Puissance mécanique de translation
Grandeur de flux	Courant $i(t)$ [A]	Vitesse de rotation $\omega(t)$ [rad.s ⁻¹]	Vitesse de translation $v(t)$ [m.s ⁻¹]
Grandeur d'effort	Tension $U(t)$ [V]	Couple $C(t)$ [Nm]	Force $F(t)$ [N]

- Les chaînes de puissance et d'information regroupent un **ensemble de constituants organisés** en vue de la réalisation **d'une seule activité** du système. Ainsi, dans un système complexe, on peut recenser un nombre important de chaînes de puissance et d'information

Exemple de chaîne fonctionnelle pour la prothèse CARMAT :



1

.....

2

.....

3

.....

4

.....

5

.....

4.1. Principaux constituants de la chaîne de puissance

Unité d'alimentation	Fonction : ALIMENTER			
	Alimenter le pré-actionneur en énergie utile			
	 Transformateur	 Régulateur pneumatique	 Batterie	
Pré-actionneur	Fonction : MODULER			
	Moduler et distribuer l'énergie utile à l'actionneur, sur ordre de l'unité centrale.			
	 Contacteur	 Variateur de vitesse	 Carte de puissance (hacheur)	 Distributeur pneumatique
Actionneur	Fonction : CONVERTIR			
	Convertir l'énergie distribuée en énergie mécanique de rotation ou de translation.			
	 Moteur à courant continu	 Moteur asynchrone	 Vérin pneumatique	
Transmetteur – Adaptateur	Fonction : TRANSMETTRE et ADAPTER			
	Adapter l'énergie mécanique délivrée par l'actionneur, pour l'effecteur.			
	Sans transformation de mouvement		Avec transformation de mouvement	
	 Engrenage	 Poulies-courroie	 Vis-écrou à billes	 Pignon crémaillère
Effecteur	Fonction : AGIR			
	Agir sur la matière d'œuvre et lui apporter la valeur ajoutée.			
	 Pince de robot	 Ventouses de préhension en bout de vérin		

4.2. Principaux constituants de la chaîne d'information

Capteur	Fonction : ACQUÉRIR
	Acquérir une grandeur physique et en produire une image exploitable par l'unité centrale.
	    Capteur inductif Capteur magnétique (ILS) Capteur angulaire Génératrice tachymétrique
Unité centrale	Fonction : TRAITER et MÉMORISER
	Traiter les informations provenant des capteurs afin d'élaborer et d'émettre les ordres destinés aux pré-actionneurs.
	   Carte de commande Automate programmable Microcontrôleur
Interface de communication	Fonction : ACQUÉRIR ou RESTITUER
	Permettre au système de communiquer avec l'extérieur.
	    Ecran tactile Interface E/S bus Carte réseau Emetteur/récepteur Wifi - Bluetooth