



OBJECTIF

Analyser le fonctionnement d'un système pluritechnologique en mettant en relation ses composants, ses fonctions, ainsi que les flux d'énergie et d'information.



COMPÉTENCES

- A1-01** Décrire le besoin et les exigences.
- A1-02** Traduire un besoin fonctionnel en exigences.
- A1-03** Définir les domaines d'application et les critères technico-économiques et environnementaux.
- A1-04** Qualifier et quantifier les exigences.
- A1-05** Évaluer l'impact environnemental et sociétal.

- A2-02** Définir les éléments influents du milieu extérieur.
- A2-03** Identifier la nature des flux échangés traversant la frontière d'étude.

- A3-01** Associer les fonctions aux constituants.
- A3-02** Justifier le choix des constituants dédiés aux fonctions d'un système.
- A3-03** Identifier et décrire les chaînes fonctionnelles du système.
- A3-04** Identifier et décrire les liens entre les chaînes fonctionnelles.



SAVOIRS

- Savoir reconnaître, lire, compléter et interpréter les diagrammes SysML suivants : diagramme des cas d'utilisation, des exigences, de définition des blocs, de blocs internes, de séquence. ;
- Savoir lire un cahier des charges (critère, niveau, flexibilité)
- Savoir identifier la fonction globale, matière d'œuvre et valeur ajoutée d'un système.
- Impact environnemental et analyse du cycle de vie.
- Savoir identifier la frontière de l'étude. Milieu extérieur.
- Savoir identifier et distinguer les flux de matière, d'énergie et d'information d'un système.
- Savoir décrire l'architecture d'un système à partir d'une documentation.
- Savoir réaliser/compléter les chaînes fonctionnelles d'un système :
 - **Chaîne d'information** : acquérir, traiter, communiquer ;
 - **Chaîne de puissance** : alimenter, moduler, convertir, transmettre, agir ;

1 Notion de système

1.1 Définition

Un système est une association d'éléments interagissant entre eux de façon définie pour répondre à un objectif ou un à un besoin précis.

Un système est caractérisé par :

- La nature de ses éléments constitutifs (sous-systèmes ou composants)
- Les interactions entre ces derniers (échange de matière, d'énergie ou d'information)

Les éléments constituant un système peuvent être nombreux et les interactions de formes différentes. On parle alors de système complexe. Le comportement global d'un système complexe n'est donc pas prévisible à partir des comportements élémentaires de chaque composant.

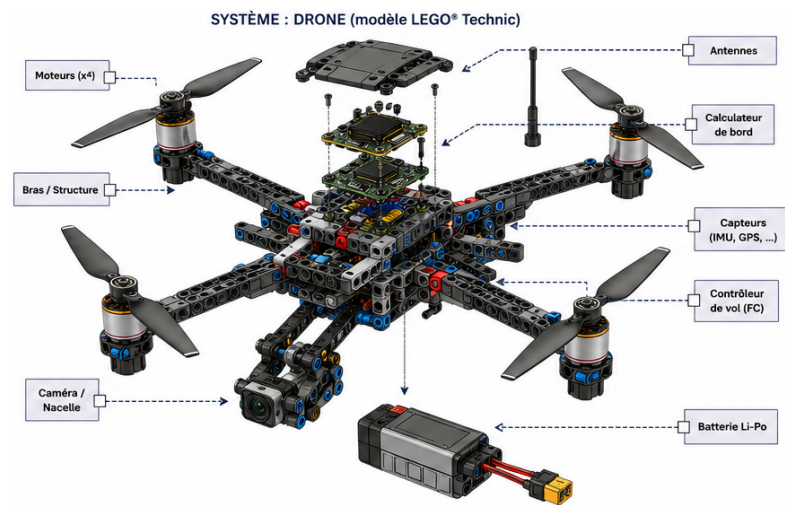


FIGURE 1 – Lego : Ensemble de pièces assemblées créant un système, ici un drone

1.2 Classification et domaine d'application

Les systèmes peuvent être classés en deux grandes catégories :

- les systèmes naturels ;
- les systèmes artificiels, créés par l'Homme pour répondre à un besoin, parmi lesquels on trouve les systèmes manuels, mécanisés et automatisés.

Critère	Système manuel	Système mécanisé	Système automatisé
Qui commande ?	L'opérateur réalise directement l'action.	L'opérateur donne l'ordre et pilote directement le système.	L'opérateur donne une consigne ; la partie commande élabore les ordres.
Réalisation de l'action	L'opérateur fournit lui-même l'effort.	Un actionneur fournit l'effort à la place de l'opérateur.	Un actionneur , piloté automatiquement, réalise l'action.
Retour d'information	Aucun nécessaire.	Généralement absent.	Des capteurs peuvent mesurer l'état du système et permettre une régulation.
Rôle de l'opérateur	Agir	Commander et agir	Donner une consigne et surveiller
Exemples	Vélo, tournevis	Perceuse, moto, voiture	Imprimante 3D, voiture autonome, four et surveiller
Illustrations			

TABLE 1 – Comparaison entre systèmes manuel, mécanisé et automatisé.

Un système évolue dans un domaine d'application spécifique pour lequel il a été conçu : le transport, l'énergie, le BTP, la santé, la défense... Lorsque le système évolue dans son domaine, on parle de **système industriel**.



FIGURE 2 – Différents systèmes pour différents domaines d'application

1.3 Besoin, fonction globale et exigences

1.3.1 Le besoin

Le besoin est l'exigence fondamentale qui nécessite la création d'un produit. Lors du souhait de la création d'un système, trois questions se posent :

- À qui/quoi rend-il service ?
- Sur qui/quoi agit-il ?
- Pourquoi ?

1.3.2 Fonction globale d'un système

La fonction globale de tout système conçu par l'homme est d'apporter une valeur ajoutée (VA) à une matière d'œuvre (MO) dans un environnement ou contexte donné. La fonction réalisée par le système est donnée par un verbe à l'infinitif suivi d'un complément.

On appelle **matière d'œuvre** (MO) le produit, l'énergie ou l'information qui subit l'intervention du système, sur laquelle agit le système pour répondre au besoin exprimé.

On appelle **valeur ajoutée** (VA) la modification des caractéristiques de la matière d'œuvre après passage dans le système. Cette valeur ajoutée peut être un stockage, un déplacement ou une transformation.

Enfin, on appelle **frontière du système** une limite fictive, permettant d'isoler le système considéré du milieu extérieur, afin de définir les fonctions et propriétés internes de celui-ci et de caractériser les entrées et les sorties.

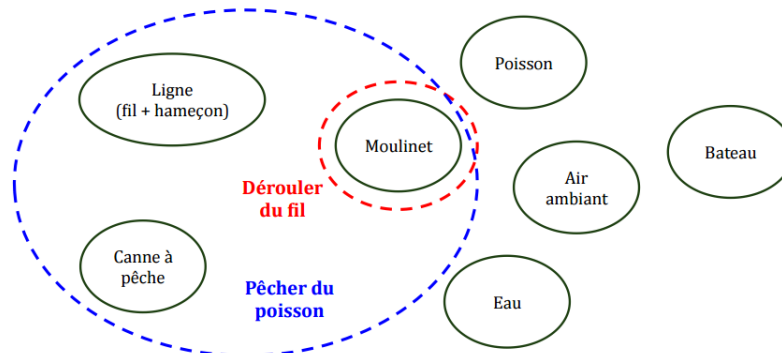


FIGURE 3 – Exemples de frontières d'étude différentes

1.3.3 Les exigences

De nombreux systèmes permettent de répondre au même besoin, sans pour autant valider les mêmes exigences.



FIGURE 4 – Un besoin commun, des exigences différentes

Une exigence exprime une propriété dont la satisfaction est jugée nécessaire. Elle peut prendre la forme d'une fonction, d'une aptitude, d'une caractéristique ou d'une limitation à laquelle doit satisfaire un système, un produit ou un processus.

Afin de quantifier le degré de satisfaction attendu du client, une exigence est caractérisée par :

- Un ou plusieurs **critères** (grandeur physique mesurable) ;
- Un **niveau** attendu (valeur exigée) pour chaque critère ;
- Une **flexibilité** (écart acceptable entre le niveau atteint et le niveau attendu).

1.3.4 Le cahier des charges fonctionnel

Le besoin du demandeur est formalisé dans un document contractuel de référence, le **cahier des charges fonctionnel**. Il regroupe l'ensemble des fonctions que le système doit réaliser, et permet de lister avec précision les attentes et les exigences du client.

	Fonction	Critère	Niveau	Flexibilité
FP1	Modifier la température d'une pièce	Température, temps, taille de la pièce	Doit chauffer une pièce de 20 m ² en 1 h	± 5 min
FC1	Ne pas provoquer de brûlure à l'utilisateur	Température	$< 65^\circ\text{C}$	$\pm 2^\circ$
FC2	Être alimenté en énergie	Tension	110 V	<i>Nulle</i>
		Puissance	1500 W	<i>Nulle</i>
FC3	Être esthétique	Forme	Forme arrondie	<i>Nulle</i>
		Couleur	Blanc	<i>Nulle</i>
		Taille	200 x 150 x 50 mm	<i>Max</i>

TABLE 2 – Extrait du cahier des charges d'un radiateur électrique

1.4 Processus de conception – notion de cycle en V

Le cycle en V est un modèle de gestion de projet qui est utilisé sur toutes les étapes d'un projet (conception, réalisation et validation). La démarche d'ingénieur s'appuie sur ce modèle.

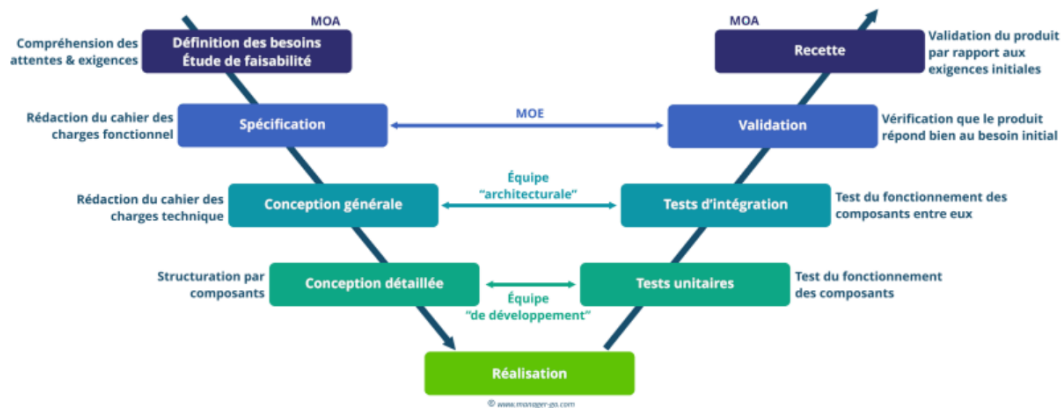


FIGURE 5 – Cycle en V

1.5 Cycle de vie d'un système et écoconception

Le cycle de vie d'un système prend en compte les différentes étapes de sa vie : de l'énergie et des matières premières nécessaires à sa construction, jusqu'à sa destruction et son recyclage. On retrouve notamment les étapes suivantes : conception, extraction des ressources, fabrication, transport, utilisation, fin de vie. Cependant, chaque étape du cycle de vie génère un impact sur l'environnement. Ainsi afin de limiter ces impacts environnementaux, il est nécessaire d'**éco-concevoir**, c'est-à-dire d'intégrer **l'environnement** dans les phases de conception ou d'amélioration d'un produit aux côtés des critères plus « classiques » comme le coût.

A service rendu ou à performances identiques, un produit éco-conçu est source de moins d'impacts sur l'environnement, tout au long de son cycle de vie, par rapport à d'autres produits standards d'usage similaire. L'écoconception est une démarche de conception multi-étape et multi-critère : elle prend en compte toutes les étapes du cycle de vie du produit, et se base sur différents critères pour caractériser son impact environnemental (empreinte carbone, énergie...).

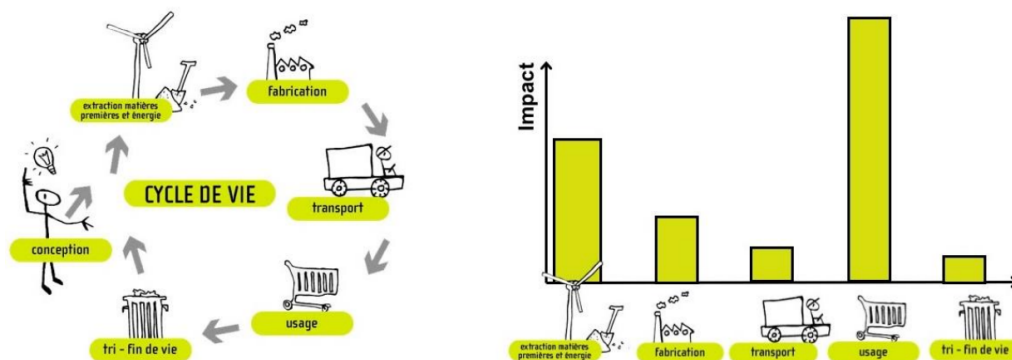


FIGURE 6 – Analyse du cycle de vie

Afin de quantifier l'impact environnemental d'un produit tout au long de son cycle de vie, on réalise une **analyse de son cycle de vie** (ACV). Cette dernière permet de réaliser un bilan détaillé et quantitatif des entrées et des sorties mesurées aux frontières du produit (flux de matière et d'énergie).

L'exemple ci-dessous montre l'impact environnemental de différents produits en fonction de leur phase de vie. Il a été réalisé en se basant sur des critères réfléchis par une équipe d'analystes. Les résultats pourraient être légèrement différents si l'on modifiait des paramètres (différents

moyens de transport, différents lieux d'extraction des matières premières etc...).

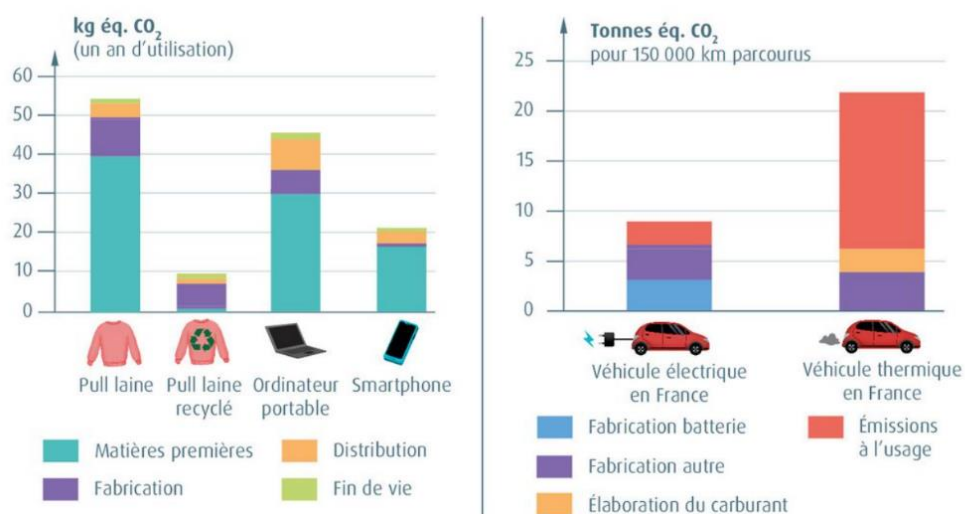


FIGURE 7 – Exemples d'analyses du cycle de vie de différents produits

2 Représentation et modélisation des systèmes

2.1 Le langage SysML

Le langage SysML est un langage de modélisation graphique. Il est utilisé en Ingénierie Système afin de décrire tout ou partie d'un système technique, d'un point de vue exigences, comportemental ou structurel :

- **Comportemental** : représentant la partie automatisme du système.
- **Exigences** : permettant ensuite la rédaction du cahier des charges fonctionnel.
- **Structurel** : représentant les éléments techniques qui composent le système.

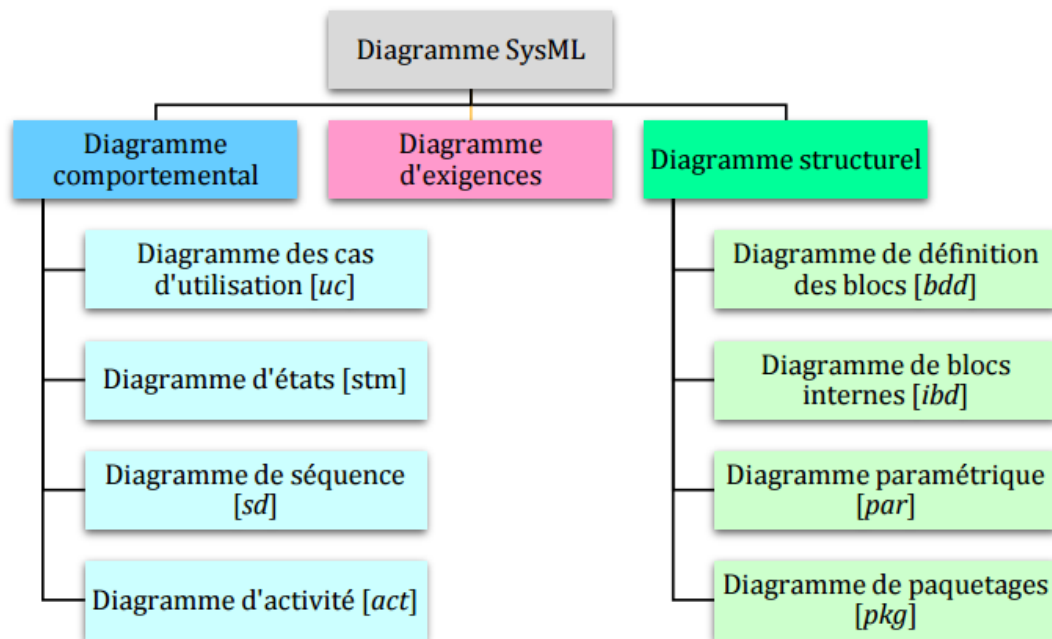


FIGURE 8 – L'outil SysML en 9 diagrammes

2.1.1 Diagramme des cas d'utilisation

Le diagramme des cas d'utilisation permet de représenter les fonctionnalités attendues du système dans leur contexte. Il répond à la question : « Quels services rend le système aux différents acteurs ».

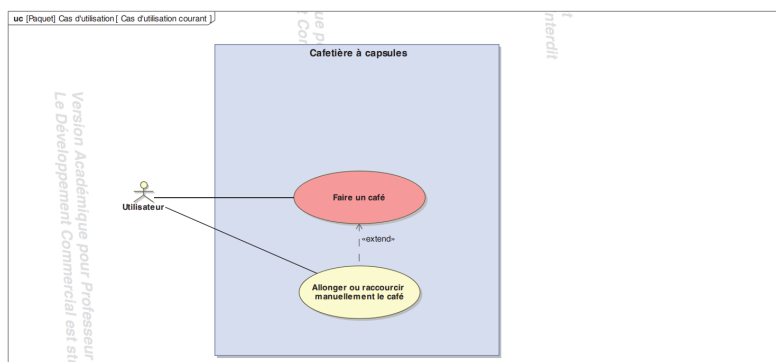


FIGURE 9 – Diagramme des cas d'utilisation – Cafetière à capsules

2.1.2 Diagramme des exigences

Le diagramme des exigences permet de représenter les capacités et les contraintes qui doivent être satisfaites par le système. Toutes les exigences du système y sont représentées, qu'elles soient fonctionnelles, légales, environnementales, techniques, énergétiques, de marketing ou encore financières.

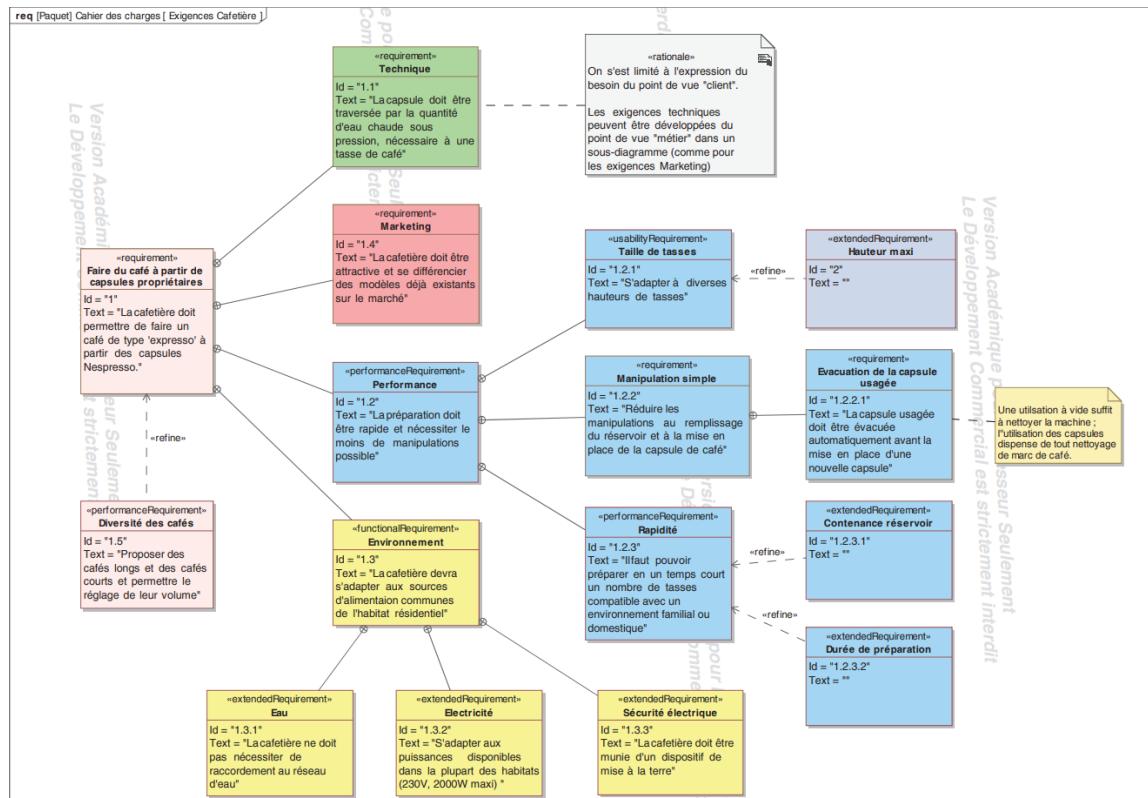


FIGURE 10 – Diagramme des exigences – Cafetière à capsules

Les exigences peuvent être reliées entre elles par différentes relations :

- Relation de **contenance** (ligne terminée par un cercle contenant une croix du côté du conteneur) : permet de décomposer une exigence composite en plusieurs exigences unitaires ;
- Relation de **raffinement** (« refine ») : ajout de précisions (données quantitatives...) ;
- Relation de **satisfaction** (« satisfy ») d'une exigence par un ou plusieurs éléments du modèle.

2.1.3 Diagramme de séquence

Le diagramme de séquence représente les interactions entre différents éléments d'un point de vue séquentiel, enchaînement et nature des échanges. Un diagramme de séquence est rattaché à un cas d'utilisation et décrit ce qui correspond à un scénario de fonctionnement possible.

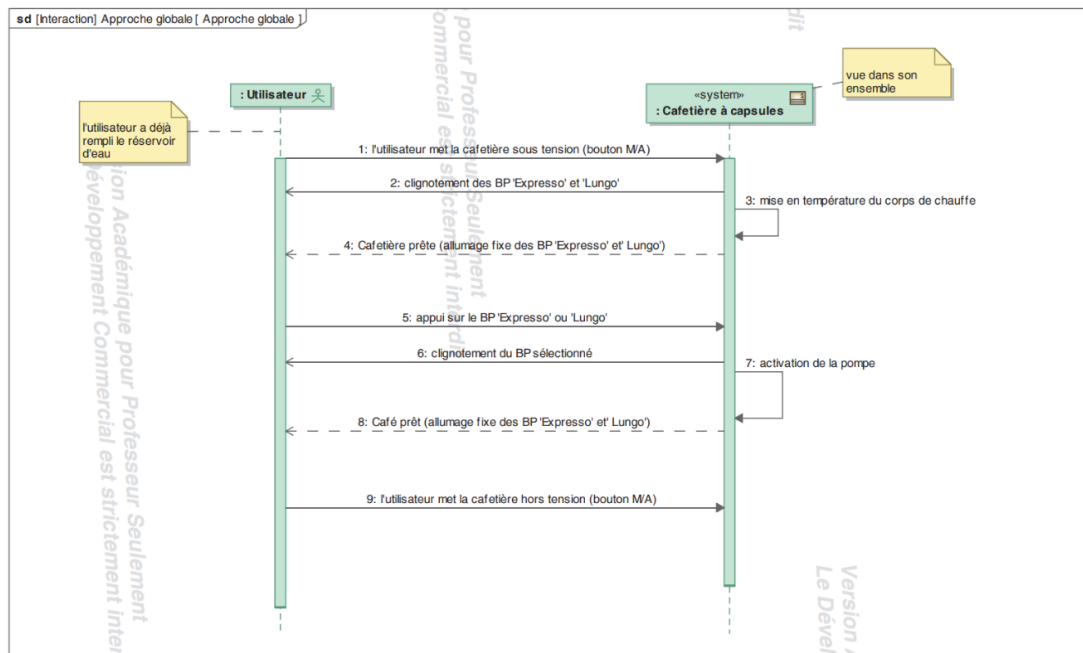


FIGURE 11 – Diagramme de séquence – Approche globale

2.1.4 Diagramme de définition de blocs

Le diagramme de définition de blocs permet de décrire la structure globale d'un système. Pour cela, on utilise des blocs qui représentent les éléments matériels ou logiciels du système. Ce diagramme représente les caractéristiques principales de chaque bloc ainsi que les liens entre eux.

Graphiquement, un bloc comprend un titre ainsi que des compartiments étagés regroupant des propriétés particulières :

- La propriété de type *value* permet d'exprimer une caractéristique quantifiable : pour un moteur par exemple, son couple, sa vitesse de rotation ou sa puissance nominale.
- La propriété de type *part* permet de représenter ce qui compose le bloc. Elle est équivalente à un lien de composition (simple trait).

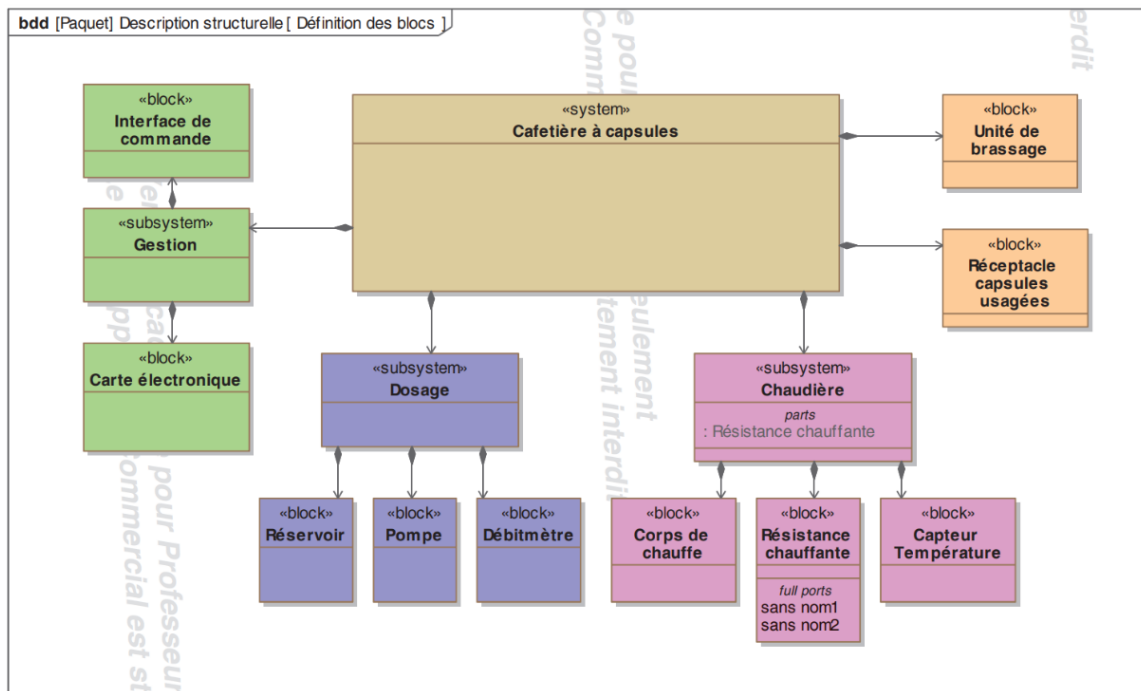


FIGURE 12 – Diagramme de définition de blocs – Cafetière à capsules

2.1.5 Diagramme de blocs internes

Le diagramme de blocs internes permet d'illustrer les échanges d'énergie-matière-information entre chaque bloc.

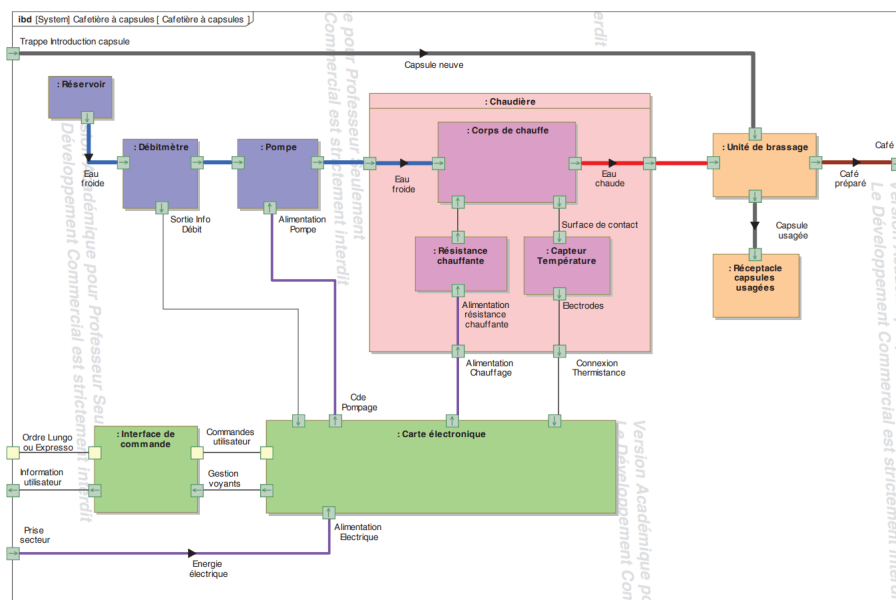


FIGURE 13 – Diagramme de blocs internes – Cafetière à capsules

2.2 Représentation des chaînes fonctionnelles

On peut modéliser un système automatisé par deux chaînes fonctionnelles :

- La **chaîne d'information**, regroupant les fonctions liées à l'acquisition, au traitement et à la transmission des informations au sein du système ;
- La **chaîne de puissance** (ou chaîne d'énergie), regroupant les fonctions liées à la gestion, à la conversion, à la transmission et à la distribution de la puissance au sein du système.

Remarque : La distinction entre ces deux chaînes est particulièrement importante lors de la conception d'un système. Les flux de puissance peuvent notamment mettre en jeu des niveaux de tension et de courant importants, tandis que les flux d'information sont généralement associés à des niveaux de puissance beaucoup plus faibles.

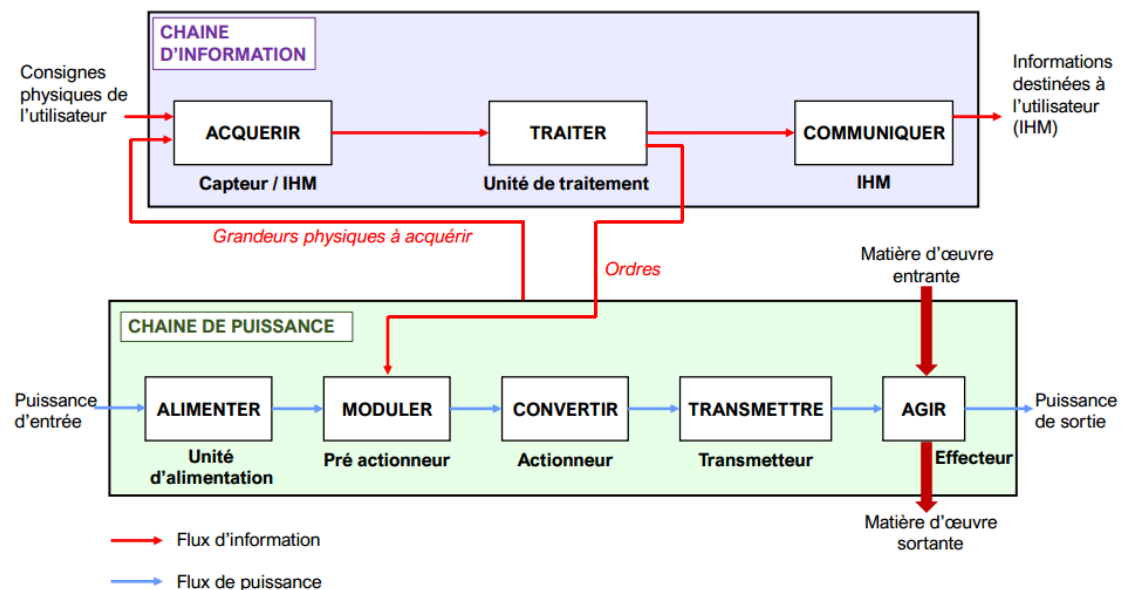


FIGURE 14 – Chaîne d'information - Chaîne de puissance

2.2.1 La chaîne d'information

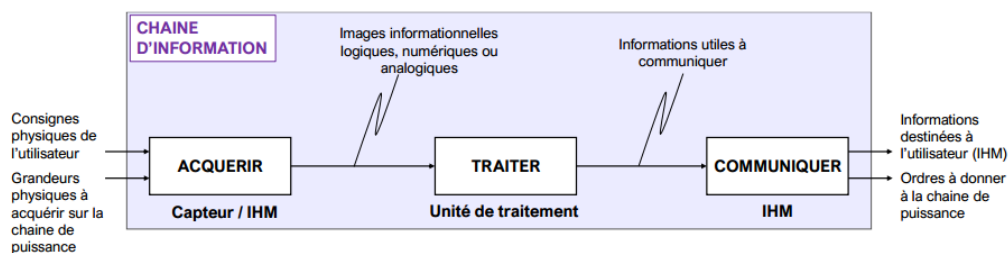


FIGURE 15 – Structure de la chaîne d'information

La chaîne d'information permet :

- **D'ACQUERIR** des informations ;
 - Sur l'état d'un produit ou de l'un des constituants de la chaîne de puissance ;
 - Issues d'interfaces Homme/Machine.

L'acquisition peut se faire grâce à des détecteurs TOR (Tout Ou Rien), des capteurs, un pupitre de commande etc...

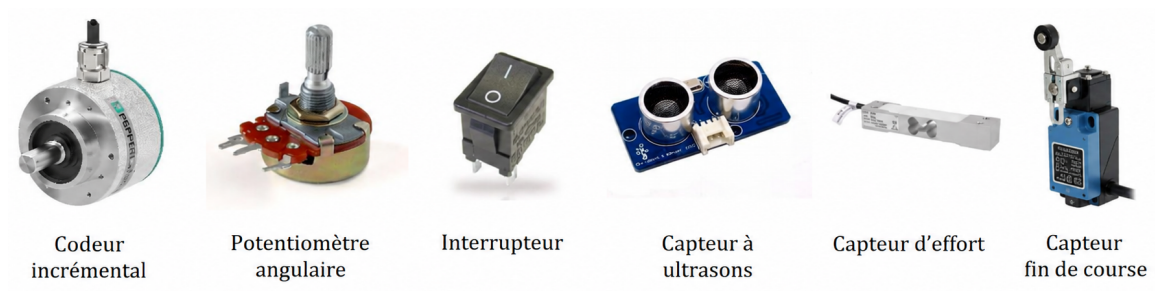


FIGURE 16 – Exemples de capteurs

- De **TRAITER** ces informations. Cette fonction est réalisée par une unité de traitement qui peut réaliser des opérations sur les signaux reçus. Elle fait appel à de la programmation et peut être réalisée par un microcontrôleur, un automate programmable, un microprocesseur, un circuit logique ou analogique etc. . .

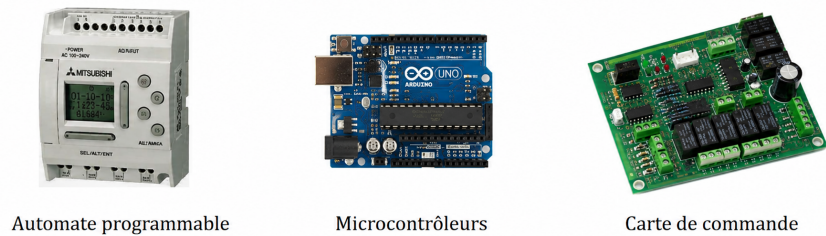


FIGURE 17 – Exemple d'unités de traitement

- De **COMMUNIQUER** :
 - Les ordres à la chaîne de puissance ;
 - Les messages destinés aux interfaces Homme/Machine ;
 - Les messages à d'autres chaînes d'information.

2.2.2 La chaîne de puissance (ou d'énergie)

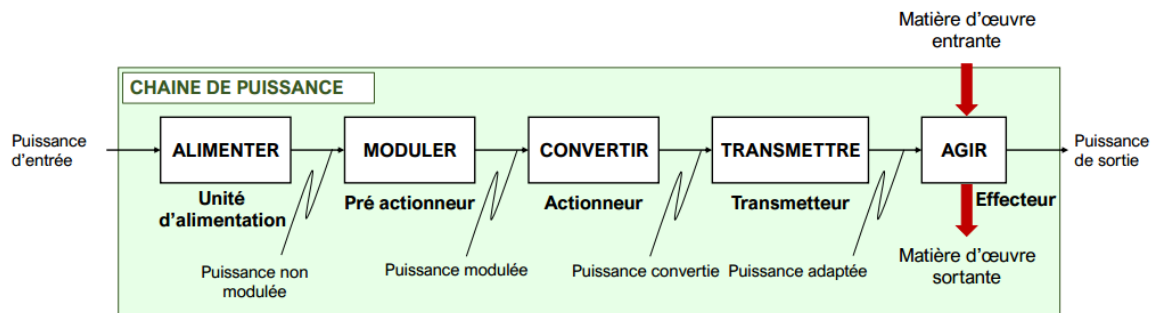


FIGURE 18 – Structure de la chaîne de puissance

La chaîne de puissance assure la réalisation d'une fonction de service dont les caractéristiques sont spécifiées dans le cahier des charges. C'est elle qui agit en fonction des ordres donnés par la chaîne d'information.

La chaîne de puissance permet de :

- D'**ALIMENTER** les pré-actionneurs. Cette fonction peut être assurée par une batterie, un transformateur, un réservoir...
- De **MODULER** la puissance transmise à l'actionneur. Cette fonction est réalisée par un pré-actionneur, qui permet de distribuer et de moduler l'énergie de fonctionnement de l'actionneur **à partir d'un ordre en provenance de la chaîne d'information** (fonction « Traiter »).

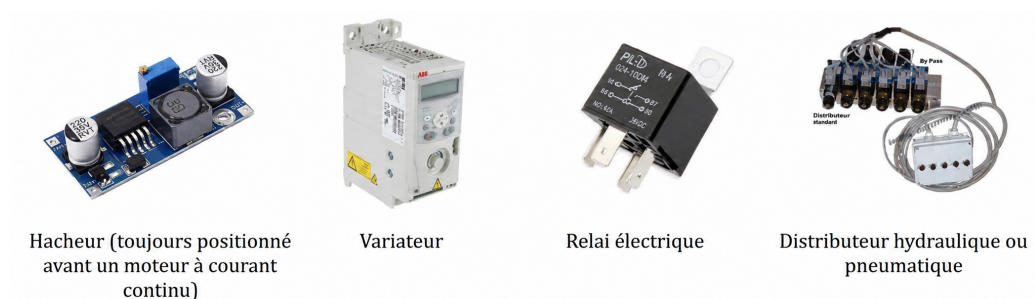


FIGURE 19 – Exemple de pré-actionneurs

- De **CONVERTIR** la puissance. Cette fonction est réalisée par un actionneur qui permet de convertir une énergie d'entrée en énergie de sortie adaptée à l'exécution de la tâche de l'effecteur. Les énergies en entrée et en sortie de ce bloc sont donc de natures différentes.

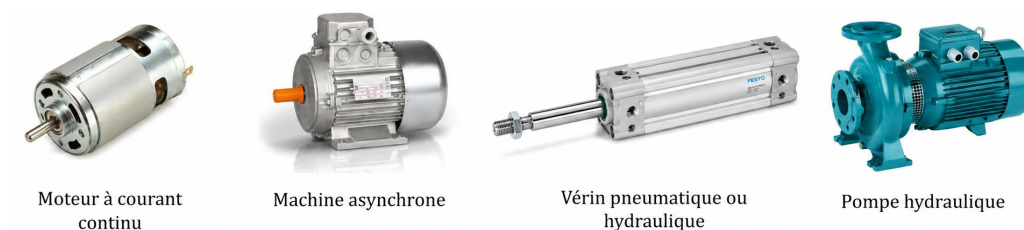
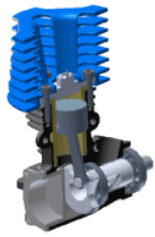


FIGURE 20 – Exemples de convertisseurs

- De **TRANSMETTRE** la puissance convertie. Pouvant se répéter successivement dans une même chaîne, elle est associée à des composants qui ne modifient pas la nature de l'énergie mais peuvent en changer la cinématique associée (dans le cas d'énergie mécanique).



Système bielle-
manivelle



Roue et vis sans
fin



Système poulie-
courroie



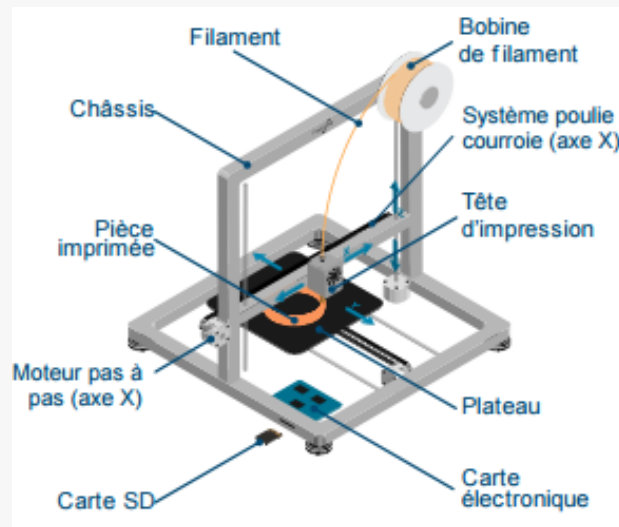
Réducteur à
engrenages

FIGURE 21 – Exemples de transmetteurs

- D'**AGIR** sur la matière d'œuvre. Cette fonction est réalisée directement par un effecteur qui est le dernier élément de la chaîne de puissance. C'est lui qui apporte la valeur ajoutée à la matière d'œuvre.

Exemple

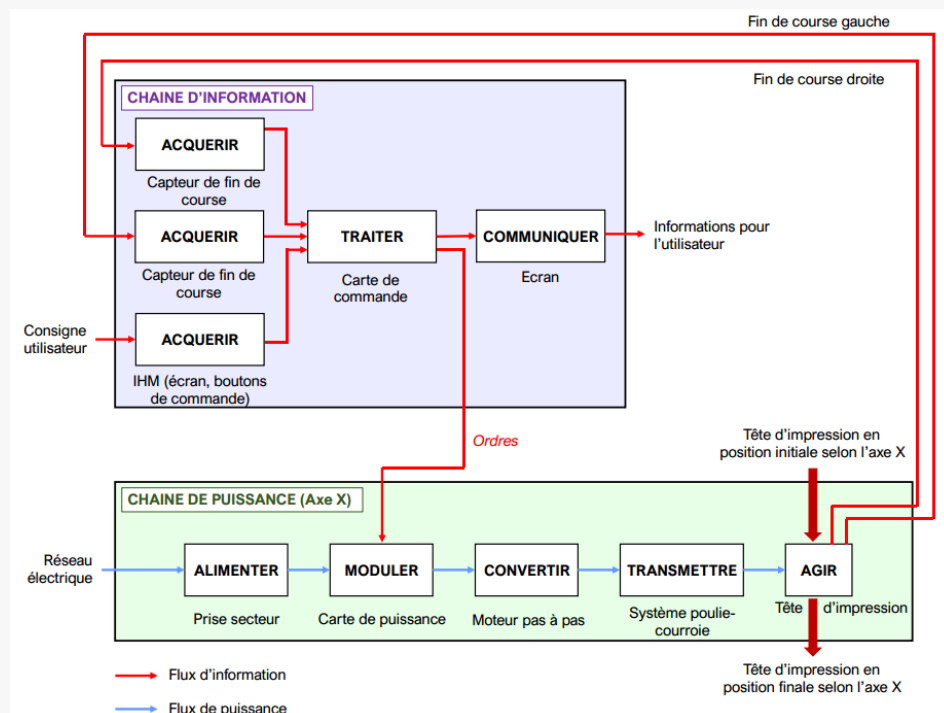
Chaines d'information et de puissance d'une imprimante 3D



Technologie de l'imprimante 3D

On considère une imprimante 3D dont la technologie est présentée sur la figure ci-contre. Les 3 axes de déplacement de la tête d'impression sont notés X, Y et Z.

Pour l'exemple, on prend en compte uniquement les chaînes d'information et de puissance de la mise en mouvement de la tête d'impression selon l'axe X.



Chaînes d'information et de puissance – axe X de l'imprimante 3D