

1 Introduction

Au début du XX^{ième} siècle, les véhicules peuvent être vus comme un assemblage de pièces mécaniques. Il était donc assez simple de concevoir et d'analyser ce type de système.

Avec l'arrivée de l'électronique, de nouvelles fonctionnalités, cela va devenir plus complexe et nécessiter de nouvelles méthodes. Tout d'abord utilisé dans le militaire et dans l'aéronautique, cela va se répandre dans la fin du XX^{ième} siècle comme l'automobile, le ferroviaire ...

Par exemple, si l'on compare la conception de la *2CV* (ou *TPV*) et de la *308*, on peut voir l'augmentation du cahier des charges, des fonctionnalités, de la cadence de production ...

Le passé La <i>2CV</i>	Le présent La <i>308</i>	Le futur proche Le véhicule autonome
7 à 11 années de conception	3 ans	en cours de prototypage
167 419 vendues en 1964 (apogée)	240 700 vendues en 2013	
Pas d'électronique	Des dizaines de calculateurs	Électronique embarqué pour capter l'environnement
Dix lignes d'exigences textuelles	1 million d'exigences	
Aucune aide à la conduite	De nombreuses aides de série	Le conducteur hors de la boucle
Aucun standard à respecter	De nombreux standards et réglementations	Réglementations en cours d'enrichissement

TABLE 1 – Comparaison entre trois systèmes d'époques différentes

L'objectif des Sciences de l'Ingénieur est de mettre en place les outils permettant d'analyser et de comprendre le fonctionnement des systèmes complexes industriels afin de valider leurs performances.

Dans ce cours, on fournira donc les méthodes et les outils destinés à concevoir et/ou analyser un système complexe.

2 Système industriel

2.1 Notion de système



Définition *Notion de système*

Un système est un **ensemble** d'éléments en interaction, organisés pour **atteindre un ou plusieurs résultats**, quantifiables en termes de performance . Source : ISO 15288.



Ensemble de pièces



Robot humanoïde



Solveur de Rubixcube

FIGURE 1 – Ce sont les pièces et les relations entre les pièces qui font un système



Remarque

Comme le montre l'exemple ci-dessus, ce n'est pas l'ensemble de pièces qui constitue un système : il s'agit également de l'interaction entre eux.

2.2 Classification

On distingue deux grandes catégories de systèmes :

- les **systèmes naturels** (*système solaire*) ;
- et les **systèmes artificiels**, créés par l'Homme pour remplir une fonction précise. Ces derniers sont appelés **systèmes techniques ou industriels**.

Les systèmes industriels peuvent être de natures différentes mais sont tous caractérisés par une **complexité forte** et une **interdisciplinarité**. La conception d'un système industriel ne doit pas être faite au hasard, au risque d'aboutir à un produit qui n'intéressera ou ne satisfera pas aux exigences des clients.

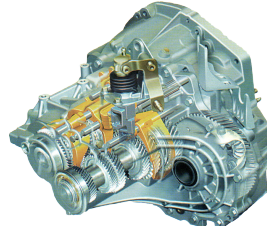
Pour faciliter l'étude d'un **système complexe**, il sera possible de le **décomposer en sous-systèmes** plus simples. Chaque sous-système pourra alors être considéré comme un système composé d'autres sous-systèmes en relation. Cette décomposition peut être effectuée jusqu'à aboutir aux **composants simples** (FIGURE 2).



Véhicule

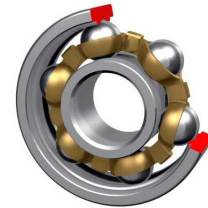
BdV, moteur, carrosserie...

Boîte de vitesses



carter, fourchettes, engrenages, roulements à billes...

Roulement à billes



bague intérieure, bague extérieure, billes, cages à billes, billes

FIGURE 2 – Exemple de sous-systèmes appliqué à un véhicule automobile

2.3 Domaine d'application

Le domaine d'application est le milieu physico-économique dans lequel évolue le système et pour lequel il a été conçu. Dans ce milieu, le système est dit **système industriel** (FIGURE 3) ; dans le laboratoire, pour une utilisation dans un cadre pédagogique, il sera appelé **système d'étude**.

La majorité des domaines d'applications seront rencontrés lors de l'étude des systèmes en TD et en TP au cours de l'année : aéronautique, robotique, domotique, médical, recherche, énergie, transport...

IRM, *médical*Voiture électrique, *transport*Robot, *conditionnement*

FIGURE 3 – Systèmes associés à leur domaine d'application

2.4 Critères technico-économiques

Des critères technico-économiques sont pris en compte dès la phase de conception du système industriel. On utilise par exemple les critères, de durée de vie, de coût, de fiabilité, de quantité, de faisabilité, d'impact environnemental ...

À titre d'exemple, les solutions techniques qui permettent de satisfaire le besoin « se raser » sont très variées : le rasoir jetable une lame (peu cher et peu robuste), au rasoir électrique sans fil à 3 têtes rotatives, diffuseur de crème hydratante, écran intégré (très cher et le client attend qu'il soit robuste).



2.5 Vues et typologie de modèles

Vu la complexité des systèmes actuels, il est possible d'élaborer plusieurs vues d'un même système.

Ceux-ci permettent d'aborder un système selon un certain point de vue afin de pouvoir concevoir et analyser ce système. Cela permet également de comprendre un autre point de vue et de faire comprendre son propre point de vue.

De plus, les différents experts auront leur vues avec des modèles spécifiques. En CPGE, nous étudierons différents points de vue comme le comportement dynamique d'un système soumis à un effort, la réponse d'un système asservi à une certaine commande ...

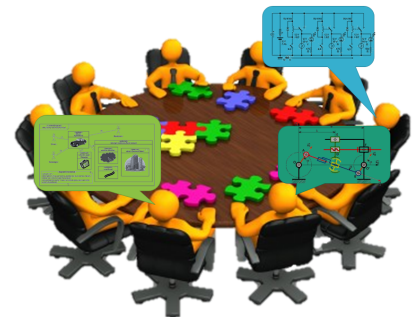
Enfin, ces différents modèles n'auront pas forcément le même objectif. Certains serviront pour formaliser un problème alors que d'autres permettront de prévoir un comportement.

Les différents types de modèles sont présentées dans la FIGURE 4.

Ceux-ci peuvent être réalisés à l'aide de langages. En ce qui concerne l'analyse d'un système, le plus utilisé est le SysML. Plusieurs diagrammes de ce langage seront utilisés dans ce cours et une synthèse sur ce langage sera effectuée à la fin de celui-ci.

Au cours de cette année, nous nous focaliserons sur trois aspects du système qui nécessiteront des vues et certains types de modèles :

- **Le système souhaité**, défini par un ensemble de documents dont le cahier des charges.
- **Le système simulé**, défini numériquement par un ou des fichiers exécutables par un ou des logiciels de simulation.
- **Le système réel**, dont une version peut être disponible physiquement ou virtuellement dans le laboratoire.



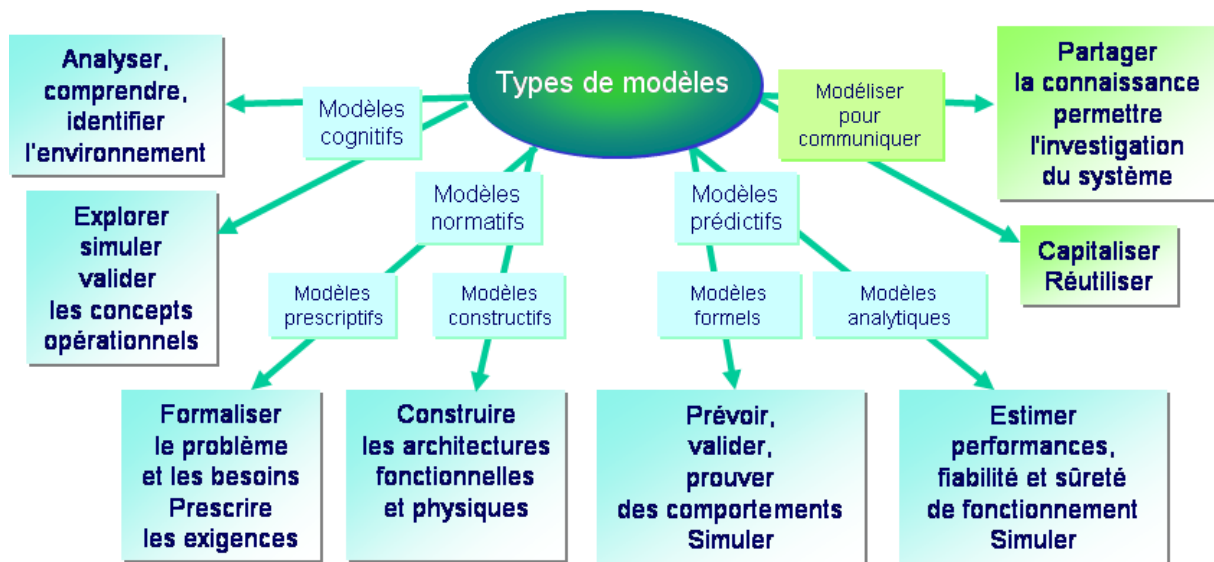


FIGURE 4 – Typologie de modèles (Source : AFIS)

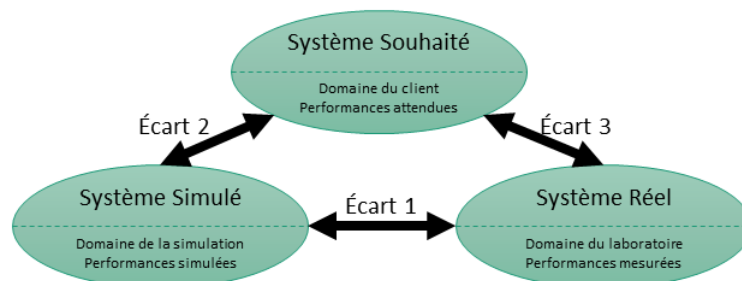
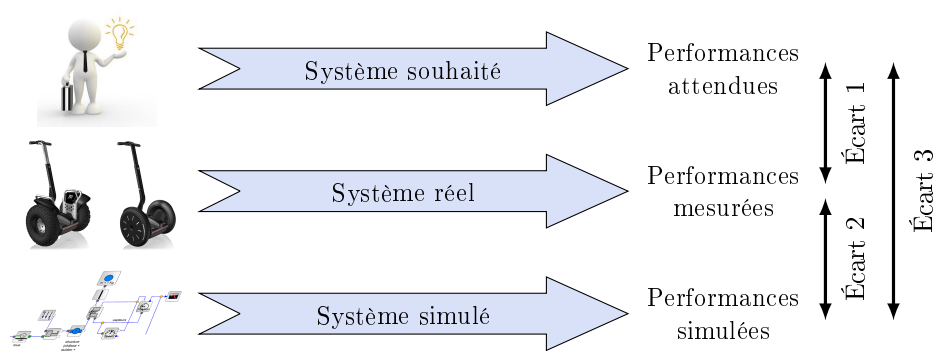


FIGURE 5 – Aspects d'un système traités en CPGE

En se rapprochant d'une démarche simplifiée d'ingénieur, il sera donc possible de traiter trois écarts, numérotés dans la FIGURE 6. L'écart 3 (entre le système souhaité et le système simulé) pourra être traité lors des séances de TD mais le traitement et l'analyse des écarts seront principalement effectués lors des séances de TP.



Objectif : comprendre et minimiser les écarts.

FIGURE 6 – Démarche de l'ingénieur

2.6 Cycle de vie d'un Système



Définition *Cycle de vie*

Phases consécutives et liées d'un système de produits, de l'acquisition des matières premières ou de la génération des ressources naturelles à l'élimination finale.

Cette notion est très importante et ne doit pas être négligée lors de la conception d'un système. En effet, on étudie souvent le système dans sa phase de vie d'utilisation mais cela peut provoquer des désagréments lors d'autres phases. Il est possible de le modéliser sous la forme d'un diagramme d'état SysML (*stm*).

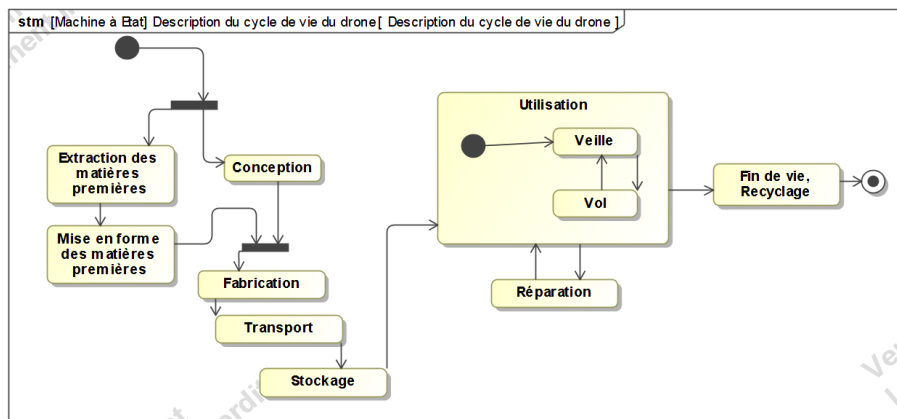


FIGURE 7 – Cycle de vie d'un drone de loisir

3 Conception d'un système

Maintenant que nous avons défini ce qu'était un système, nous allons expliquer quelles sont les pratiques courantes en terme de conception (Ingénierie Système et éco-conception).

3.1 Ingénierie Système



Définition *Ingénierie Système*

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. Source : AFIS

Il s'agit donc d'une pratique permettant de concevoir intelligemment un système complexe.

L'ensemble des activités peuvent être vues selon un cycle en V, même si ce n'est pas forcément l'enchaînement temporel de ces activités. Un processus de conception d'un système complexe sera récursif et itératif ; il devra cependant réaliser toutes les activités du cycle en V comme cela est indiqué dans la FIGURE 8.

Nous rentrerons plus en détail pour certaines activités dans la suite de ce cours.

3.2 Développement durable et démarche d'éco-conception

La forte augmentation de la population et la demande de systèmes très énergivores, la production de biens pourrait avoir un impact très négatif sur l'environnement. On a pu donc voir s'imposer ces dernières années une idée forte : le développement durable.

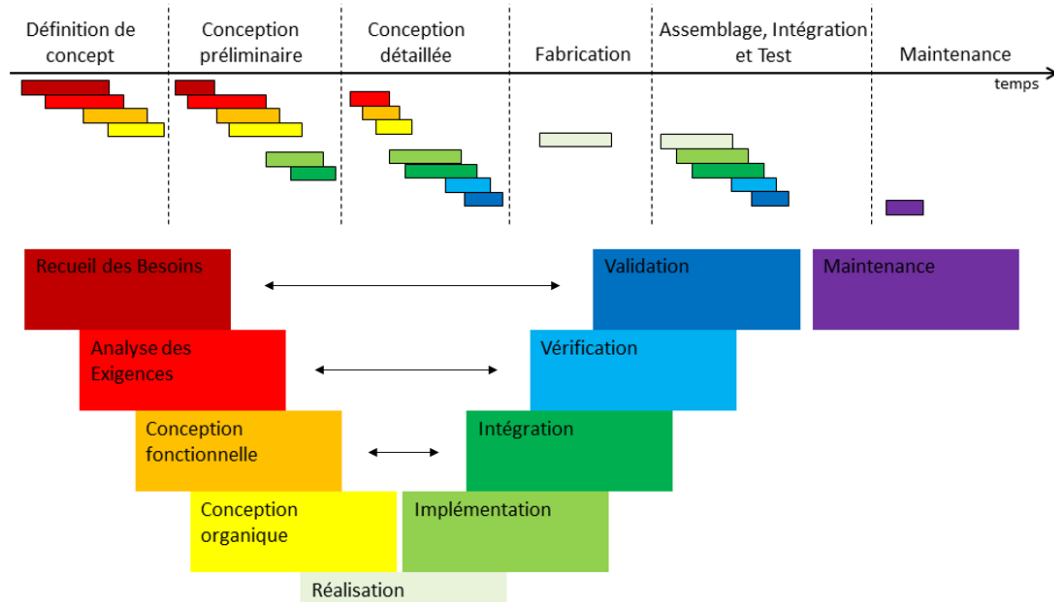


FIGURE 8 – Processus de Conception. Sources : NASA et ISO 15288

**Définition** *Développement durable*

Un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures aux leurs. Source : Rapport Brundtland

Il est donc nécessaire d'adopter une démarche de conception en accord avec notre environnement pour concevoir les différents systèmes.

Par exemple, une démarche nécessaire consiste en l'analyse du cycle de vie (norme ISO 14040) avec pour objectif la réduction de l'impact environnemental. Il faut prendre en compte toutes les étapes de ce cycle de vie de l'extraction des matières premières au recyclage en passant par les phases de transport.

L'éco-conception en ingénierie est donc une approche transversale qui permet d'agir à l'aide de nombreuses techniques comme l'utilisation de matières recyclées, la réduction d'emballages et de matériaux rares... Pour cela, il est possible de se baser sur plusieurs directives :

- La **Directive EuP** (Energy-using Product) qui a pour objectif d'améliorer l'efficacité énergétiques de produits énergivores.
- La **Directive WEEE** (Waste of Electrical and Electronic Equipment) engage la responsabilité des industries dans la récupération et la valorisation des déchets des équipements électriques et électroniques.
- La **Directive RoHS** a pour but de limiter l'utilisation de métaux lourds (substances considérées comme dangereuses).

4 Expression du besoin et analyse des exigences techniques

Il est très important de ne pas négliger cette partie afin que les différentes parties prenantes aient la même compréhension du système qui va être conçu. L'enjeu est d'éviter que le système conçu soit différent de celui souhaité (voir FIGURE 9).

Nous aborderons donc quelques termes importants puis nous nous focaliserons sur plusieurs activités et les diagrammes associés.

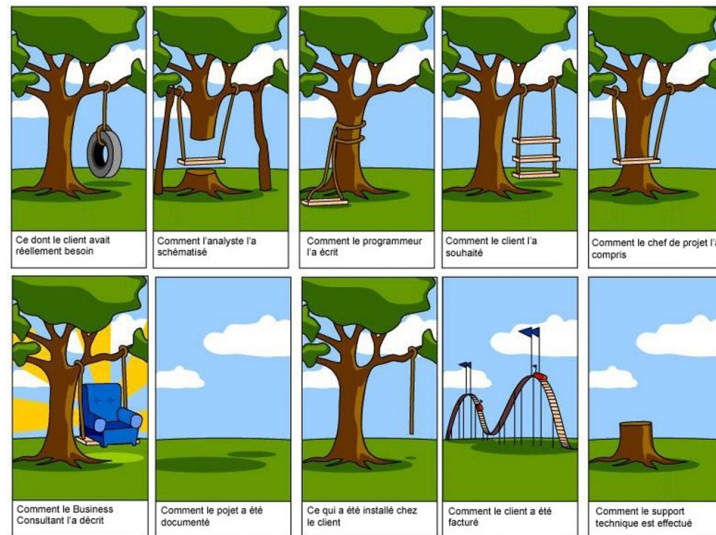


FIGURE 9 – Chacun sa vue (Source : IBM)

4.1 Définitions



Définition *Exigence*

Quelque chose qui prescrit ce qu'un produit doit faire, avec quelles performances et sous quelles conditions, pour atteindre un but donné. Source : EIA 632



Définition *Cahier des Charges fonctionnel*

Document formalisant l'expression des besoins et facilitant la communication des parties prenantes.



Définition *Besoin*

Nécessité ou désir ressenti par un utilisateur.



Définition *Contrainte*

Une restriction, limitation ou une conformité à un règlement imposé à un produit, un projet ou un processus. Un type d'exigence ou de caractéristique de conception qui ne peut faire l'objet de compromis. Source : EIA 632



Définition *Service*

Résultat généré par des fonctions à l'interface entre le système et l'environnement d'utilisation, et par des fonctions internes au système, pour répondre aux besoins de l'utilisateur.



Définition *Partie prenante*

Partie ayant un droit, une part ou une prérogative qui fait que le système ou certaines de ses propriétés doivent satisfaire les besoins ou les attentes de cette partie. Source : ISO 15288

4.2 Activités

Maintenant que la terminologie est claire, il est possible de déterminer les différentes activités. La FIGURE 10 propose un processus possible de la détermination du besoin des parties prenantes.

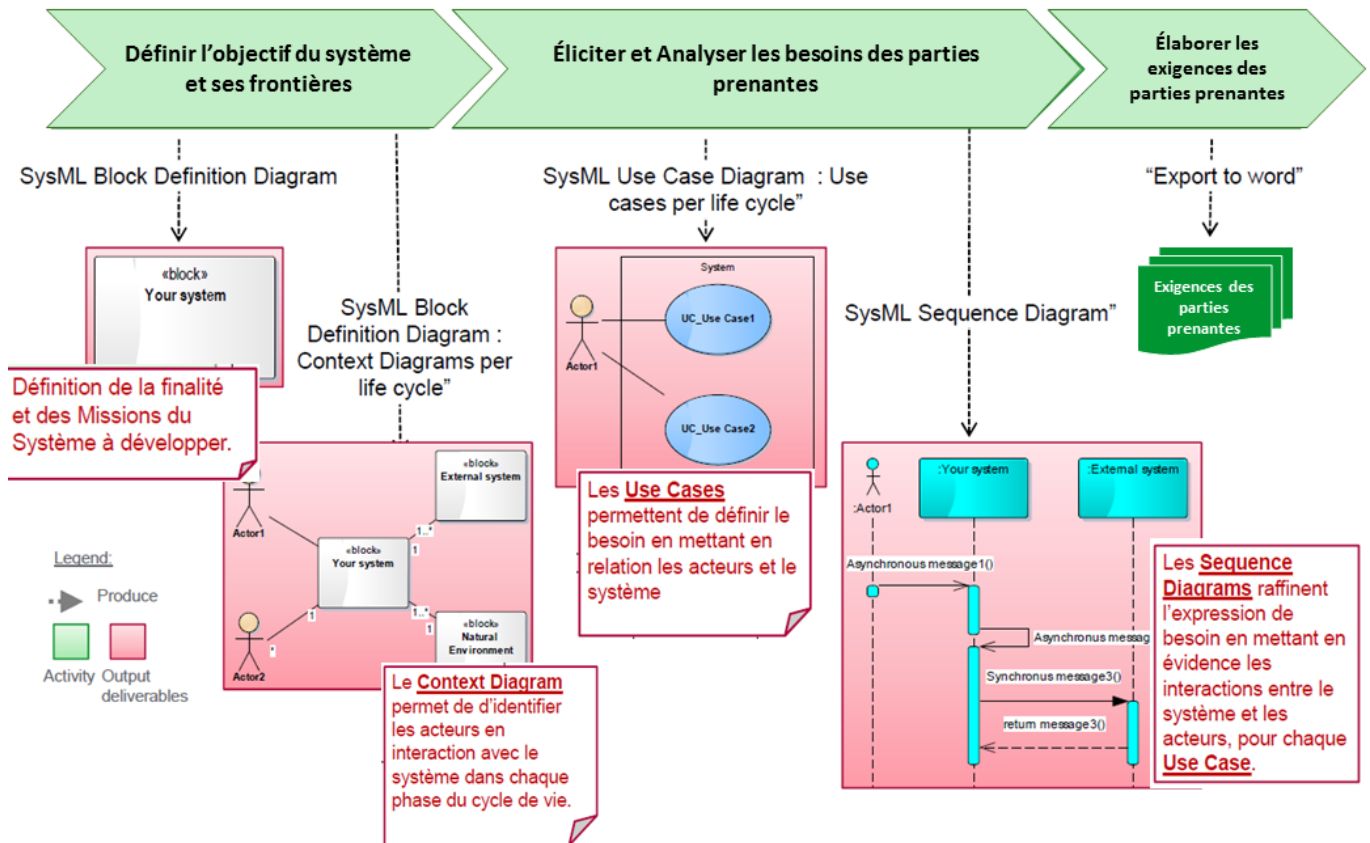


FIGURE 10 – Collecter le besoin des parties prenantes



Remarque

Dans la suite de ce cours, nous prendrons l'exemple suivi d'un drone de loisir type *Mavic* de *Dji* ou drone *Parrot*.

4.2.1 Définir l'objectif du système et ses frontières

Cette activité consiste en la définition du contexte opérationnel. Afin de fournir un cahier des charges fonctionnel sur lequel tout le monde est d'accord, il faut définir le contexte opérationnel du système.

Tout d'abord, la mission du système doit être définie. Cela peut être modélisé par un diagramme de blocs en SysML (*bdd*) simple.

Ensuite, il est possible de dresser le cycle de vie attendu du système en n'oubliant pas les phases de maintenance et de retrait à l'aide d'un diagramme d'état comme cela a été mentionné précédemment.

Ensuite, pour chaque phase du cycle de vie, il est possible de déterminer tous les interacteurs dans un diagramme de contexte. Cela se fait également par un diagramme de blocs en SysML d'où l'importance du cartouche sur les diagrammes. Celui-ci présente les différents éléments composant le sursystème du système pour une phase de vie comme cela est indiqué dans la FIGURE 11 pour la pédale lumineuse.

Une alternative qui peut être présente dans certains sujets est de montrer le système au centre de ce diagramme. Pour ces deux années, nous privilégierons le premier cas car il respecte mieux le sens du diagramme *bdd*. Il est possible de visualiser les interfaces entre le système et ses acteurs par un *ibd* qui est plus adapté pour cela.

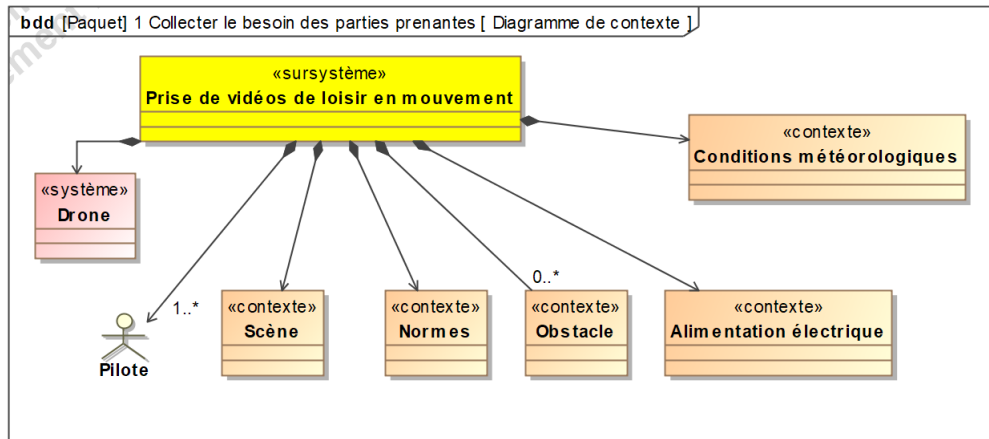


FIGURE 11 – Diagramme de contexte d'un drone de loisir

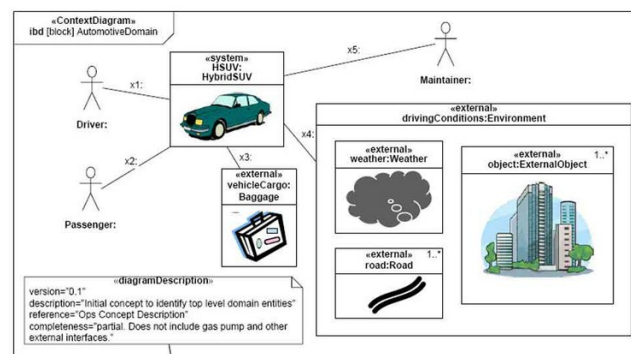


FIGURE 12 – Alternative possible pour le diagramme de contexte

4.2.2 Éliciter et analyser les besoins des parties prenantes

Il est donc maintenant possible d'éliciter (ie : comprendre et de modéliser) les besoins des parties prenantes et de les analyser. Pour cela, il faut déterminer les services attendus en se basant sur les différents acteurs pour chaque phase du cycle de vie. Cela va ainsi permettre que les différentes parties prenantes soient d'accord sur le système à concevoir. Cela se fait à l'aide d'un diagramme SysML nommé *Use Case Diagram* (Diagramme des Cas d'utilisation). Il est possible d'en dresser un global ou de les raffiner en en réalisant un pour chaque phase du cycle de vie du système.



Remarque Règle d'écriture

Les cas d'utilisation doivent être écrits comme un verbe + complément. De plus, les acteurs principaux sont placés à gauche afin de faciliter la compréhension.

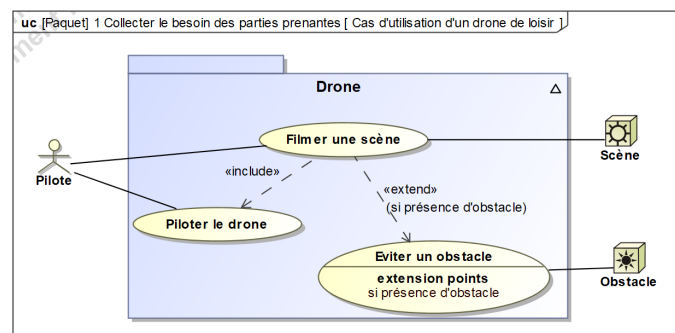


FIGURE 13 – Exemple d'un Use Case Diagram pour un drone de loisir

Ensuite, pour chaque cas d'utilisation, il est possible de déterminer un diagramme de séquence permettant de déterminer les interactions entre le système et les interacteurs.

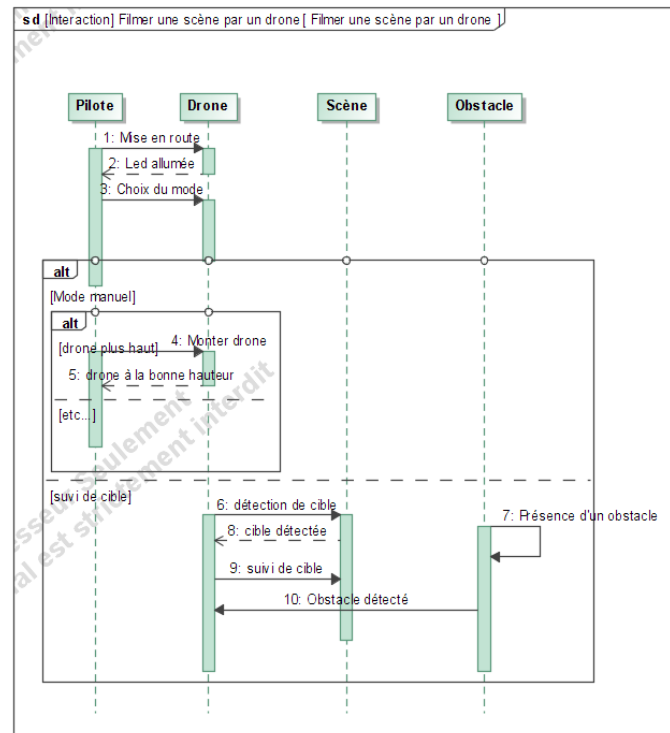


FIGURE 14 – Exemple d'un diagramme de séquence concernant l'action de filmer par un drone

4.2.3 Élaborer les exigences des parties prenantes

Maintenant que le contexte opérationnel et les services attendus ont été définis, il est possible de rédiger l'ensemble des exigences des parties prenantes dans le cahier des charges fonctionnel.



Remarque *MUST* ou *SMART*

Une bonne exigence est **MUST** soit Mesurable, Utile, Simple, Traçable (ou Testable). Aux États-Unis, l'acronyme est **SMART** pour Specific, Measurable, Achievable, Realistic, Testable.



Remarque *Règle de nommage*

Une règle importante est donc d'exprimer les exigences par une phrase avec le verbe devoir **ou** une phrase à l'infinitif.

Pour synthétiser ce travail, on peut utiliser un diagramme des exigences (*req*) en SysML :

Par rapport à une liste textuelle d'exigences, les avantages d'un diagramme d'exigences sont nombreux. En effet, ils permettent de visualiser les liens entre les différentes exigences et entre les exigences et le ou les éléments du modèles qui les satisfont.

4.2.4 Raffiner les cas d'utilisation et définir les fonctions système

Le contexte opérationnel et le cahier des charges fonctionnel étant définis, il est possible d'analyser ces exigences afin de réaliser les fonctions systèmes. Nous reviendrons plus en détails sur les diagrammes d'état dans le prochain chapitre mais ceux-ci permettent également de définir quels seront les fonctions système actives pour réaliser un service.

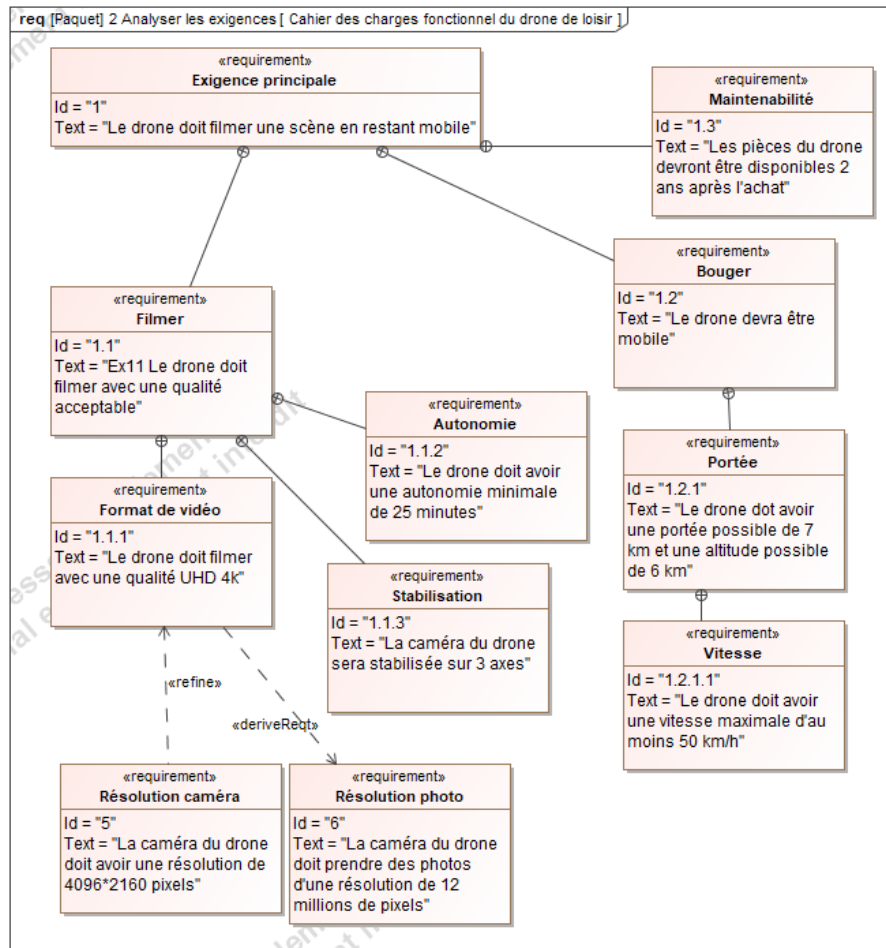


FIGURE 15 – Exemple de diagramme des exigences

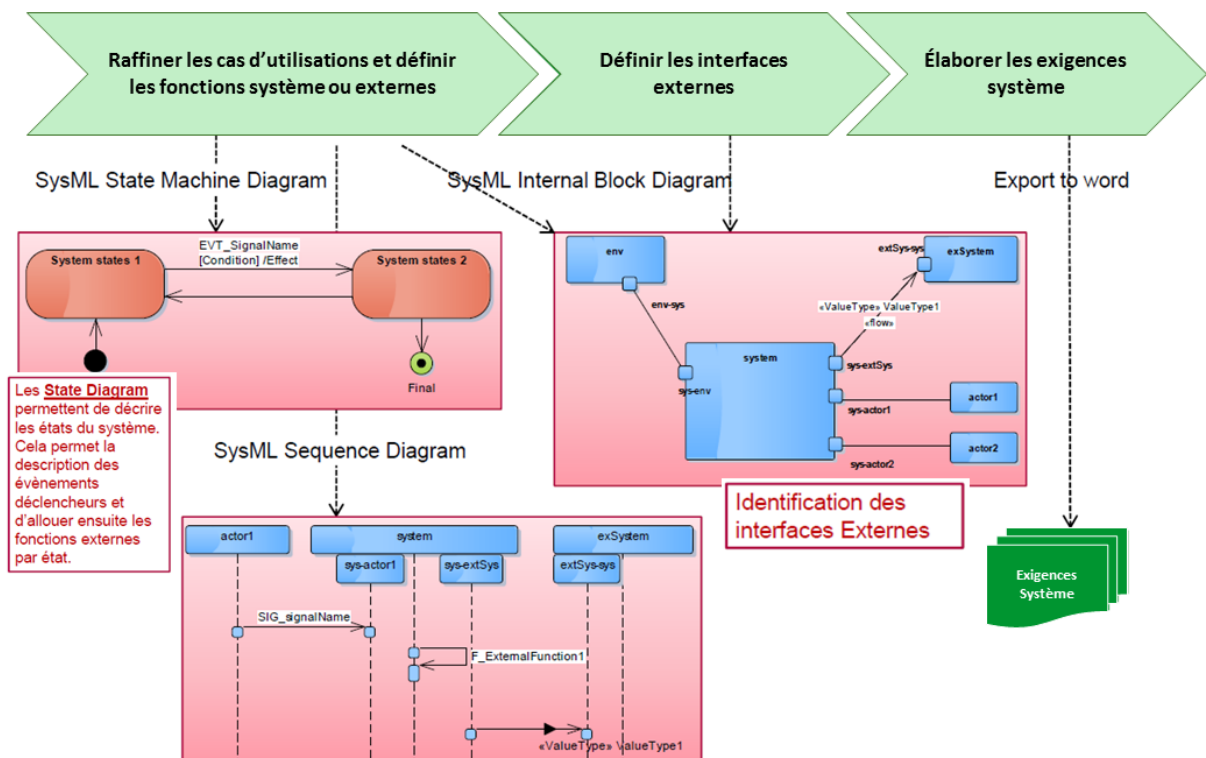


FIGURE 16 – Analyse des exigences

Couplé au raffinement des cas d'utilisation, cette démarche va permettre de définir les fonctions système. Elles relient les entrées aux sorties du système. On peut l'illustrer à l'aide d'un diagramme des blocs internes (*ibd*, voir FIGURE 16).

4.2.5 Définir les interfaces externes

A l'aide du diagramme des acteurs et en reprenant les fonctions système définies, il est possible de déterminer les interfaces externes pour définir les performances du système à concevoir et des différentes fonctions.

On utilise pour cela un diagramme de définition des blocs (*bdd*, voir FIGURE 16).

4.2.6 Élaborer les exigences système

Une fois que ce travail préliminaire est terminé, il est maintenant possible de déterminer les exigences système à l'aide des exigences des parties prenantes et des diagrammes réalisés précédemment.

Il faut donc assurer la traçabilité des exigences et déterminer celles qui serviront à concevoir la solution.

5 Définition d'une architecture fonctionnelle

Une fois que le cahier des charges fonctionnel et les fonctions système sont bien définis, il est important de définir quelles seront les fonctions qui vont y répondre.

5.1 Définitions



Définition *Fonction*

Une fonction est une tâche ou activité exécutée pour atteindre un résultat attendu. Source : EIA 632



Définition *Interface*

Une interface est une frontière entre 2 fonctions, définie par plusieurs caractéristiques concernant les fonctions et les flux.

5.2 Comment définir une architecture fonctionnelle

En se basant sur les fonctions externes, il est possible de les décomposer en fonctions internes. On peut décrire cette étape par un *bdd*.

Ensuite, il faut déterminer les interfaces entre les fonctions et les flux qui seront échangés. Ceux-ci peuvent être de Matière, d'Energie ou d'Information.

Cette étape va permettre de créer des Chaînes fonctionnelles permettant de fournir les services souhaités. On peut les représenter en SysML par un *ibd*.

L'enchaînement de ces fonctions peut être visualisé à l'aide d'un diagramme comportemental qu'est le diagramme d'activités (*act*).

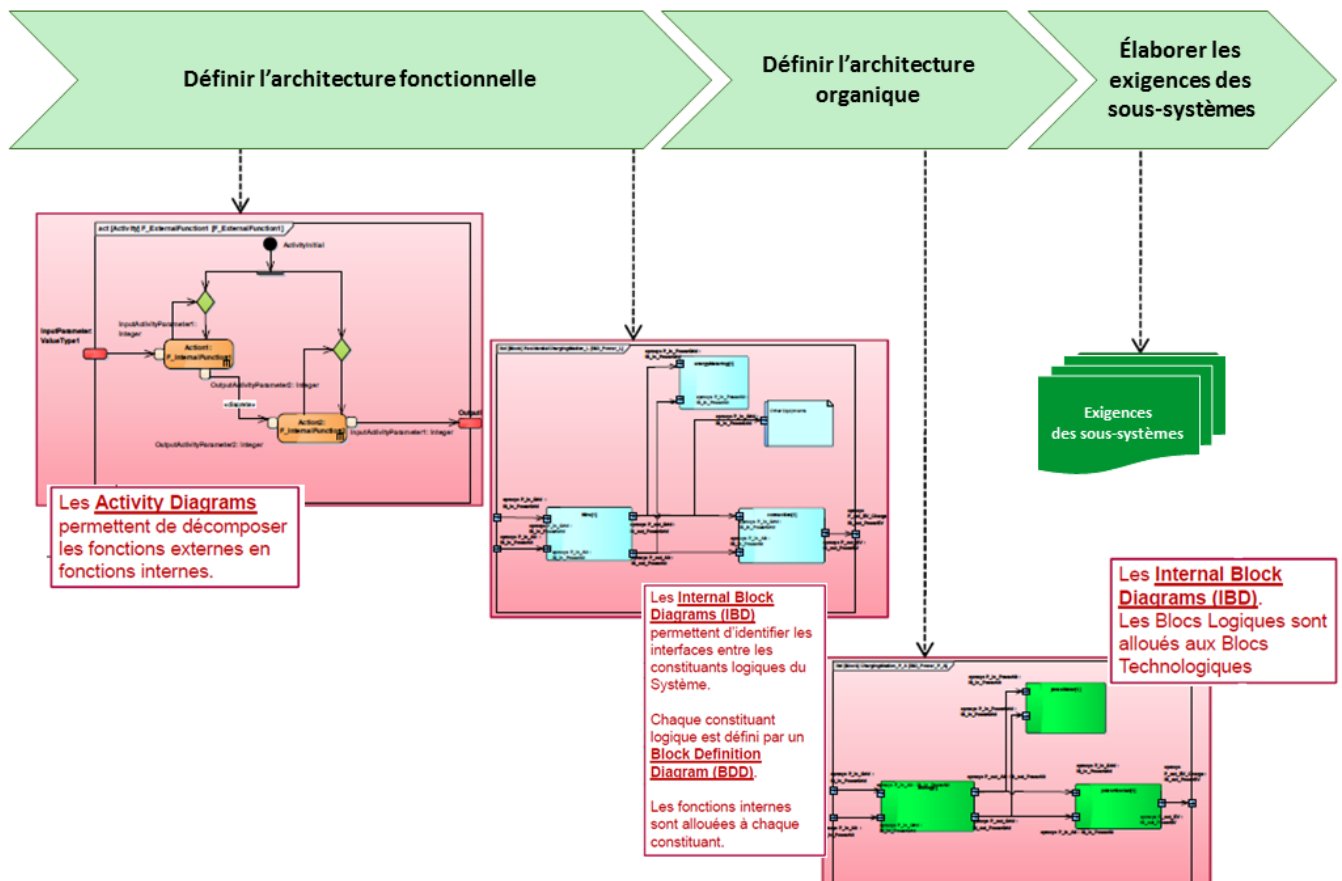


FIGURE 17 – Définir l'architecture fonctionnelle et organique

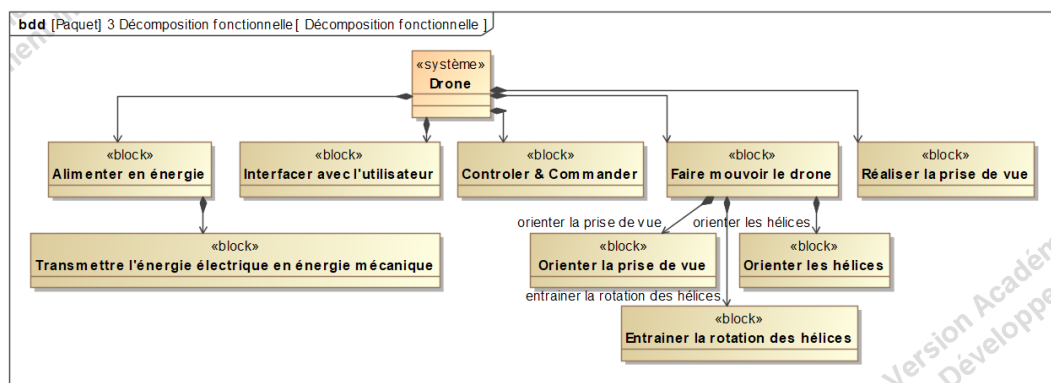


FIGURE 18 – Décomposition des fonctions

5.3 Chaîne d'énergie et Chaîne d'information

En CPGE, nous utiliserons un canevas pour les systèmes que nous utiliserons. Celui-ci se compose de deux chaînes fonctionnelles que sont la Chaîne d'information et la Chaîne d'énergie (FIGURE 21). Nous reviendrons plus en détail sur certaines fonctions de ces deux chaînes lors des prochains cours. Il est donc essentiel de bien la connaître. À noter qu'on peut aussi représenter ce schéma avec un *ibd*.

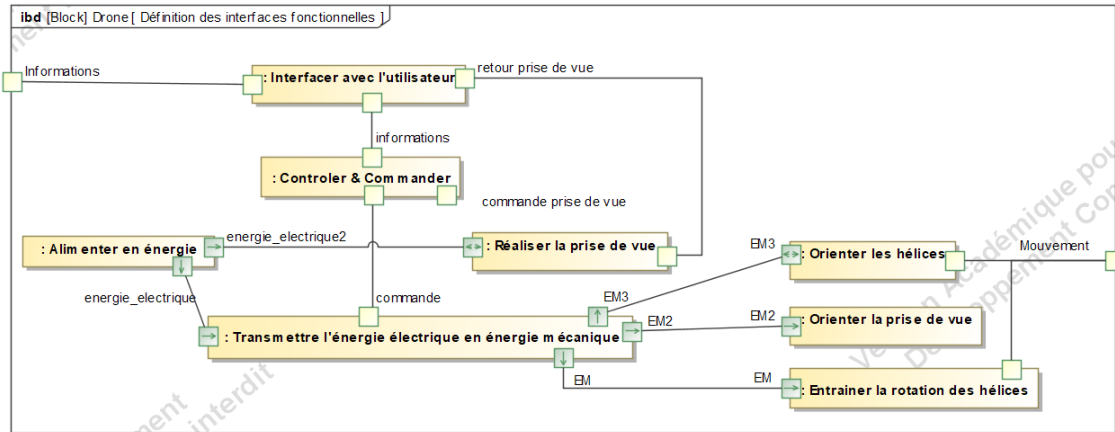


FIGURE 19 – Décomposition des interfaces fonctionnelles

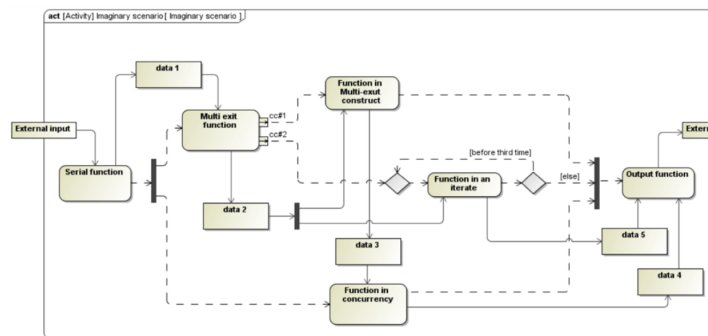


FIGURE 20 – Exemple de Scénario Fonctionnel à l'aide d'un diagramme d'activités

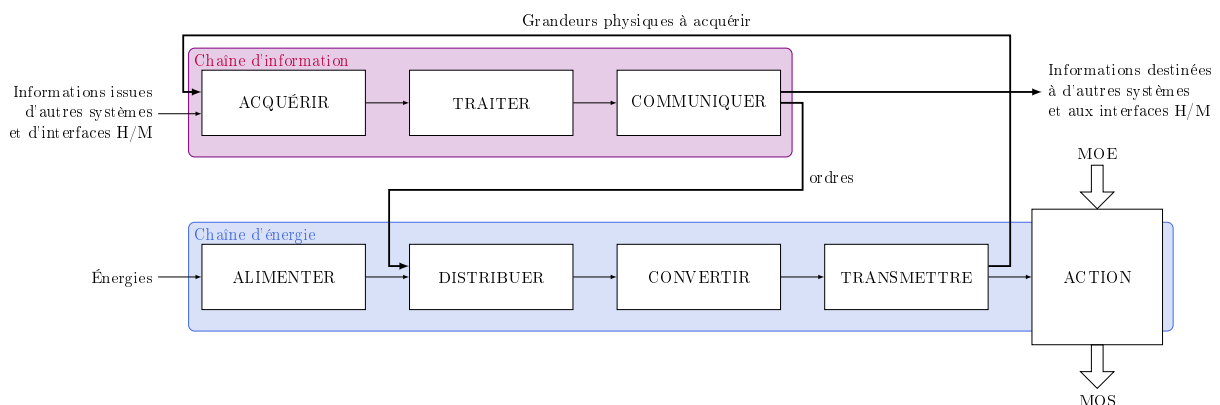


FIGURE 21 – Chaîne d'énergie et Chaîne d'information

6 Définition d'une architecture organique

Maintenant que l'architecture fonctionnelle est définie, il est possible d'allouer les fonctions à des composants.

6.1 Terminologie



Définition *Composant*

Un composant est défini comme étant « an entity with discrete structure, such as an assembly or software module, within a system considered at a particular level of analysis ». Source : ISO 15 026

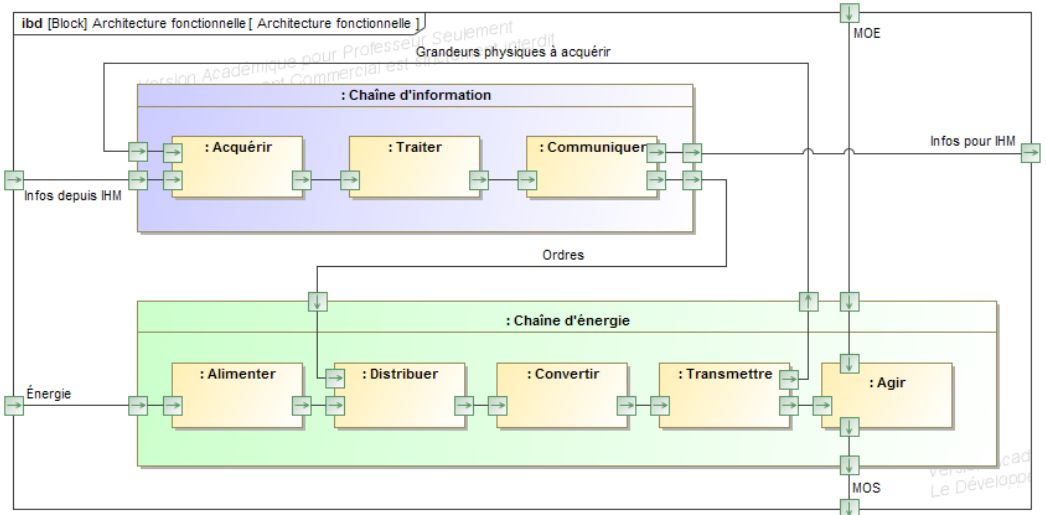


FIGURE 22 – Chaîne d’énergie et Chaîne d’information sous forme d’*ibd*

6.2 Activités

En se basant sur la FIGURE 17, l’activité principale concernant l’architecture organique consiste en l’allocation des éléments fonctionnels aux différents composants de l’architecture organique qui peuvent être nouveaux, sur « étagère » d’un fournisseur ou repris d’un modèle existant.

	Caméra 1	Moteur	Hélices
Faire mouvoir le drone		•	•
Réaliser la prise de vue	•		
...			

TABLE 2 – Table d’allocation

Ce tableau va ensuite permettre de s’assurer de la décomposition organique du système.

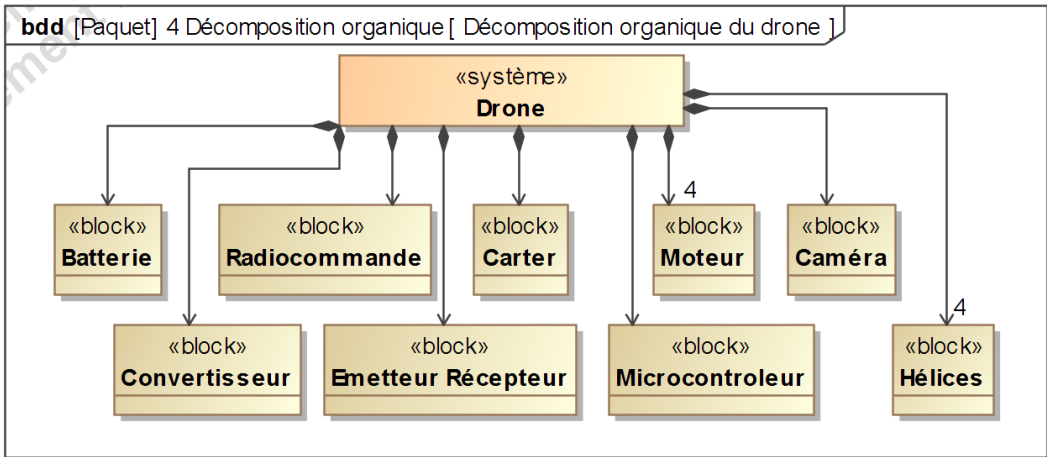


FIGURE 23 – Décomposition des composants

Afin de spécifier les interfaces entre les différents composants, l'architecte peut s'appuyer sur un diagramme de type *ibd* comme le montre la figure ci-dessous.

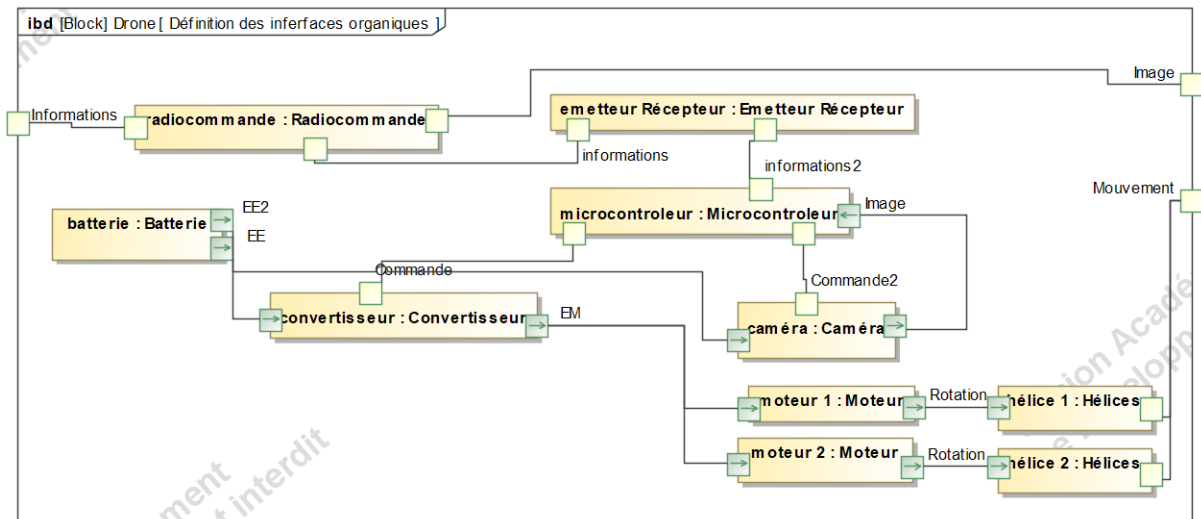


FIGURE 24 – Décomposition des interfaces organiques

De plus, il faudra prendre en compte les exigences non-fonctionnelles déterminées précédemment dans la décomposition et dans la définition des interfaces.

Pour conclure, il est intéressant de vérifier que le produit est conforme aux exigences du cahier des charges fonctionnel.

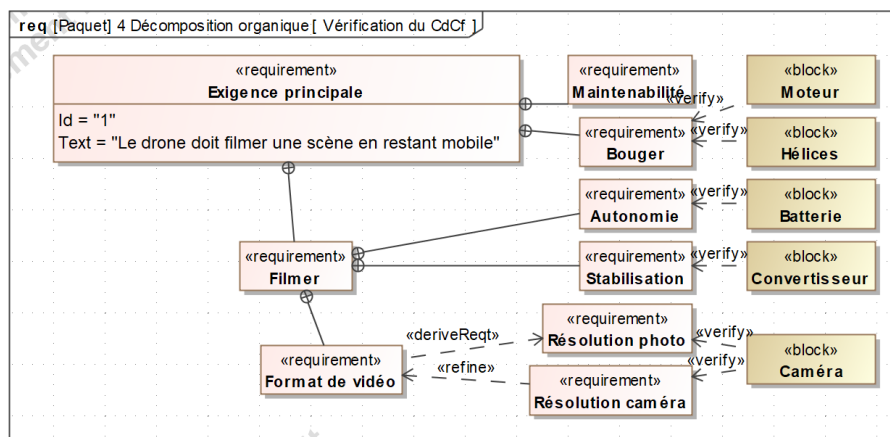


FIGURE 25 – Vérification du cahier des charges fonctionnel

6.3 Composition de l'architecture organique

Si on reprend le diagramme Chaîne d'énergie et Chaîne d'information (FIGURE 21), il est possible de déterminer certains types de composants standards :

6.3.1 Chaîne d'énergie

Voici quelques constituants possibles pouvant répondre aux fonctions de la chaîne d'énergie.

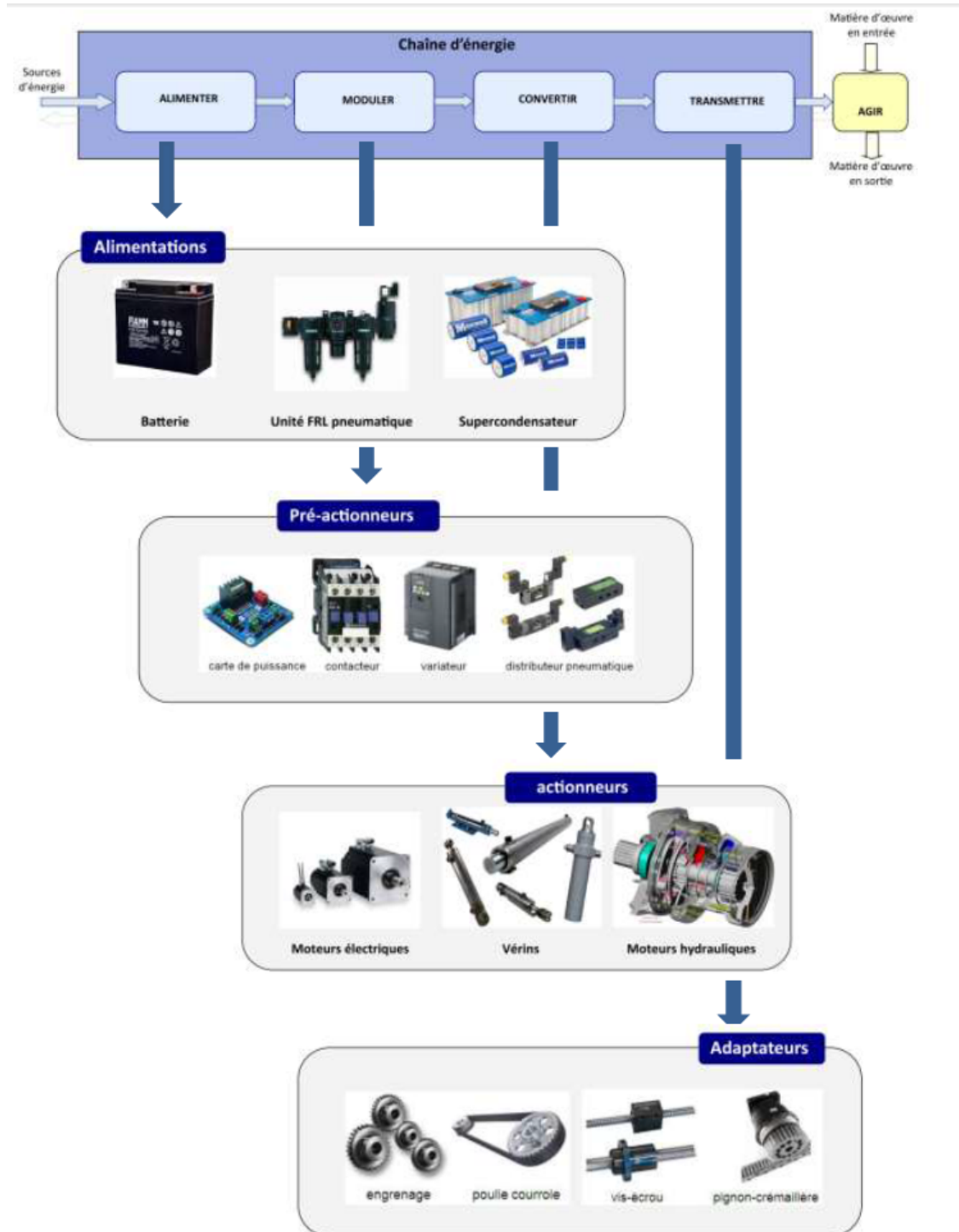


FIGURE 26 – Chaîne d'énergie

6.3.2 Chaîne d'information

Voici quelques constituants possibles pouvant répondre aux fonctions de la chaîne d'information.

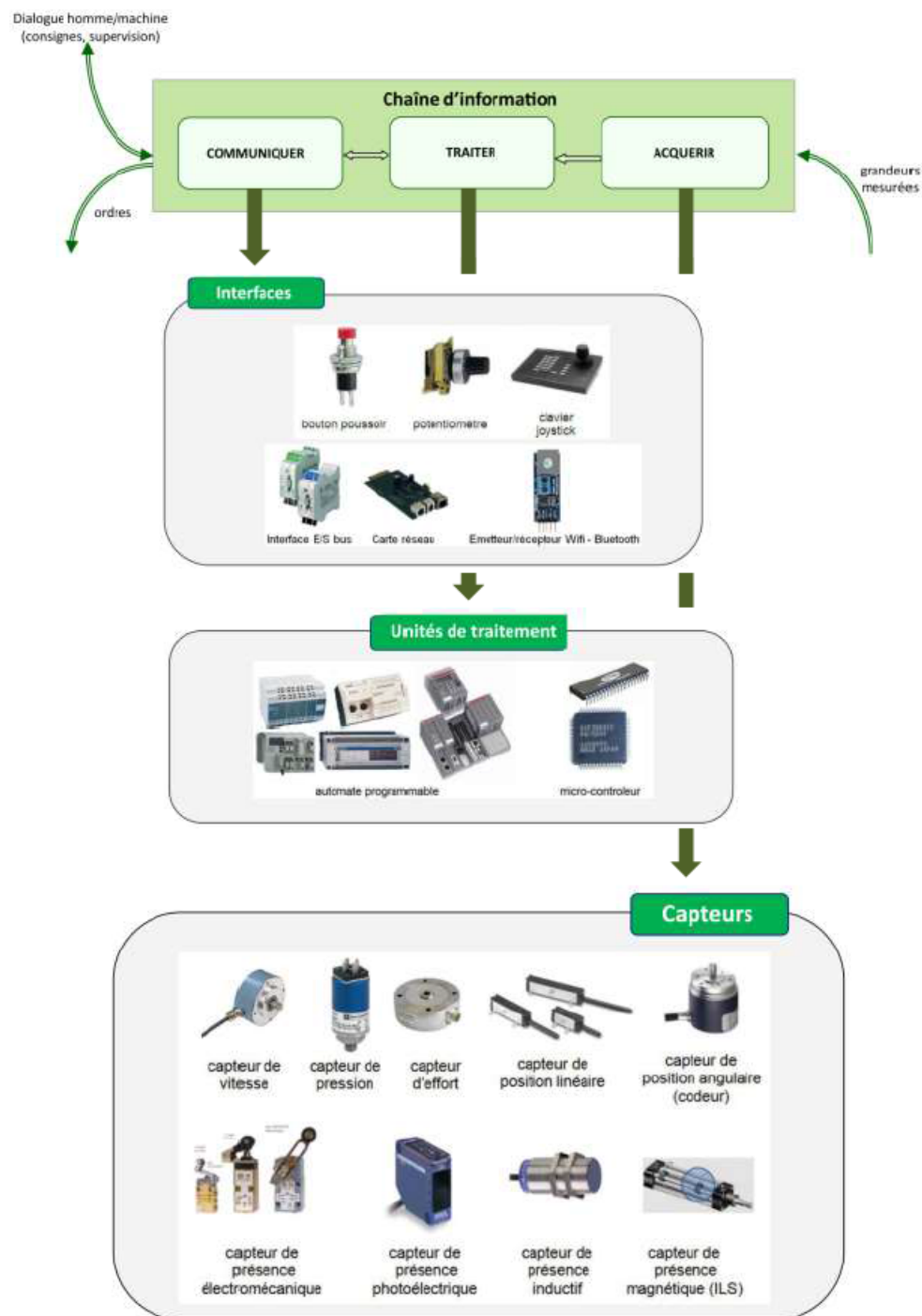


FIGURE 27 – Chaîne d'information

7 Récapitulatif concernant SysML

Comme cela a été indiqué au début de ce cours, un langage d'Ingénierie Système assez utilisé est le SysML et plusieurs diagrammes SysML ont été présentés à travers les différentes sections. Il s'agit donc d'un ensemble de diagrammes permettant de concevoir un système.

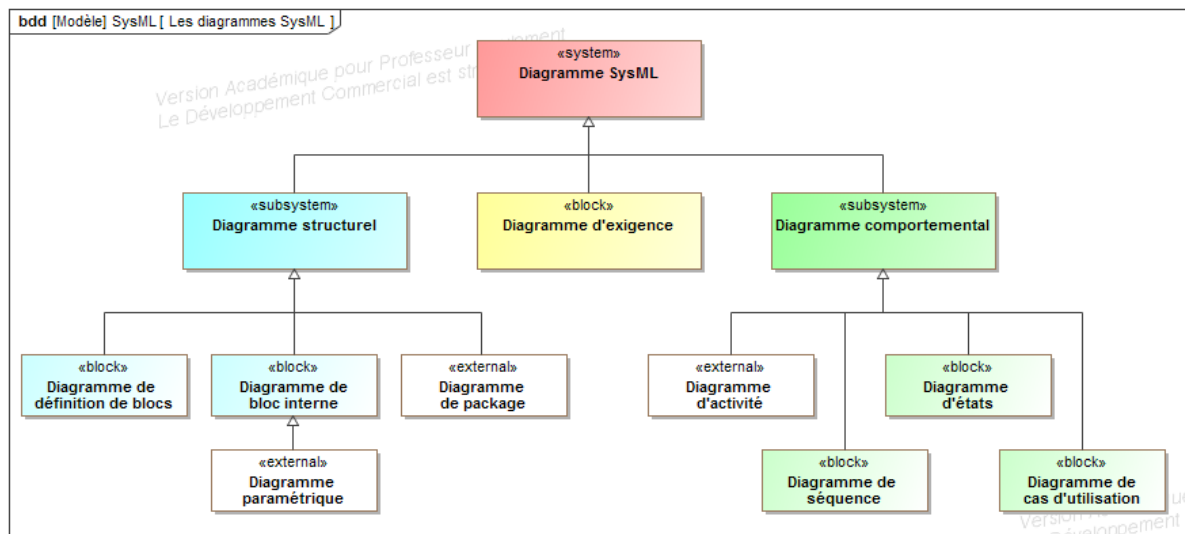


FIGURE 28 – Diagrammes SysML

On peut aussi utiliser ces diagrammes pour la rétro-ingénierie, et c'est d'ailleurs le plus souvent dans ce contexte que nous les utiliserons en CPGE.