

# Ingénierie Système

1	Introduction.....	2
2	Notion de système .....	2
2.1	Besoin de structuration et de modélisation.....	2
2.2	Système simple / système complexe.....	3
3	Introduction à l'Ingénierie système.....	3
3.1	Justification.....	4
4	Méthodes de conception/réalisation d'un produit.....	4
4.1	Cycle de vie d'un produit.....	5
4.2	Outil de modélisation et conception : le langage SysML.....	7
5	Analyse du besoin avec sysml.....	10
5.2	Diagramme de séquence (SysML Sequence Diagram).....	13
5.3	Diagramme d'exigences (SysML Requirements Diagram).....	15
5.4	Méthode d'analyse du besoin.....	17
6	SysML pour la conception.....	17
7	Frontiere de l'analyse et structure DU système.....	19
7.1	Diagramme de définition de bloc (SysML Block Definition Diagram).....	19
7.2	Diagramme de bloc interne (SysML Internal Block Diagram).....	24
7.3	Chaîne fonctionnelle.....	27
8	Modèles ET comportement EN Sysml.....	31
8.1	Système séquentiel, Diagramme d'état.....	31
8.2	Système linéaire, Diagramme paramétrique.....	33
9	Conclusion sur l'ingénierie système.....	34
9.1	Et en pratique ?.....	34

## 1 Introduction

L'enseignement des Sciences Industrielles pour l'Ingénieur vise à faire acquérir à l'étudiant de CPGE les compétences nécessaires à l'analyse, la conception et la réalisation de systèmes industriels pluritechniques répondant à un besoin exprimé par un cahier des charges.

Ce cours vise à présenter l'ingénierie système au travers de la méthode d'élaboration du cahier des charges, établissant le contrat passé entre le client et l'industriel. D'autres activités de ce domaine sont présentées faisant le lien entre le cahier des charges et la conception, la validation ou la description structurelle et comportementale du système.

Ce cours n'a pas vocation à être exhaustif car l'ingénierie système est un domaine très vaste, on présentera plutôt certaines activités clefs de ce domaine. Les autres cours de science de l'ingénieur viendront naturellement compléter certains domaines au cours de la formation.

Le SysML, un langage de communication pour l'Ingénierie Système sera introduit et utilisé dans le cadre de la présentation d'activités.

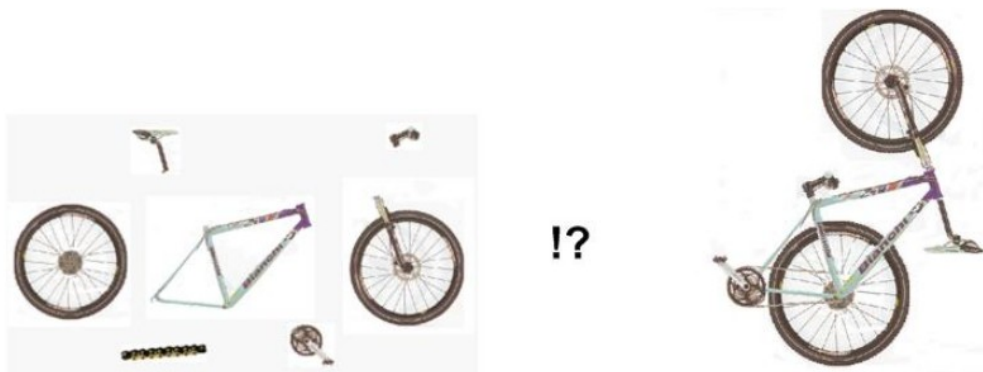
## 2 Notion de système

### 2.1 Besoin de structuration et de modélisation

#### Définition

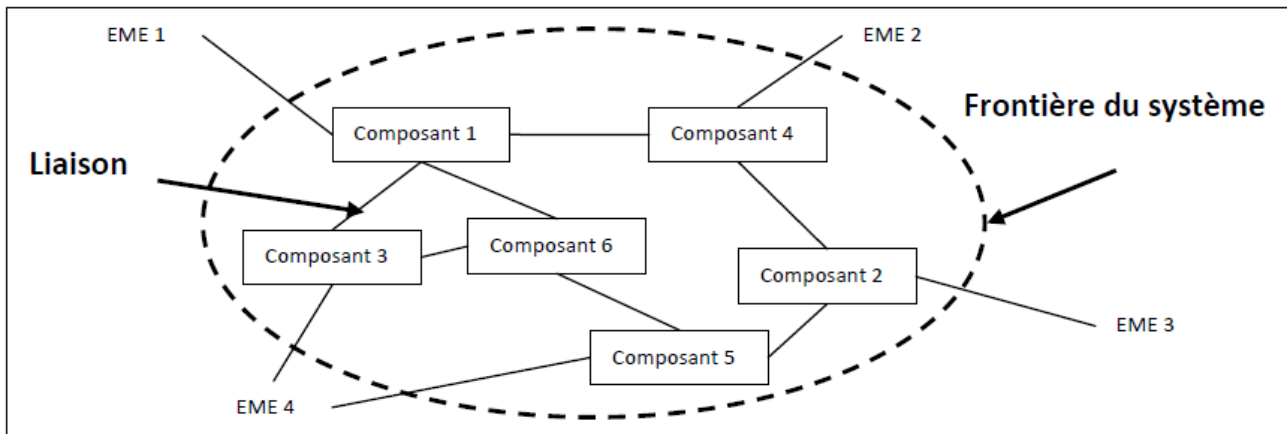
On appelle système l'**association structurée d'éléments** ayant une relation entre eux, de façon à former une entité ou un tout remplissant une ou plusieurs **fonctions**.

Un système n'est pas un ensemble, il ne suffit de connaître chaque composant individuellement pour connaître le comportement global du système.



**Figure 1 - Différents composants d'un vélo et leur assemblage.**

Pour étudier un système, il faut donc modéliser ses composants et leurs interactions. Par ailleurs, un système n'est jamais isolé de l'extérieur mais au contraire interagit avec lui. Pour étudier un système, il faut donc modéliser les relations qu'il a avec les Eléments du Milieu Extérieur (EME).



**Figure 2 - Décomposition d'un système en composants, relations entre composants et avec les éléments du milieu extérieur.**

## 2.2 Système simple / système complexe

Un système complexe s'oppose à un **système simple** pour lequel une information d'entrée permet de trouver le comportement de sortie par une analyse déductive. Les systèmes simples sont traités en sciences fondamentales et font appel à l'esprit de logique. Les problèmes sont bien posés et il y a une solution unique.

Un **système complexe** est constitué d'un grand nombre d'entités en interaction qui empêchent de prévoir son comportement par le calcul. L'analyse des systèmes complexes est réalisée en Sciences Industrielles pour l'Ingénieur. Elle nécessite de modéliser le comportement des composants du système et de leurs interactions en tenant compte des nombreux paramètres influant sur ces systèmes.

**Exemples :** le laboratoire de SII contient un certain nombre de systèmes pluri-technologiques complexes qui seront abordés lors des TD et TP :

- La cordeuse de raquette de tennis.
- Le pilote automatique de bateau.
- Le robot NAO
- La direction assistée électrique.
- La capsuleuse de bocaux

## 3 Introduction à l'Ingénierie système

### Définition

L'Ingénierie Système est une démarche méthodologique pour maîtriser la conception des systèmes et des produits complexes.

On peut aussi la définir comme une approche interdisciplinaire rassemblant tous les efforts techniques pour faire évoluer et vérifier un ensemble intégré de système, de gens, de produits et de solutions. L'ingénierie des systèmes se focalise sur la définition des besoins du client et des exigences fonctionnelles, détectés tôt dans le « cycle de vie du système », en documentant les exigences, puis en poursuivant avec la synthèse de la conception et la validation du système.

### 3.1 Justification

En 1996, le Standish Group 10 a publié des données révélatrices de la manière dont les projets industriels étaient gérés à cette époque :

- Seuls 16 % des projets sont terminés dans le respect du cahier des charges.
- 31 % des projets n'aboutissent pas.
- 45 % des projets ont un dépassement budgétaire de plus de 50 % dont 11 % avec des dépassements supérieurs à 200 % (soit plus du triple du budget initialement alloué).
- 57 % des projets ont un retard de plus de 50 % dont 10 % avec un retard supérieur à 200 % (soit plus du triple du temps initialement alloué).

Ces chiffres posent un véritable problème de définition du projet, ce qui justifie la mise en œuvre d'une démarche de réflexion et d'étude plus rigoureuse : c'est l'objectif de l'Ingénierie Système. En effet, si près d'un tiers des projets n'aboutissent pas, les causes des échecs sont diverses (les points couverts directement ou indirectement par l'Ingénierie Système sont indiqués par [IS]) :

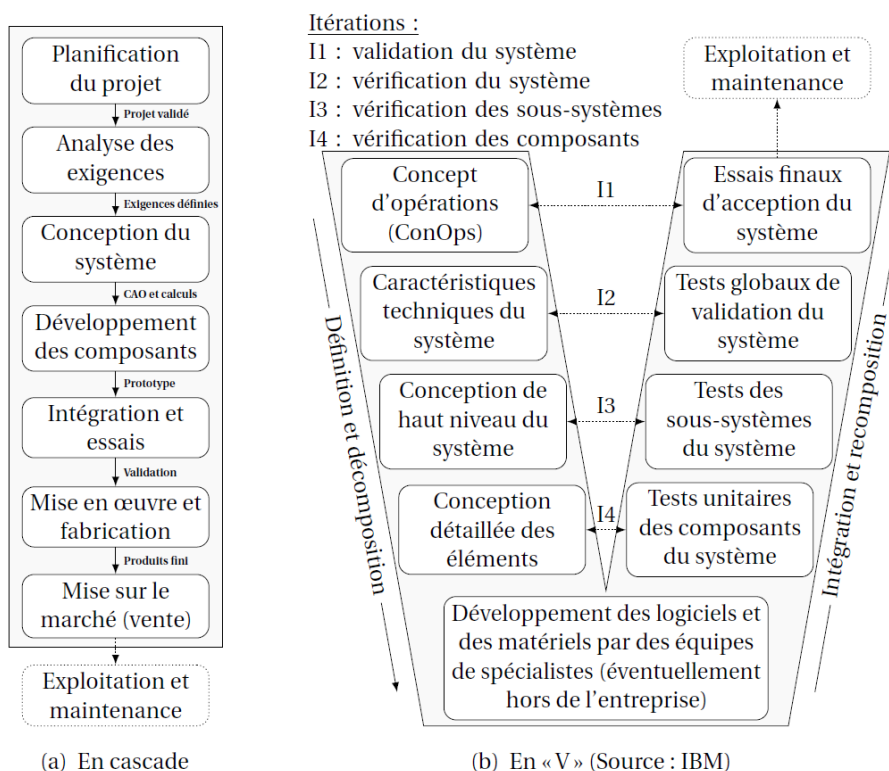
- 12,8 % : manque de prise en compte des utilisateurs [IS] ;
- 12,5 % : exigences et spécification incomplètes [IS] ;
- 11,8 % : changement des exigences et spécification au cours de la conception [IS] ;
- 7,5 % : manque de soutien de la direction ;
- 7,0 % : incompétences sur les technologies [IS] ;
- 6,4 % : manque de ressources ;
- 5,9 % : attentes non réalistes ;
- 5,3 % : objectifs non clairement explicités [IS] ;
- 4,3 % : délais non réalistes ;

Au regard de ces échecs, on constate que contrairement à l'intuition les compétences techniques ou le manque de ressources sont des causes minoritaires d'échec des projets. Une analyse du besoin exhaustive et de qualité se montre indispensable, ainsi que la qualité des spécifications qui en découlent.

## 4 Méthodes de conception/réalisation d'un produit

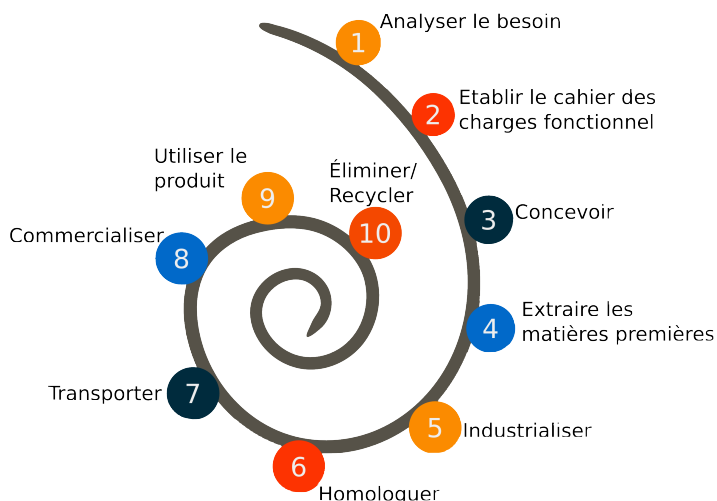
L'ingénierie de systèmes regroupe l'ensemble des activités de pilotage des projets de construction effective d'un système en s'appuyant sur sa décomposition architecturale. La conception de produit peut s'effectuer selon deux types de processus (Figure 3) :

- **en cascade**, méthode intuitive de conception linéaire dans sa démarche et sa chronologie. Adaptée à de petits projets, elle n'est pas envisageable dans une entreprise moderne confrontée à un environnement compétitif.
- **en « V »**, méthode parallèle, de travail simultané. Cette méthode permet la prise en compte de l'évolution des besoins (grande versatilité), de réduire les délais et les coûts. En effets, les différents services de l'entreprise travaillent simultanément et permettent alors la détection plus tôt des erreurs dans les choix effectués.



**Figure 3 - Processus de conception en cascade et en V.**

Il est aussi important de comprendre que la conception d'un produit est un processus itératif (Figure 4). Ces cycles peuvent être appliqués à la totalité du produit à développer ou à une partie jugée critique



**Figure 4 - Cycle de conception itératif.**

**Figure 5 - cycle de vie d'un produit.**

#### 4.1 Cycle de vie d'un produit

Lors de la conception d'un produit, il ne suffit pas de s'intéresser uniquement à l'utilisation de celui-ci une fois vendu. Il est nécessaire de prendre en compte les impacts économiques, environnementaux et sociétaux de l'ensemble des étapes de la vie de celui-ci, allant de la définition du besoin à l'élimination du produit en fin de vie afin de faire les choix les moins coûteux suivant les critères précédents. Le processus de conception est au centre du cycle de vie (le crée et en dépend).

### ***1 Analyser le besoin.***

Le client est sensible à l'évolution du contexte économique, social et environnemental ainsi qu'au degré d'innovation, le besoin évolue donc constamment

### ***2 Etablir le Cahier des Charges Fonctionnel (C.d.C.F)***

Avant d'imposer une solution, il faut se tourner vers le demandeur, pour aboutir de manière structurée à la solution. En effet, le but d'un projet est de satisfaire le besoin. Il faut exprimer clairement les objectifs à atteindre d'un projet, afin d'éviter toute confusion entre vous et le demandeur.

Ce besoin doit être exprimé dès le lancement du projet. Il s'agit d'explicitier quelle est l'exigence fondamentale qui justifie la conception du produit.

Le cahier des charges fonctionnel est un document qui permet de formaliser avec précision le besoin du demandeur. En effet, le C.d.C.F. est un tableau de bord qui définit le projet et détaille les conditions dans lesquelles il doit être réalisé. C'est le lien de compréhension entre l'entreprise et le client.

La partie technique d'un C.d.C.F. doit se limiter à énumérer les contraintes techniques avérées.

Les contraintes de base sont économiques (les contraintes monétaires comme le budget de fonctionnement), environnementales (le caractère recyclable du produit, etc.), humaines (par exemple, dans le cas d'un jouet pour enfant, il doit être léger, ne pas contenir de petites pièces, etc.), industrielles (par exemple, il doit être fabriqué au Canada) et matérielles (par exemple, il doit spécifier les morceaux qui peuvent être remplacés, comme des piles, il doit préciser le recours à tel ou tel serveur d'applications).

### ***3 Concevoir :***

A partir du cahier des charges fonctionnel, le bureau d'études (ensemble des ingénieurs en charge de la conception) modélise le produit sous forme de maquette numérique.

C'est aussi lors de cette étape que sont réalisés les calculs permettant de dimensionner les composants et valider la durée de vie

### ***4 Matières premières :***

Le choix des matières premières est important dans le cycle de vie puisqu'il conditionne le prix du produit. Il faut également penser au recyclage du produit donc aux choix des matériaux.

### ***5 Industrialiser :***

L'industrialisation est le processus de fabrication de produits avec des techniques permettant une forte productivité du travail.

### ***6 Homologuer :***

L'homologation est la certification conforme d'un produit à une norme, ou une réglementation. En d'autres termes l'homologation garantit au consommateur que le produit qu'il achète correspond à ce qu'il est en droit d'en attendre.

### ***7 Transporter :***

Le transport du produit est un point important dans l'analyse du cycle de vie du produit.

### ***8 – 9 Commercialiser, utiliser le produit :***

C'est là que l'on peut constater si le client est satisfait par le produit.

### ***10 Eliminer/Recycler :***

L'objectif actuel est de recycler un maximum de composants mais beaucoup de matériaux ne peuvent pas être recyclés.

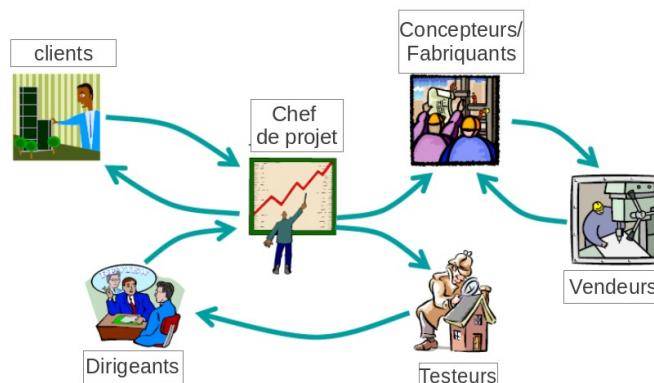
L'équipe d'ingénieurs ( ou bureau d'étude ) a en charge l'intégralité du cycle de vie du produit.
---

## 4.2 Outil de modélisation et conception : le langage SysML

Le langage SysML apparaît en 2006 pour améliorer la communication sur des systèmes complexes. C'est **un moyen de regrouper dans un modèle commun à tous les corps de métiers**, les spécifications, les contraintes, et les paramètres de l'ensemble du système.

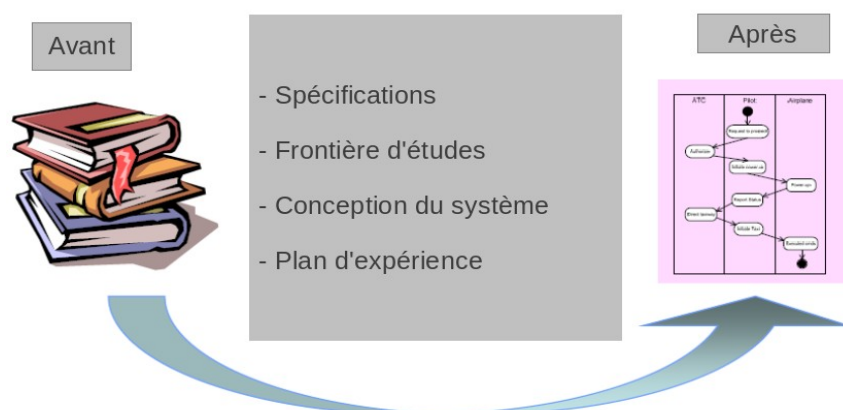
### Objectifs du SysML

- Utiliser un **langage commun** et normalisé pour tous les intervenants.
  - réduction des erreurs et des ambiguïtés
- Permettre une représentation riche et précise du besoin, des exigences et du système.
- Permettre un accès intuitif et interactif aux **informations du cahier des charges**.
- Intégrer de manière dynamique les modèles physiques du système dans sa description.
- Offrir une meilleure qualité de conception.
- Simplifier les démarches auprès de fournisseurs et prestataires de services.



**Figure 6 - Problématique de communication entre différents corps de métiers.**

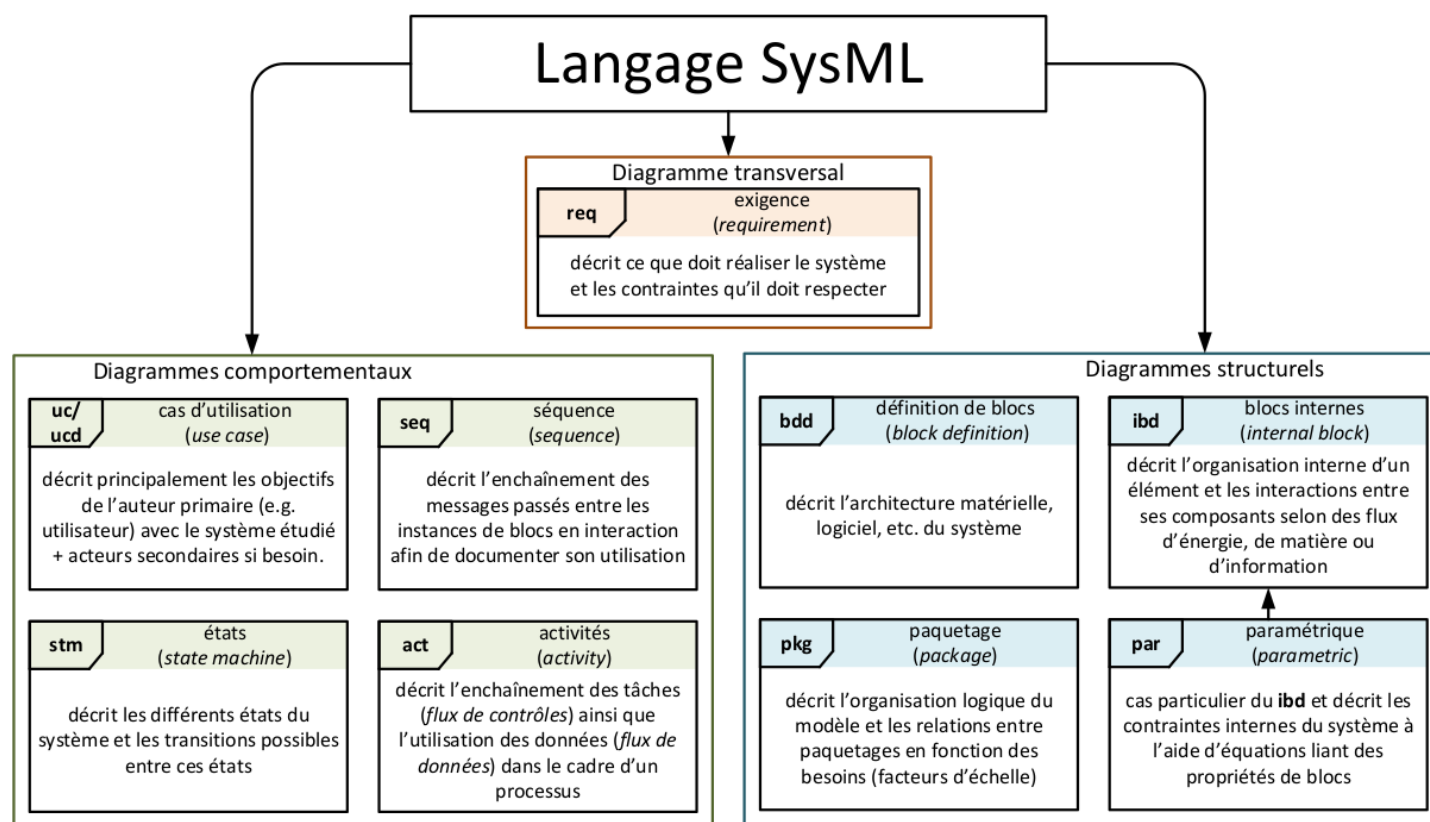
Le SysML est né d'une évolution naturelle des méthodes d'analyse. Les descriptions par schémas blocs ont d'abord supplanté les descriptions purement textuelles en favorisant la compréhension des systèmes complexes aux interactions multiples. Puis le perfectionnement de l'outil informatique, des bases de données et la nécessité d'un formalisme précis ont favorisés le développement de nouveaux langages basés la modélisation comme le SysML.



**Figure 7 - De l'analyse par dossier à celle par modèle.**

### 4.2.1 Topologie des diagrammes du langage SysML/

Le langage SysML - Systems Modeling Language - est un langage de modélisation permettant de décrire tout ou partie d'un système technique. Le langage SysML s'articule autour de neuf types de diagrammes répertoriés sur la figure ci-dessous.



**Figure 8 - Architecture langage SysML.**

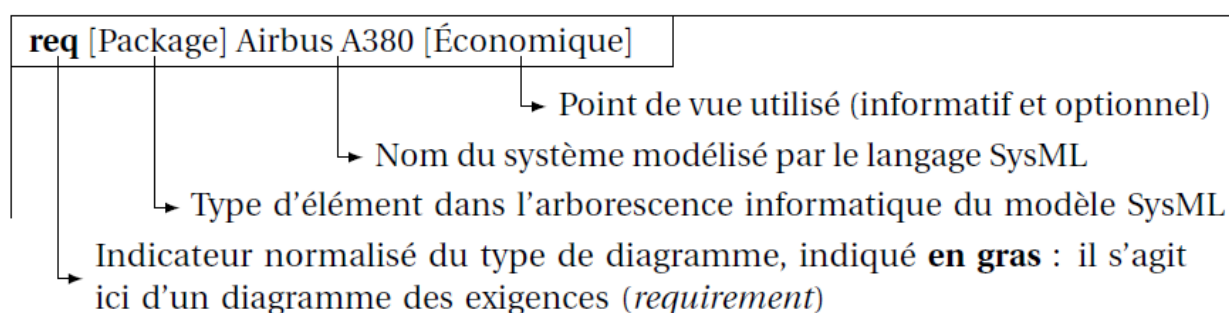
### 4.2.2 Origine et principe du langage

SysML est un langage dérivé du langage de modélisation pour l'ingénierie logicielle U.M.L., il est supervisé par l'Object Management Group. Il a en commun avec celui-ci de nombreux diagrammes mais surtout la même approche « modèle objet ». Ainsi il réutilise les notions d'objets, de classe et d'instance propre à cette modélisation.

### 4.2.3 Eléments graphique des diagrammes

#### Information relative au diagramme

Chaque diagramme SysML représente un élément particulier du modèle selon un certain point de vue : afin de le repérer, chaque diagramme comporte un « cartouche », positionné sur la partie supérieure gauche du cadre.











Il est recommandé de faire figurer des informations additionnelles sur les diagrammes pour lever les ambiguïtés

(utilisation de « post-it »)

Concerne  
uniquement la partie  
affichage de l'heure

### Formes géométriques et liens

Les neuf diagrammes du langage SysML sont composés des mêmes types de formes géométriques : des rectangles à coins droits ou arrondis, des ellipses et des lignes. Selon les diagrammes, tout ou partie de ces formes géométriques seront utilisées. Plusieurs types de relations peuvent être rencontrés entre les formes géométriques dans les diagrammes SysML : le tableau suivant regroupe les liens les plus classiques.

Lien	Signification et commentaires
	La relation de <b>contenance</b> (aussi appelée inclusion) est représentée par une ligne continue terminée par un cercle contenant une croix du côté du conteneur : elle permet de décomposer une exigence en plusieurs autres plus faciles ensuite à identifier lors de la mise en place du système ou des tests.
	La relation d' <b>association</b> permet de relier deux éléments considérés d'égale importance et elle indique qu'ils sont en lien sans en indiquer la nature. Cette relation peut être unidirectionnelle (dans ce cas elle prend une flèche pour indiquer le sens) ou bidirectionnelle (dans ce cas il n'y a pas de flèche).
	Les relations d' <b>inclusion</b> , d' <b>extension</b> , de <b>raffinement</b> ou de <b>dérivation</b> d'un cas d'utilisation ou d'une exigence dans un(e) autre sont représentées par une flèche pointillée à pointe ouverte orientée : <ul style="list-style-type: none"> <li>• du cas d'utilisation global vers un cas d'utilisation partiel inclus avec le mot clé <i>include</i> pour l'inclusion ;</li> <li>• du cas d'utilisation partiel vers le cas d'utilisation global avec le mot clé <i>extend</i> pour l'extension ;</li> <li>• de l'exigence partielle vers l'exigence globale avec le mot clé <i>refine</i> pour l'ajout de précisions, par exemple des données quantitatives, pour le raffinement ;</li> <li>• de l'exigence partielle vers l'exigence globale avec le mot clé <i>deriveReq</i> pour relier de manière dérivée des exigences de niveaux différents, par exemple entre un système et certains de ses sous-systèmes.</li> </ul>
	La relation de <b>généralisation</b> (ou de spécialisation) indique une spécialisation d'un élément (cas d'utilisation, bloc, etc) : elle est représentée par une flèche continue dont la pointe blanche est orientée vers l'élément plus général.
	La relation de <b>composition</b> permet de relier deux blocs et elle indique qu'un élément est structurellement indispensable à l'autre ; elle est représentée par une flèche dont le losange plein est du côté du composé (ou système principal), l'autre extrémité du côté du composant.
	La relation d' <b>agrégation</b> a le même rôle que la relation de composition mais elle a un sens moins fort : en général, elle indique que le composant est présent de manière optionnelle ; sa représentation est identique à la composition, mais avec un losange vide du côté du composé (ou système principal), l'autre extrémité du côté du composant.

#### 4.2.4 Ingénierie système et SysML, cas d'application.

Dans suite de ce cours nous présenterons des activités de l'ingénierie système et quel rôle peut jouer le langage SysML dans celles-ci.

#### Remarque

Une qualité essentielle du SysML est que tous les diagrammes créés constitueront autant de point de vue d'un même modèle. C'est cette unicité qui permet la qualité de l'interaction entre les intervenants.

Les activités présentées sont :

- Une méthode d'analyse du besoin
- Le lien entre l'analyse du besoin et la conception (plus validation du système).
- La description structurelle d'un système
- La description comportementale.

Par soucis de cohérence, un exemple commun aux activités présentées est choisi, le radio réveil à affichage mural :



**Figure 9 - Exemple retenu : radio réveil.**

## 5 Analyse du besoin avec sysml

Les systèmes industriels sont créés pour satisfaire un besoin, l'objectif de l'industriel est donc de caractériser (qualifier et quantifier) le besoin exprimé par un client potentiel.

Norme	Un besoin est une nécessité ou un désir éprouvé par un utilisateur (selon la norme « NF X 50-150 »).
-------	--

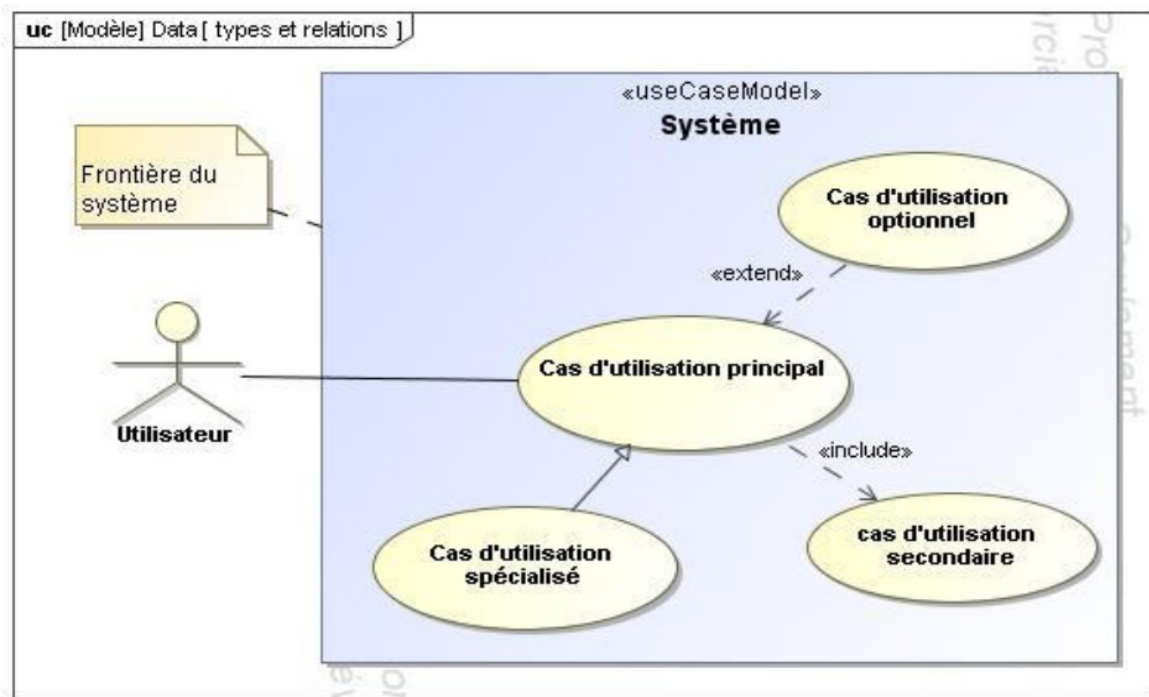
Les besoins des clients potentiels évoluent au cours du temps. Ils sont fonctions de nombreux paramètres : socio-économiques, effets de mode, contexte mondial, ... Les besoins évoluent mais les produits s'adaptent pour toujours essayer de leur répondre. L'entreprise doit donc anticiper sur les produits de demain.

La méthode d'analyse du besoin proposée repose sur l'utilisation de 3 diagrammes SysML :

Fonction	Diagramme SysML
Expression du besoin	Diagramme des cas d'utilisation
Expression du fonctionnement souhaité	Diagramme de séquence
Expression des contraintes (cahier des charges)	Diagramme d'exigence

Après une définition du besoin ces 3 diagrammes sont présentés et finalement la méthode sera explicitée.

### 5.1.1 Diagramme des cas d'utilisation (SysML Use Case Diagram)



**Figure 10 Diagramme des cas d'utilisation générique**

#### Objectif

Il représente les services attendus du système à l'étude.

Les cas d'utilisation représentent un ensemble de séquences d'actions qui sont réalisées par le système et qui produisent un résultat observable pour un acteur particulier.

#### **Rôle du diagramme des cas d'utilisation :**

- Montre les fonctionnalités offertes par le système. Il répond à la question : "quels services rend le système ?".
- Fonctionnalité = cas d'utilisation = service rendu en autonomie d'un bout à l'autre par le système.
- Le résultat est visible par l'acteur (entité extérieure en interaction avec le système).

Le cadre entourant les cas d'utilisation symbolise la frontière du système.

- Cela englobe tout ce qui n'est pas présent avant l'installation du système.
- Le reste représente un acteur (primaire ou secondaire).

Cet acteur peut être:

- Des utilisateurs humains directs (tous les profils sont possibles sans oublier l'administrateur ou l'opérateur de maintenance)
- D'autres systèmes connexes qui interagissent avec le système étudié.

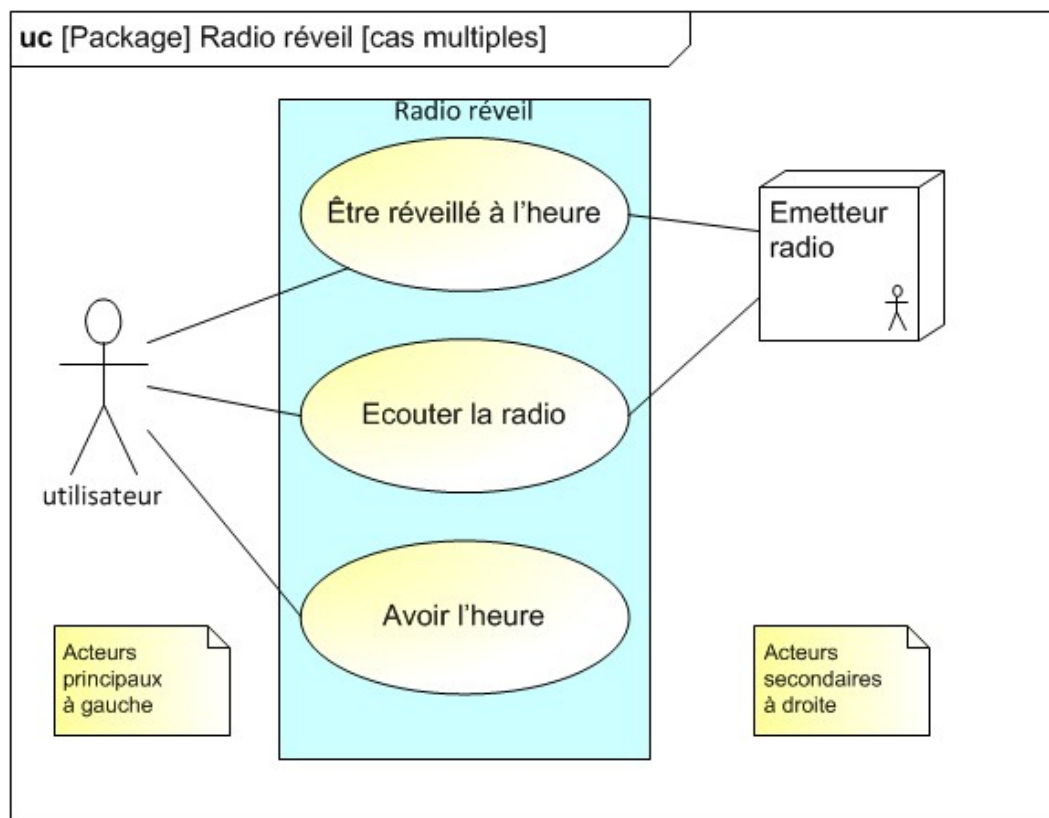
Ces acteurs peuvent être acteurs principaux placés à gauche de la **frontière du système** ou acteurs secondaires à droite.

Les cas d'utilisations peuvent être reliés entre eux par des relations de:

- une relation d'inclusion avec le stéréotype «include»
- une relation d'extension avec le stéréotype «extend»
- une relation de généralisation/spécialisation (flèche blanche)

Limites et préconisation :

- Le diagramme de cas d'utilisation ne montre pas ce qui est réalisable sur le système (le nettoyer, l'accrocher, le recycler, etc). Un système ne se recycle pas tout seul, recycler n'est donc pas un cas d'utilisation.
- De même, la maintenance peut éventuellement apparaître si elle correspond bien à un service rendu par le système en autonomie (exemple : test automatique des différents capteurs/actionneurs, consulter le niveau de charge d'une batterie, ...)
- Les systèmes présents dans les laboratoires sont simples. Il y aura donc en général peu de cas d'utilisation (sauf exception, 3 ou 4 mais plutôt 1 ou 2).



**Figure 11 Cas d'utilisations pour le radio réveil**

## 5.2 Diagramme de séquence (SysML Sequence Diagram)

Le diagramme de séquence définit un comportement du système répondant au cahier des charges et aux différentes fonctions techniques qui devront être réalisées.

Il montre la séquence verticale des messages passés entre éléments (lignes de vie) au sein d'une interaction. Ce diagramme s'occupe des échanges passés entre le système et l'extérieur sans savoir ce qui se passe à l'intérieur du système.

### Rôle du diagramme de séquence

- Pour chaque cas d'utilisation il décrit les messages et les événements qui interviennent entre les acteurs (primaires ou secondaires) et le système.
- Montre les interactions entre différents éléments d'un point de vue séquentiel, enchaînement et nature des échanges.

Dans un premier temps il est préférable de faire un diagramme de séquence « système », celui-ci étant vu comme une boîte noire. Pour des détails vous pouvez ensuite montrer les interactions au sein du système (décomposé en ses différents éléments).

**Ligne de vie :** représentation de l'existence d'un élément participant dans un diagramme de séquence. Une ligne de vie possède un nom et un type. Elle est représentée graphiquement par une ligne verticale en pointillés.

**Message :** Élément de communication unidirectionnel entre lignes de vie qui déclenche une activité dans le destinataire. La réception d'un message provoque un événement chez le récepteur. La flèche pointillée représente un retour. Cela signifie que le message en question est le résultat direct du message précédent. Un message synchrone (émetteur bloqué en attente de réponse) est représenté par une flèche pleine, alors qu'un message asynchrone est représenté par une flèche évidée. La flèche qui boucle (message réflexif) permet de représenter un comportement interne.

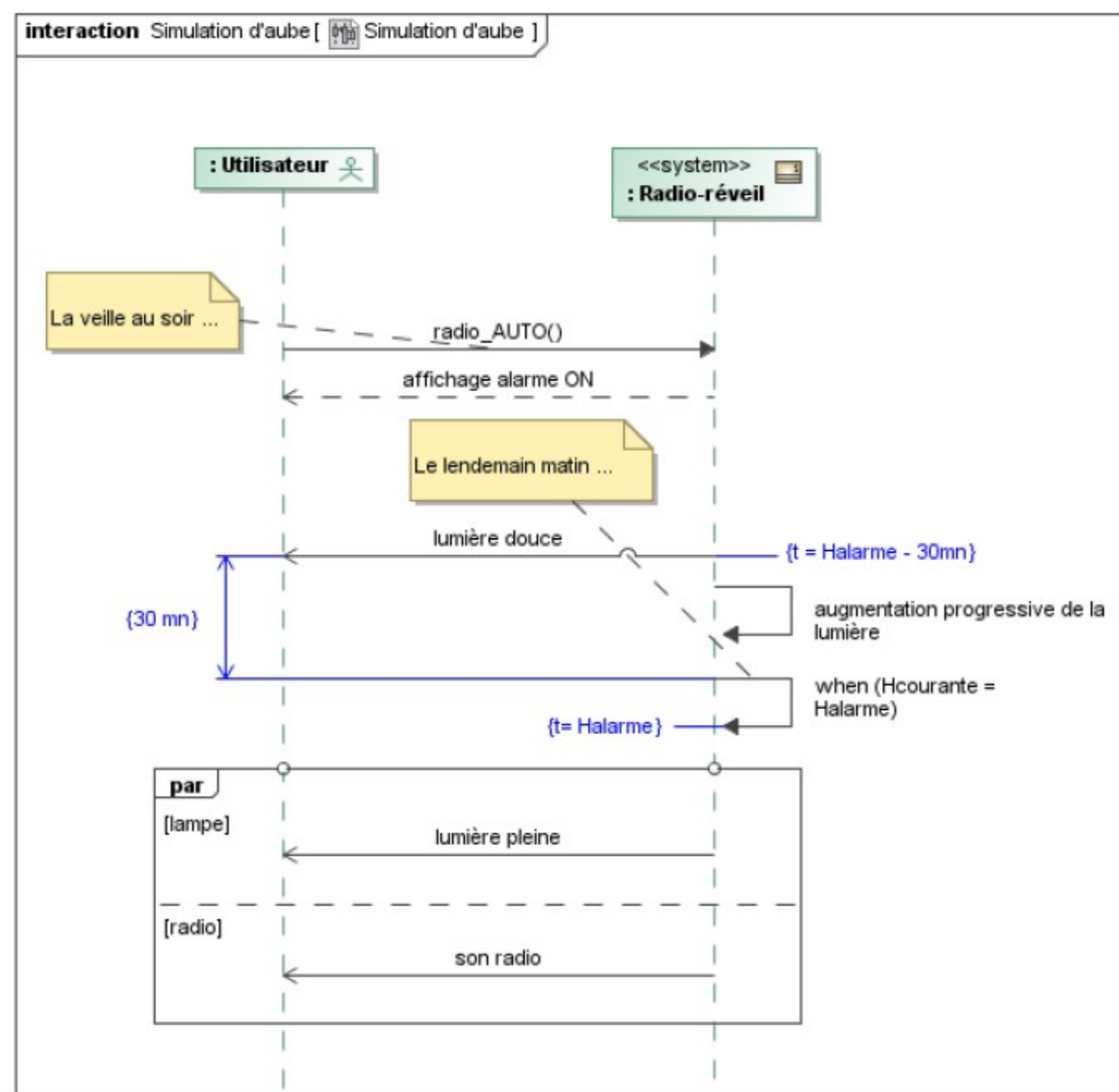
**Activation :** Les bandes verticales le long d'une ligne de vie représentent des périodes d'activation. Elles sont optionnelles, mais permettent de mieux comprendre la flèche pointillée du message de retour. Toutefois, dans un souci de simplicité, nous ne l'utiliserons généralement pas.

**Fragments combinés :** SysML propose une notation très utile, le fragment combiné. Chaque fragment possède un opérateur et peut être divisé en opérandes. Les principaux opérateurs sont :

- **loop** = boucle. Le fragment peut s'exécuter plusieurs fois, et la condition de garde explicite l'itération.
- **opt** = optionnel. Le fragment ne s'exécute que si la condition fournie est vraie.
- **alt** = fragments alternatifs. Seul le fragment possédant la condition vraie s'exécutera.
- **par** = fragments parallèles s'exécutant simultanément.

**Limites et préconisation**

- Il existe les fragments combinés pour montrer des variantes dans un scénario. Cela doit être utilisé avec parcimonie car les diagrammes de séquence ne sont pas des algorithmes.
- Un scénario se décrit dans un cadre bien précis. Vous aurez donc des scénarios de réussite et des scénarios d'échecs (gestion des problèmes).

**Figure 12 Diagramme de séquence, Exemple**

### 5.3 Diagramme d'exigences (SysML Requirements Diagram)

Le diagramme d'exigences est le document le plus adapté à l'expression du cahier des charges. Pour chacune des exigences exprimées sont définis les critères d'appréciation et les niveaux correspondants. Il peut être considéré comme le contrat à remplir par l'industriel développant le produit répondant au besoin du demandeur.

**Définition**

Une exigence permet de spécifier une capacité ou une contrainte qui doit être satisfaite par un système.

Rôle du diagramme d'exigence : représenter toutes les exigences du système.

- Exigences environnementales
- Exigences économiques
- Exigences fonctionnelles
- Exigences techniques

Contenu et propriétés de base d'une exigence :

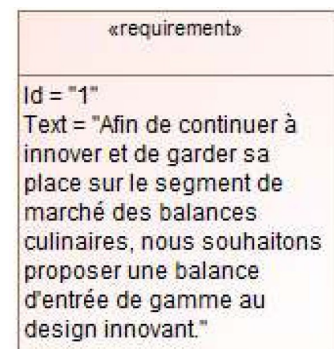
- Un titre unique
- Un identifiant unique
- Un texte court et concis

Il est également possible de rajouter :

- priorité (haute, moyenne, basse)
- source (client, marketing,...)
- risque (haut, moyen, bas)
- statut (proposée validé, ...)
- méthode de vérification

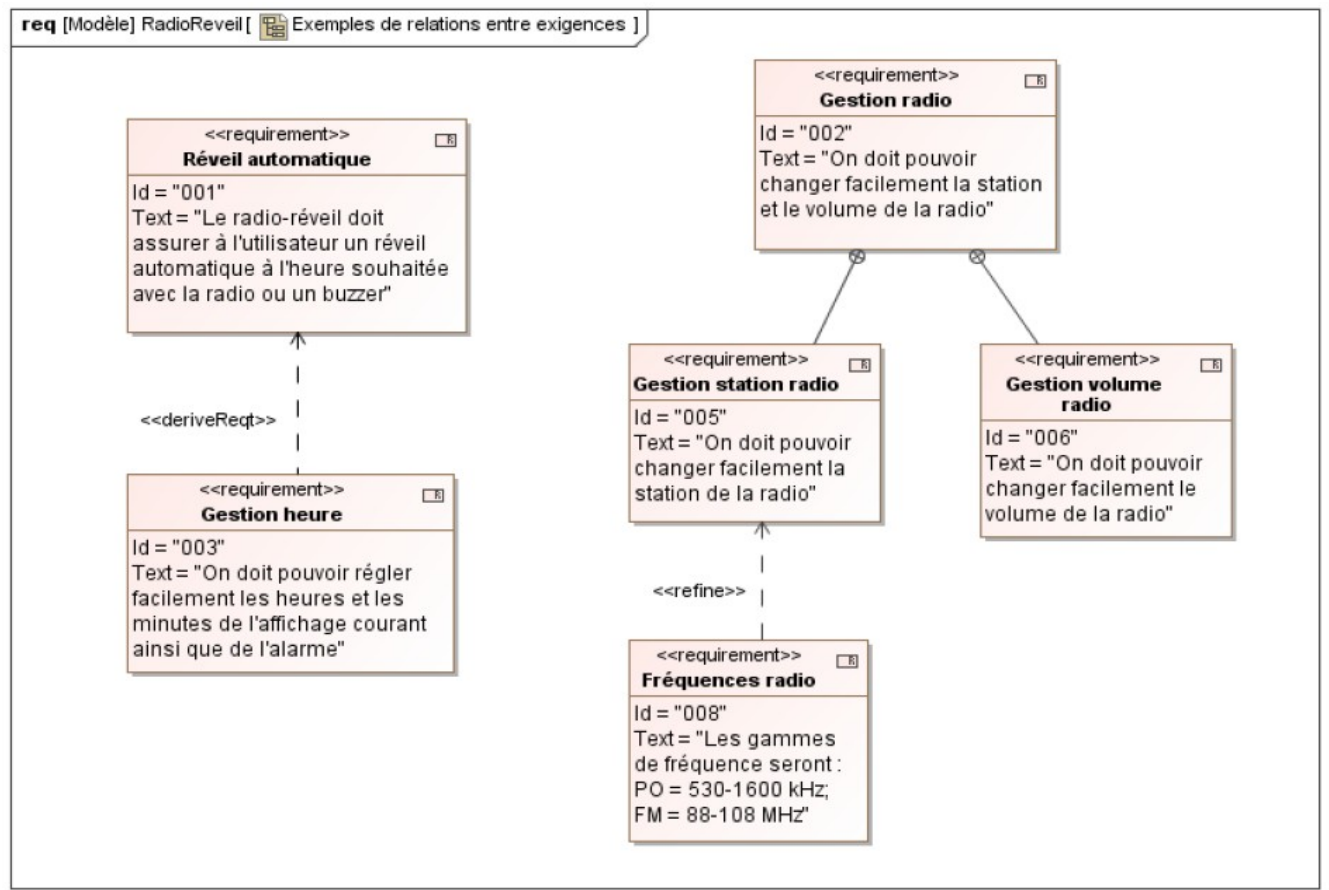
Les exigences peuvent être reliés entre elles par des relations de :

- La contenance : permet de définir une sous-exigence (Ligne continu terminée par un cercle contenant une croix)
- Le raffinement : consiste en l'ajout de précision (Défini par une flèche pointillé avec le stéréotype "refine")
- La dérivation : consiste à relier des exigences à des niveaux différents (Défini par une flèche pointillé avec le stéréotype "deriveReq")



**Figure 13 - Représentation d'une exigence.**



**Exemple du radio réveil :****Figure 14 Diagramme d'exigences****Limites et préconisation :**

- Ne pas chercher à poser toutes les exigences sinon illisible.
- Réaliser plusieurs diagrammes d'exigences si nécessaire.
- Regrouper les exigences techniques sur un seul diagramme par exemple.
- puis les autres groupes d'exigences sur d'autres diagrammes.



## 5.4 Méthode d'analyse du besoin.

---

La méthode présentée est adaptée au langage SysML, néanmoins d'autres méthodes sont envisageables, que ce soit en SysML ou avec d'autres techniques de communication.

1. Une liste des acteurs, humains ou non, avec leurs définitions est établie. Ce sont les fondations du diagramme des cas d'utilisation.
2. La fonction principale est définie et ajoutée au diagramme des cas d'utilisation. Elle lie tout ou partie des acteurs. **Le besoin est exprimé.**
3. Les actions entre les acteurs et le système sont définies. Le diagramme de séquence est particulièrement adapté et permettra notamment d'établir les chronologies des interactions. **C'est l'expression du fonctionnement souhaité.**
4. Les **exigences externes** sont listées et caractérisées dans le diagramme d'exigence pour **exprimer le cahier des charges.**

Cette méthode permet de mieux cerner les attentes du client. Le langage SysML facilite l'accès à ces informations et son interactivité (entre les différents diagrammes) garantit la cohérence. Au final, cette méthode implique une conception au plus proche des attentes formulées.

## 6 SysML pour la conception

---

La démarche de conception doit être guidée par l'analyse du besoin. Ainsi, les éléments du diagramme des exigences peuvent être liés aux solutions techniques choisies présentées sous forme de blocs. C'est un bon exemple de l'utilisation de SysML comme langage entre différentes activités.

Sur les exemples de la page suivante, on voit sur que le diagramme d'exigence peut non seulement se traduire en solutions techniques et en contraintes de conception (encombrement par exemple) mais qu'il va permettre aussi de définir des contraintes de conception pour les logiciels du système. On voit aussi comment le diagramme d'exigences peut être utilisé pour la validation du système en permettant la spécification de cas tests.

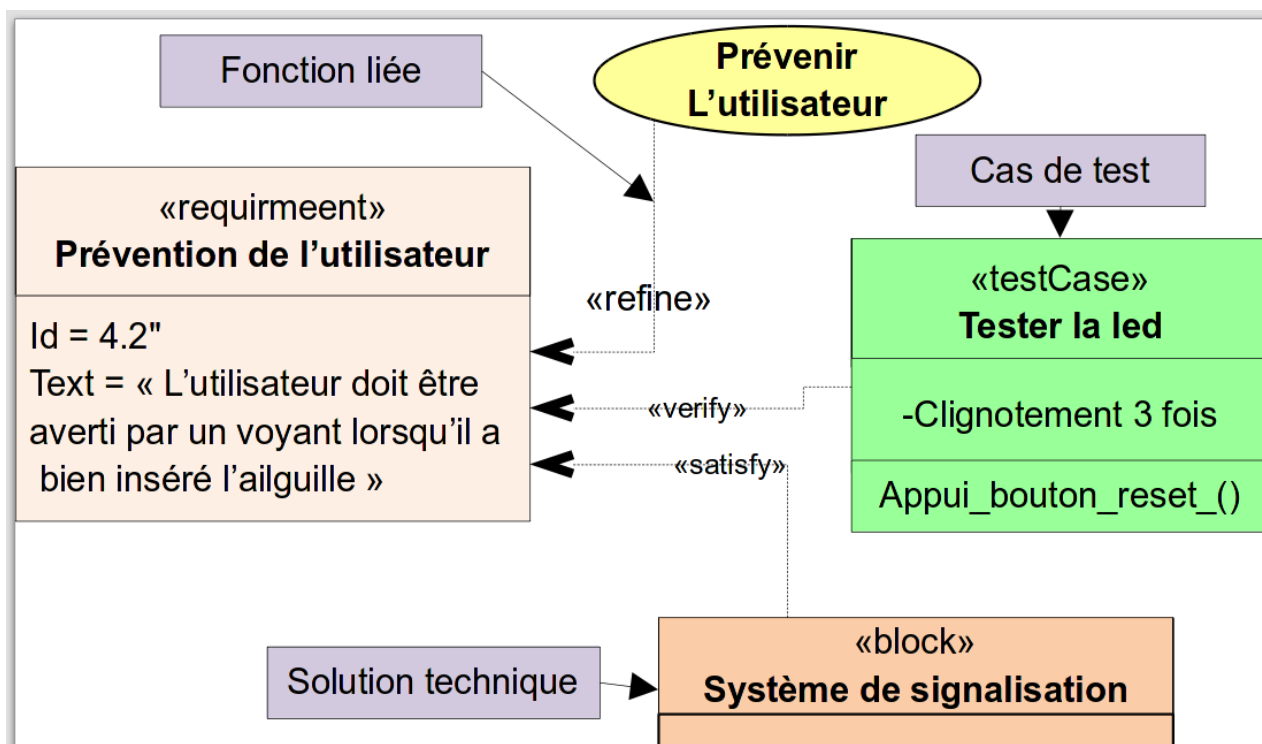


Figure 15 Diagramme des exigences et solutions techniques

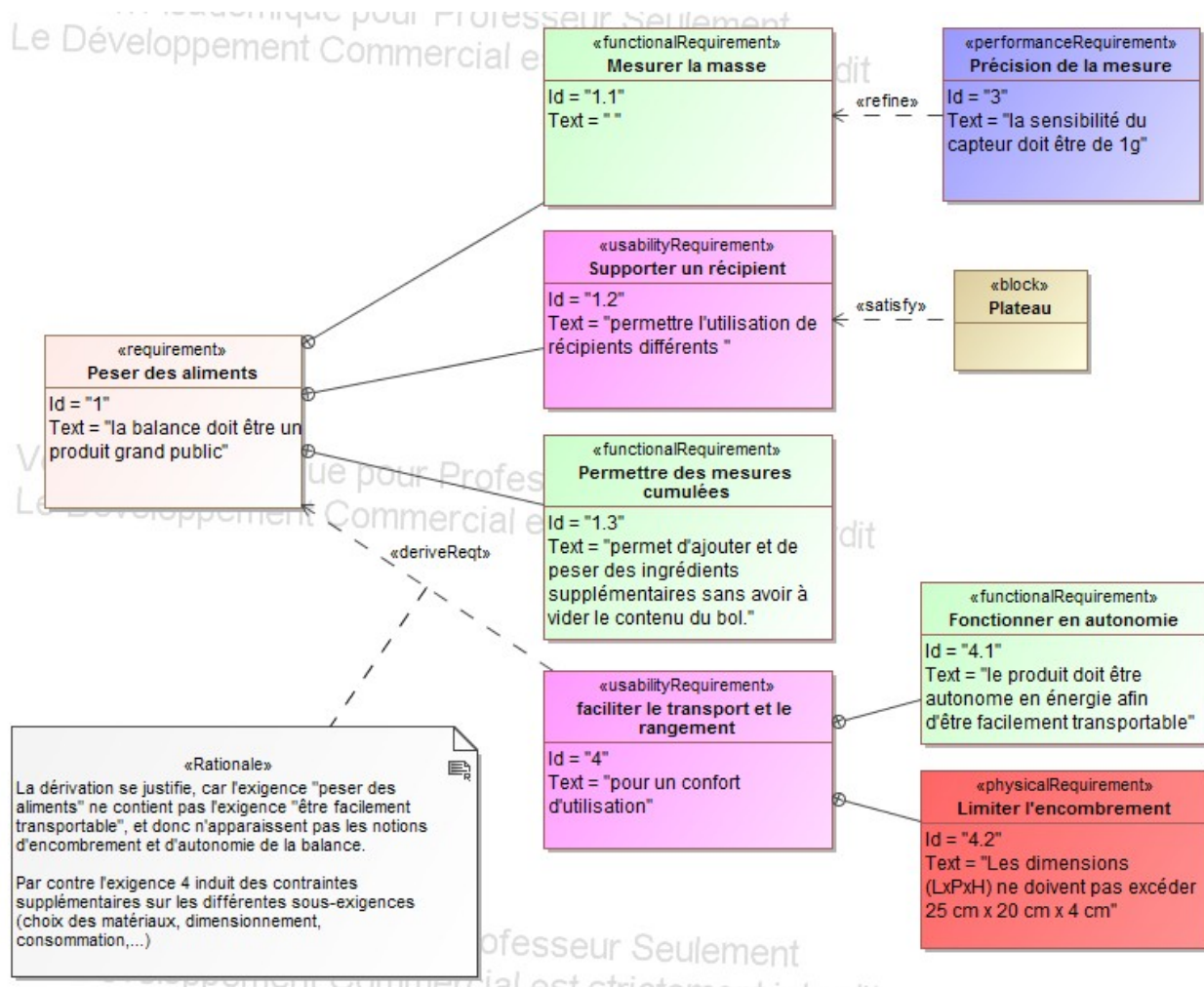


Figure 16 Balance : Exigences et solutions techniques pour une balance.

## 7 Frontière de l'analyse et structure DU système

L'architecture structurelle est une carte abstraite du système. Elle est indispensable dans plusieurs phases de conception. Lors des choix techniques, les différentes solutions envisagées doivent pouvoir être comparées aisément, en termes de caractéristiques et de coût par exemple. Les phases de modélisation ou de validation par les essais demandent aussi un accès simple aux informations sur les constituants du système. Comparé à une documentation technique linéaire qui liste les éléments, les avantages d'une description du type SysML sont multiples, par exemple :

- On peut aisément choisir de visualiser le niveau de détail qui nous concerne. Par exemple, l'engrenage du motoréducteur d'essuie-glace d'un véhicule peut ne pas vous intéresser si vous êtes chargé du choix du matériau du pare-chocs.
- La composition des systèmes et sous-systèmes est facilement accessible ainsi que les associations physiques entre les éléments.
- Des relations complexes peuvent être exprimées simplement : les transferts d'énergie, de matière ou d'information entre les éléments sont explicites.

Il est aussi important pour focaliser les moyens de développement sur les problématiques qui concernent notre activité de définir avec précision les frontières de l'analyse. Pour cela les diagrammes de structure sont parfaitement adaptés.

### 7.1 Diagramme de définition de bloc (SysML Block Definition Diagram).

Le diagramme de blocs permet de prendre connaissance de la structure interne du système. Il permet de répondre à la question « **qui contient quoi ?** » ou « **qui est composé de quoi ?** ». C'est un diagramme qui se classe donc dans la catégorie des diagrammes structurels. Il est relativement simple, même s'il est possible de détailler encore et encore par niveaux successifs.

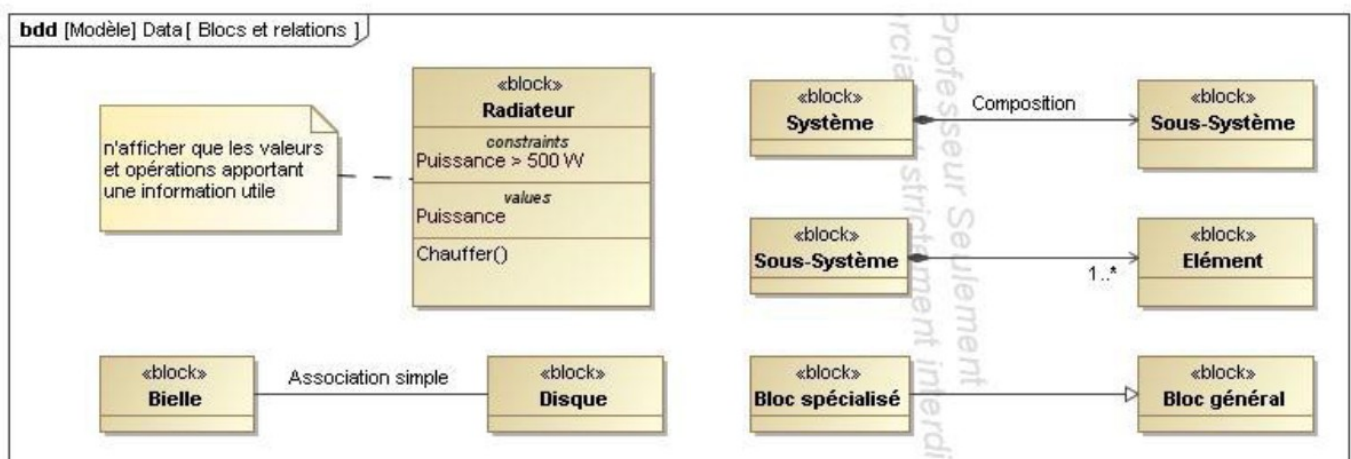


Figure 17 Diagramme de définition de bloc, Exemple

### Rôle du diagramme de bloc :

- Le bloc SysML (« bloc ») constitue la brique de base pour la modélisation de la structure d'un système. Il peut représenter un système complet, un sous-système ou un composant élémentaire.
- Les blocs sont décomposables et peuvent posséder un comportement. Le diagramme de définition de blocs (block definition diagram ou bdd) décrit la hiérarchie du système et les classifications système/composant.
- Le bloc permet de décrire également les flots qui circulent à travers un système.

On peut s'en servir pour représenter des entités physiques, mais aussi des entités logiques ou conceptuelles. Représentation d'un bloc :

### Représentation d'un bloc :



Figure 18 Bloc, Exemple

Les propriétés sont les caractéristiques structurelles de base des blocs. Elles peuvent être de deux types principaux :

- les valeurs (value properties) décrivent des caractéristiques quantifiables en terme de valeur types (domaine de valeur, dimension et unité optionnelles) ;
- les parties (part properties) décrivent la hiérarchie de décomposition du bloc en termes d'autres blocs.

### Relation entre blocs :

- La composition : c'est une relation forte. Elle indique qu'un bloc a nécessairement besoin du sous-bloc, comme élément de structurel.

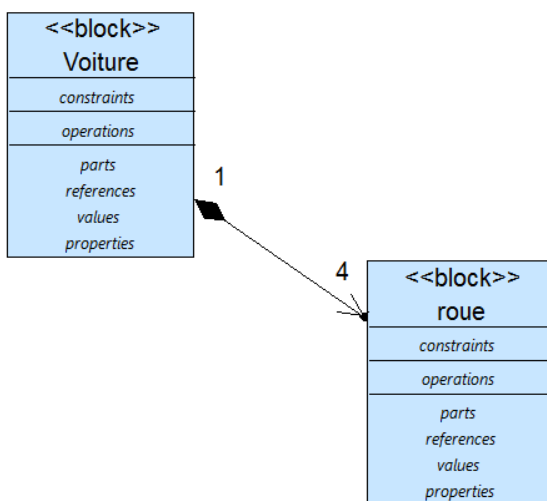


Figure 19 Relation de composition

- L'agrégation : c'est une relation moins forte qui n'implique pas d'obligation.

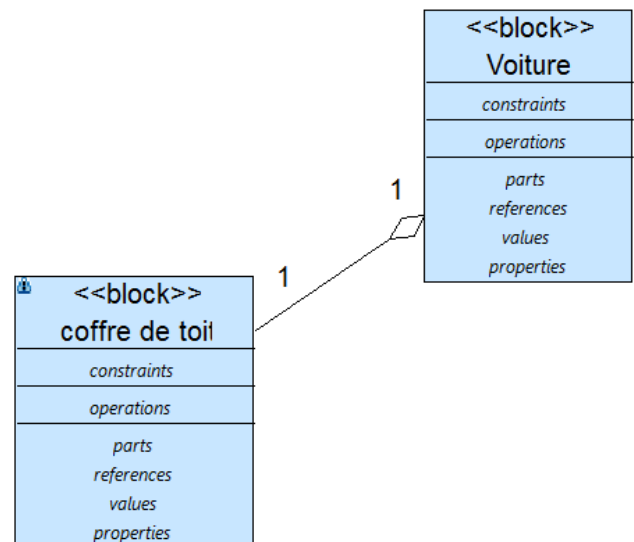


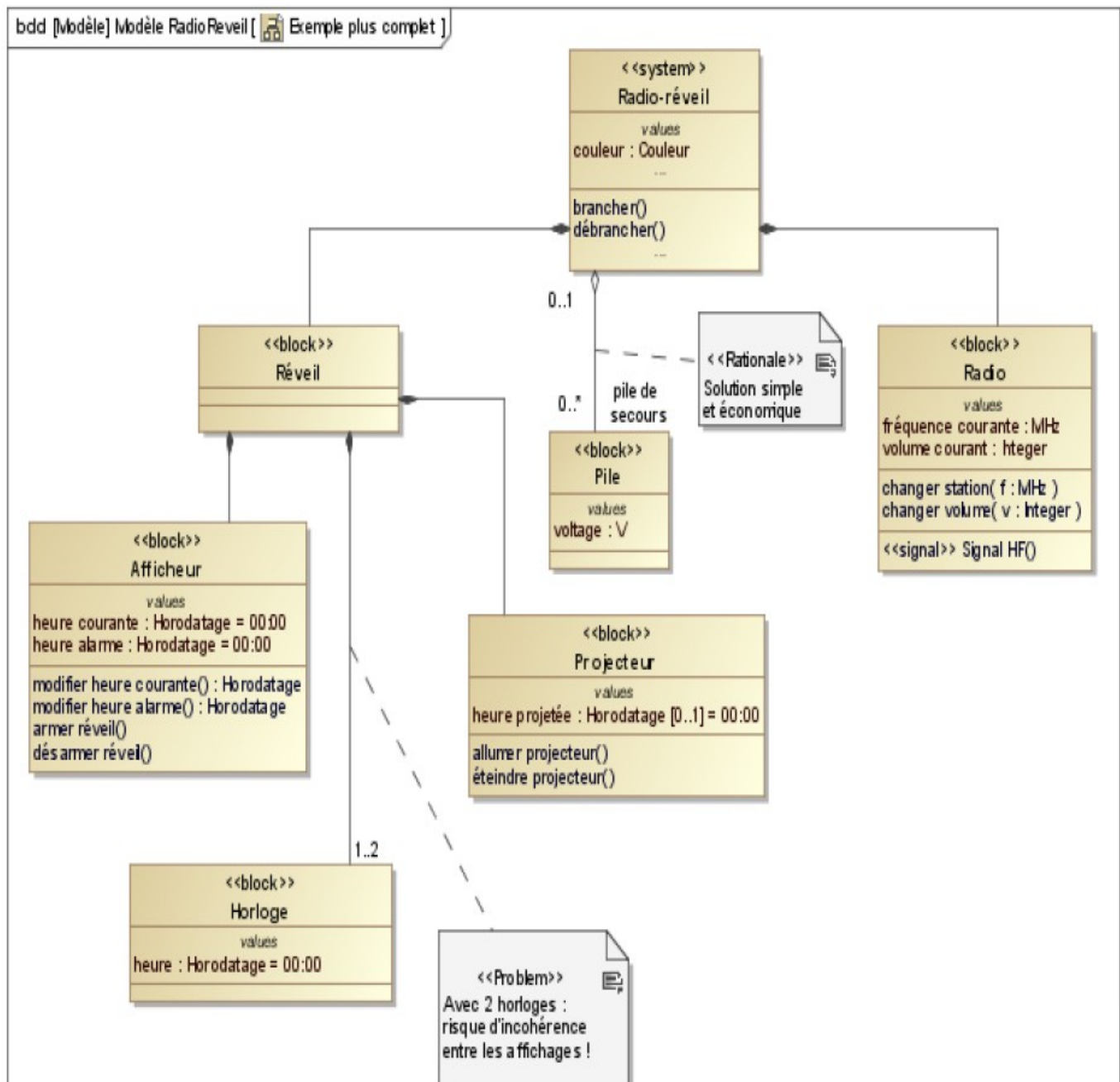
Figure 20 Relation d'agrégation

- L'association : une simple ligne reliant les 2 blocs représente ce lien. Au contraire des autres, cette relation n'implique pas de contenance. La nature du lien peut dépendre du contexte. On peut ajouter des flèches aux extrémités dans le cas où la relation est unidirectionnelle.

**Multiplicités d'une relation :** Aux deux extrémités d'une relation, on doit faire figurer une indication de multiplicité. Elle spécifie sous la forme d'un intervalle le nombre d'instances qui peuvent participer à une relation avec une instance de l'autre bloc dans le cadre d'une association.

**Une instance** est un exemplaire d'un certain bloc possédant une identité propre.

Exemple : une personne peut posséder plusieurs voitures (entre zéro et un nombre quelconque) ; une voiture est possédée par une seule personne.



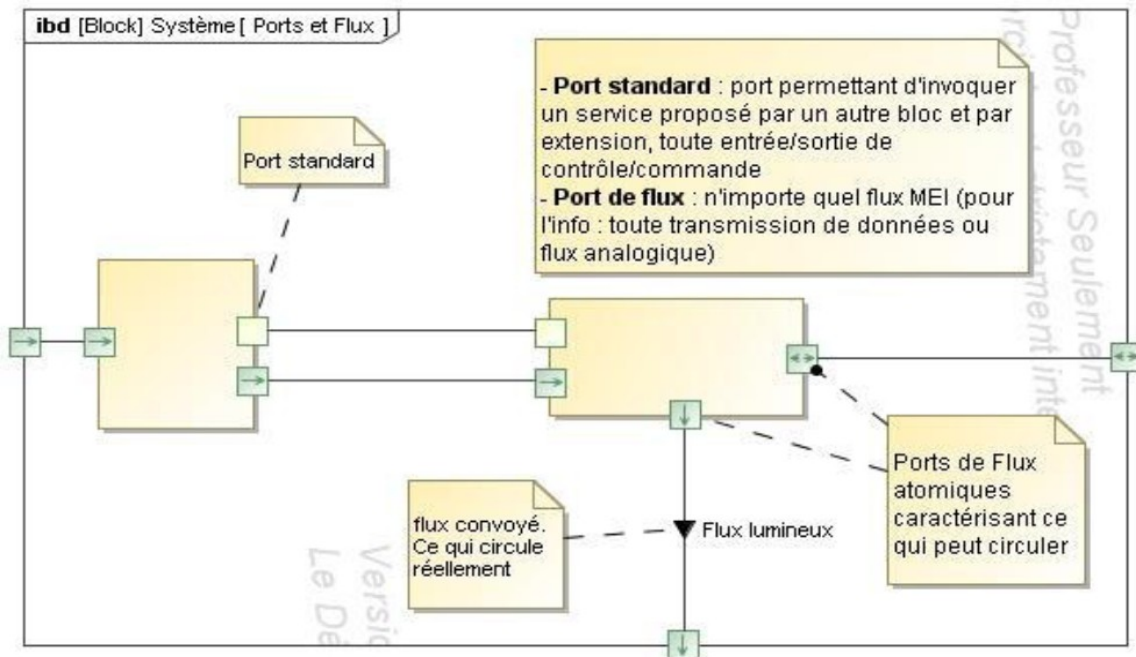
**Figure 21 Diagramme de bloc, exemple**

#### Limites et préconisation :

- La question du zoom est importante. Même si on peut descendre assez bas dans les détails, il ne sera pas toujours pertinent de le faire. Ce diagramme est utile pour montrer « les grosses briques » du système.
- Il n'est pas obligatoire de faire apparaître les propriétés et les opérations dans chaque bloc. Dans ce cas, le diagramme est relativement pauvre en informations, mais il offre en un coup d'œil la visualisation de la structure physique du système.

## 7.2 Diagramme de bloc interne (SysML Internal Block Diagram).

Le diagramme de blocs internes a un rôle différent du diagramme de blocs. C'est un diagramme d'instances de blocs.



**Figure 22 - Diagramme de bloc interne générique.**

### Rôle du diagramme de bloc interne

- Permet de représenter les échanges de matière/information/énergie entre blocs de même niveau grâce aux ports de flux (petit carré avec une flèche).
- Permet de représenter les services invoqués par un autre bloc grâce aux ports standards (petit carré sans flèche), et par extension toute entrée/sortie de contrôle/commande.
- Permet de représenter les liens entre les blocs de même niveau.

### Les ports (appliqué à l'exemple moteur thermique Figure 23)

- Les ports de flux (*Flow Port*) sont des ports par lesquels circulent de la matière, de l'information ou de l'énergie :
  - Flux entrants : carburant, oxygène (comburant), électricité (si on considère le moteur comme un tout et donc contenant un démarreur sans la batterie).
  - Flux sortants : gaz d'échappement ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , particules, etc), énergie mécanique, énergie thermique, énergie électrique (si on considère le bloc moteur comme un tout et donc une boîte noire contenant un variateur).
- Les ports standards : ils représentent tout ce qui n'est pas un flux. Ils sont plutôt utilisés pour montrer les « services » qu'un bloc offre ou fournit.

### Les interfaces Figure 24

Elles ont le même rôle d'échange de services que les ports standard mais permettent de les regrouper et de préciser la nature de l'interface. Comme le montre la figure 24 plusieurs notations sont possibles.



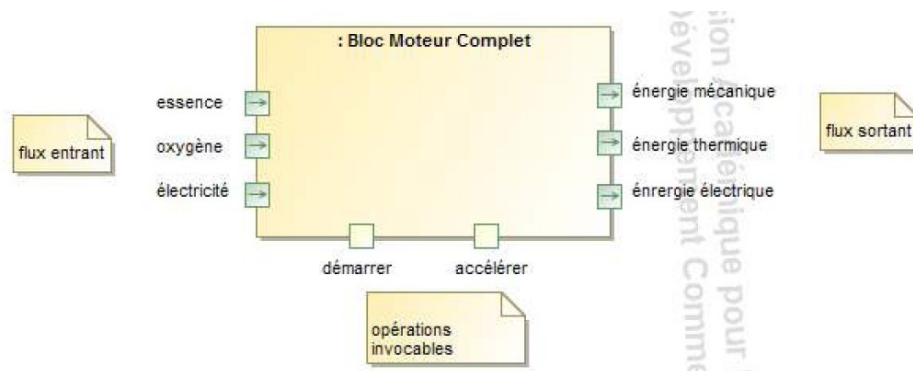


Figure 23 - représentation d'un bloc interne.

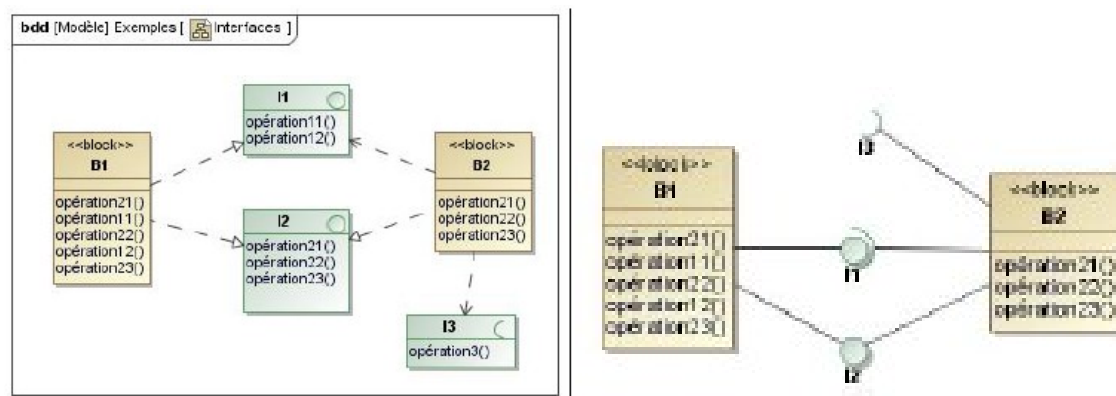
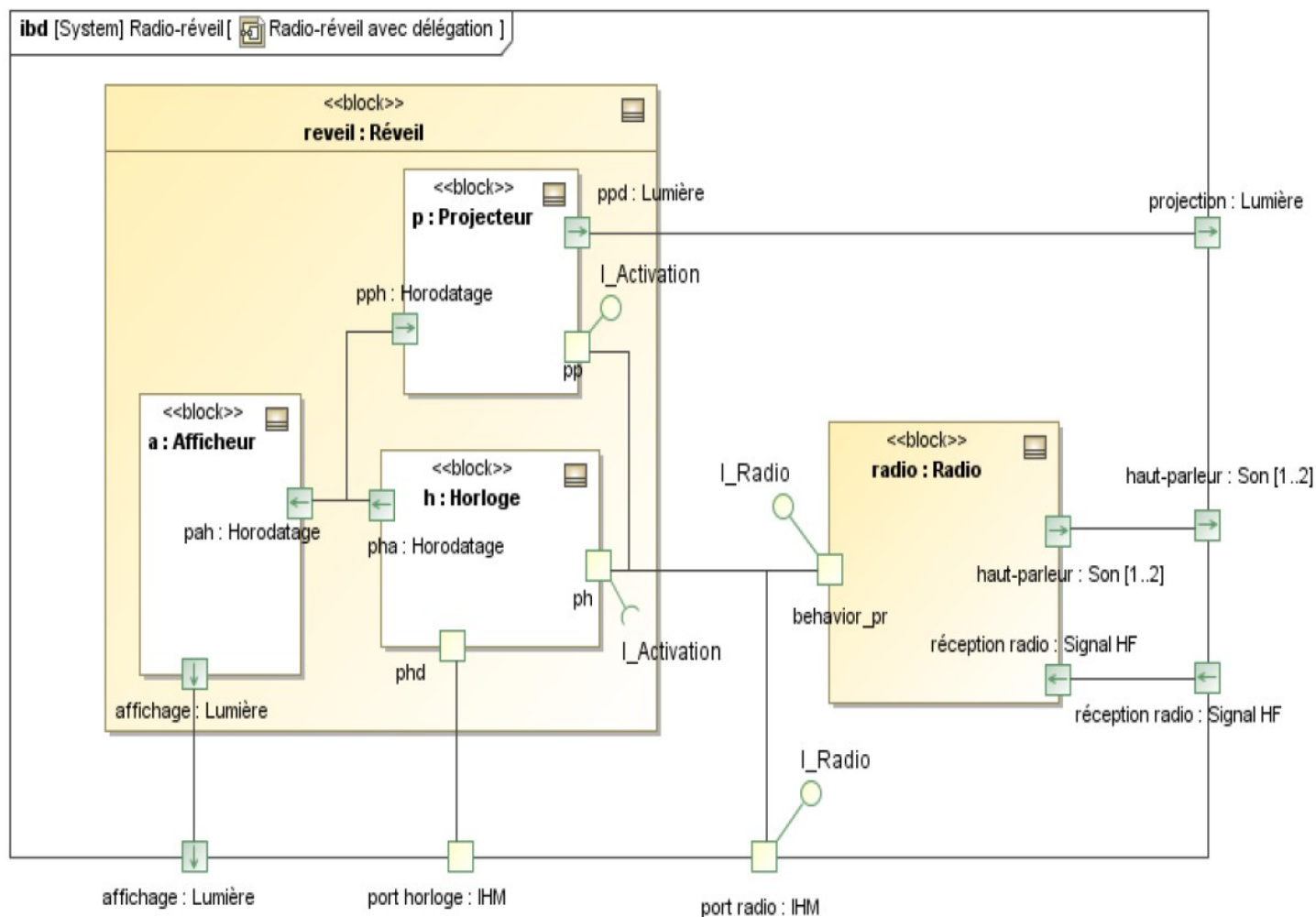


Figure 24 Interface i1 Provided required i2 Mutual i3 Required

**Exemple : radio réveil****Figure 25 - diagramme de blocs interne du radio réveil.****Limites et préconisation**

les liens se représentent entre blocs de même niveau (ils ne se contiennent pas).

chaque bloc du BDD contenant d'autres blocs peut être représenté par un IBD

attention à bien faire la différence entre port de commande et port de flux :

port de commande : désigne une interface permettant d'invoquer un service/une opération

port de flux : canal d'E/S par lequel transite de la matière, de l'information ou de l'énergie.



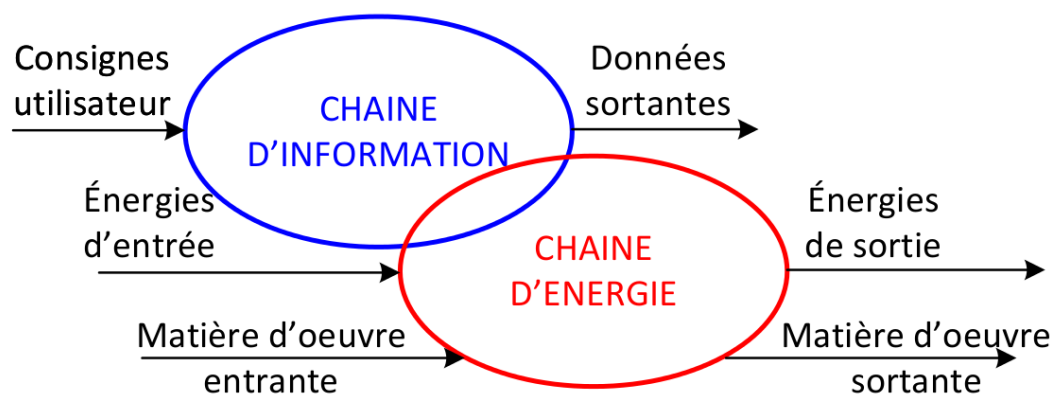
### 7.3 Chaîne fonctionnelle

**NB**

La chaîne fonctionnelle sera décrite à l'aide d'un schéma traditionnel fait simplement de rectangle et de lignes car de nombreux ouvrages et sujet font référence à celle-ci de cette manière. Cependant il est tout à fait possible d'utiliser un diagramme de blocs interne SysML pour exprimer les mêmes relations (voir chapitre suivant).

Pour chaque sous-système réalisant une opération élémentaire sur la matière d'œuvre, on parle de chaîne fonctionnelle que l'on peut modéliser par le schéma bloc suivant avec deux chaînes distinctes :

- **la chaîne d'information**, qui transfère stocke et transforme l'information (appelée également "partie commande" ) ;
- **la chaîne d'énergie**, qui transforme l'énergie et permet d'agir sur le système physique (appelée également "partie opérative").



**Figure 26 - chaîne fonctionnelle, point de vue général.**

La chaîne fonctionnelle générique détaillée est représenté sur la Figure 27. Les éléments réalisant les fonctions doivent apparaître sur ce schéma (exemple : *le moteur* est l'actionneur qui permet de convertir l'énergie).

#### 7.3.1 Chaîne d'énergie

**La chaîne d'énergie**, associée à sa commande, assure la réalisation des services dont les caractéristiques sont spécifiées dans le cahier des charges. Elle permet **d'agir** sur la matière d'œuvre.

#### 7.3.2 Chaîne d'information

**La chaîne d'information** est la partie "intelligente" du système. Elle permet de **communiquer** avec le milieu extérieur (avec l'utilisateur, ou avec d'autres systèmes sur leur propre chaîne fonctionnelle) et de **commander** les éléments de la chaîne d'énergie.

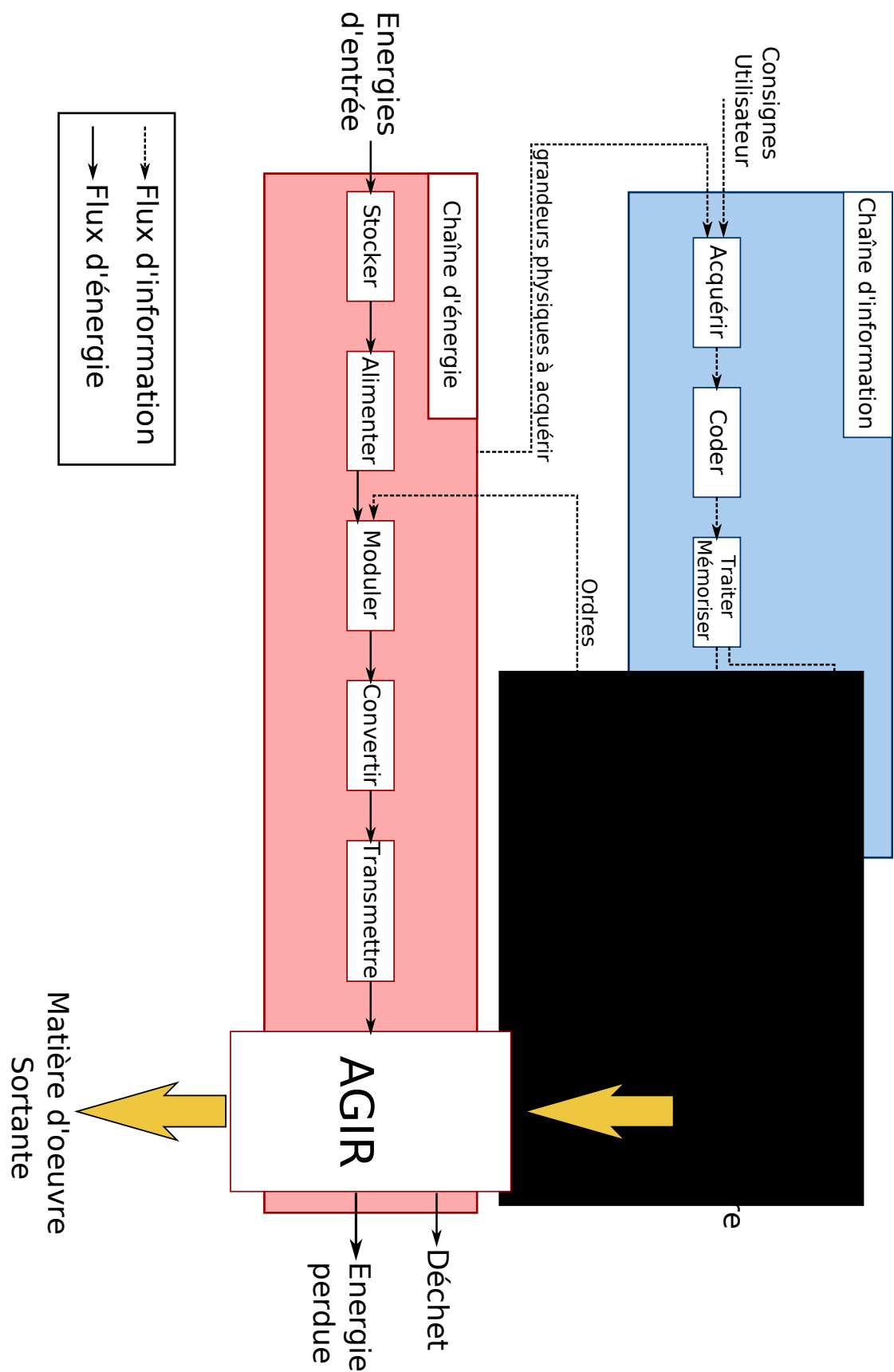
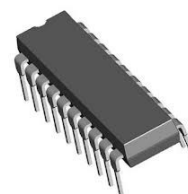


Figure 27 - chaîne fonctionnelle générique.

<b>Fonction</b>	<b>Description</b>	<b>Exemples</b>
Famille de composants		
<b>Stocker</b>	Emmagasiner l'énergie pour la restituer ultérieurement	Batterie, pile, réservoir d'air comprimé, réservoir d'huile, ressort, ballon d'eau chaude
Unités de stockage d'énergie		
<b>Alimenter</b>	Générer ou transporter l'énergie nécessaire au système	Panneau solaire, transformateur, adaptateur, unité de conditionnement pneumatique (filtre, régulateur de pression, lubrificateur)
Unités d'alimentation		
<b>Moduler</b>	Distribuer, adapter l'énergie à l'actionneur	Relais électromagnétique, contacteur, hacheur, variateur de vitesse, carte électronique, distributeur pneumatique, vanne hydraulique
Préactionneur		
<b>Convertir</b>	Convertir une énergie d'entrée non utilisable directement par les mécanismes en énergie de sortie (souvent mécanique)	Moteur électrique, vérin pneumatique
Actionneur		
<b>Transmettre</b>	Adapter et/ou transmettre l'énergie délivrée par l'actionneur à l'effecteur	Réducteur de vitesse à engrenages, arbres, embrayages, accouplements
Transmission		
<b>Agir</b>	Agir sur l'extérieur ( sur la matière d'oeuvre )	Préhenseur pneumatique, pince, tapis roulant, outils, résistance de chauffage, goulotte
Effecteurs		

<b>Fonction</b>	<b>Description</b>	<b>Exemples</b>
Famille de composants		
<b>Acquérir</b>	Acquérir les informations analogiques issues du système ou provenant de l'utilisateur	Capteur, détecteur, dispositif d'acquisition son / image, IHM (bouton poussoir, sélecteur)
Capteur + Interface Homme Machine (IHM)		
<b>Coder</b>	Conditionner (amplifier, filtrer) et convertir l'image informationnelle issue du capteur ou de l'IHM en une grandeur utilisable par la partie commande (grandeur généralement numérique)	Capteur, codeur, Convertisseur Analogique Numérique (CAN), circuit électronique
Codeur / Conditionneur		
<b>Traiter</b>	Gérer le fonctionnement du système, générer les ordres, traiter les informations (généralement numériques)	Carte électronique, circuit logique à câblage programmable, microcontrôleur (basé sur un processeur), carte mère
Partie commande (PC), unité de traitement		
<b>Mémoriser</b>	Enregistrer, sauvegarder les informations du système	Mémoires permanentes (distributeur et contacteur bistables, ROM, disque dur, disquette, CD), mémoires volatiles (relais monostable, RAM)
Mémoire		
<b>Communiquer</b>	Assigner les ordres destinés à la chaîne d'énergie, élaborer des messages destinés à l'IHM, communiquer avec l'extérieur (réseaux) et avec la commande	Carte Entrée / Sortie industrielle, ports de communication, bus, CAN, commande TOR, interface réseau Ethernet / Internet, microcontrôleur
Interface de communication		
<b>Restituer</b>	Convertir les informations issues du système en une information compréhensible par l'utilisateur	IHM (led, buzzer, écran, afficheur, clavier, biométrie digitale)
IHM		



## 8 Modèles ET comportement EN Sysml

La modélisation comportementale du système est une activité indispensable de l'ingénierie système moderne. Modéliser l'évolution physique, continue et séquentielle du système permet d'aider à la conception en permettant par exemple de tester des prototypes virtuel ou d'utiliser des méthodes d'optimisation. Si le modèle est d'une qualité suffisante la modélisation peut permettre de couvrir une grande partie de la validation du système.

La modélisation du comportement est aussi indispensable pour le développement des logiciels interne au système.

Deux diagrammes SysML sont disponibles en fonction du type d'évolution à décrire.

- Description d'évènements discrets : Diagramme d'état.
- Description d'évènements continus : Diagramme comportemental.

### 8.1 Système séquentiel, Diagramme d'état

**Objectif :** il décrit l'évolution du système, au cours du temps, en fonction de son état actuel et des évènements externes ou internes au système.

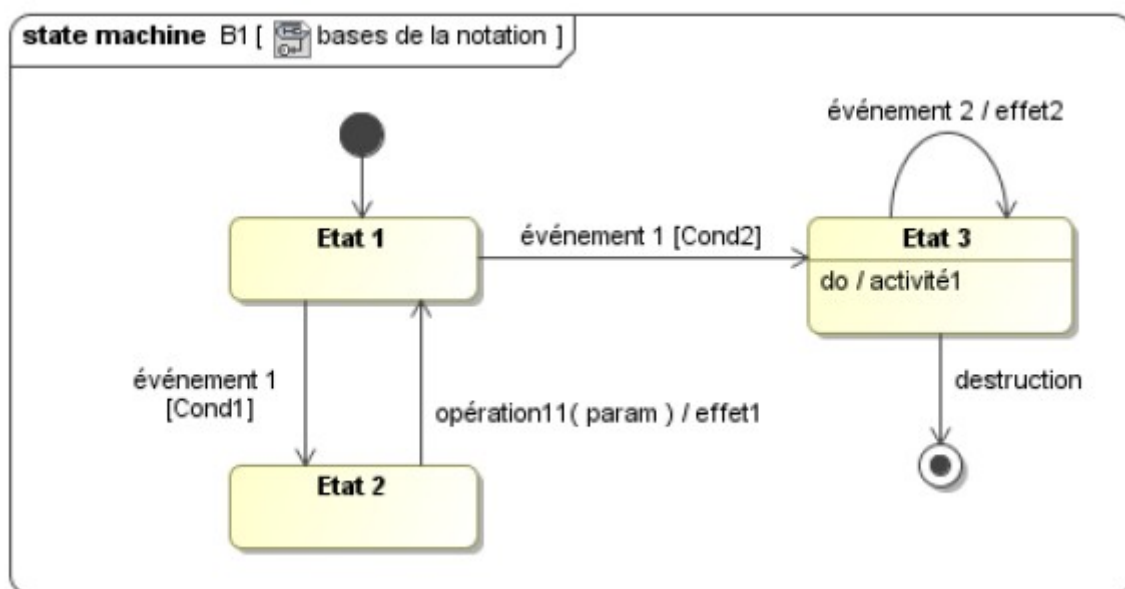


Figure 28 - Diagramme d'état générique.

Un **état** d'un objet est une situation stable dans la vie de l'objet. Il effectue une **activité** où il attend un événement. Il se représente sous la forme d'un rectangle à angles arrondis (sauf pour l'état initial et l'état final).

état initial	état final	autres états

Une **liaison** ou **transition**, représentée par une flèche, permet le passage d'un état source à un état cible. Un état est actif lorsqu'une transition y menant est franchie, et devient inactif lorsqu'une transition le quittant est franchie. La transition est franchie si l'état source est actif et lorsque l'**évènement** qui lui est associé est vrai. S'il n'y a pas d'évènement associé, la transition est franchie de manière implicite.

Un **état englobant** peut-être décomposé en sous-états. La désactivation de l'état englobant provoque la désactivation de tous ses sous-états. (sur la Figure 29 Radio Auto est un état englobant).

Un **état historique** permet à un état englobant de se souvenir du dernier sous-état actif avant une transition sortante. Une transition vers l'état « History » rend à nouveau actif le dernier sous-état actif, au lieu de se positionner sur le sous-état initial.

Exemple :

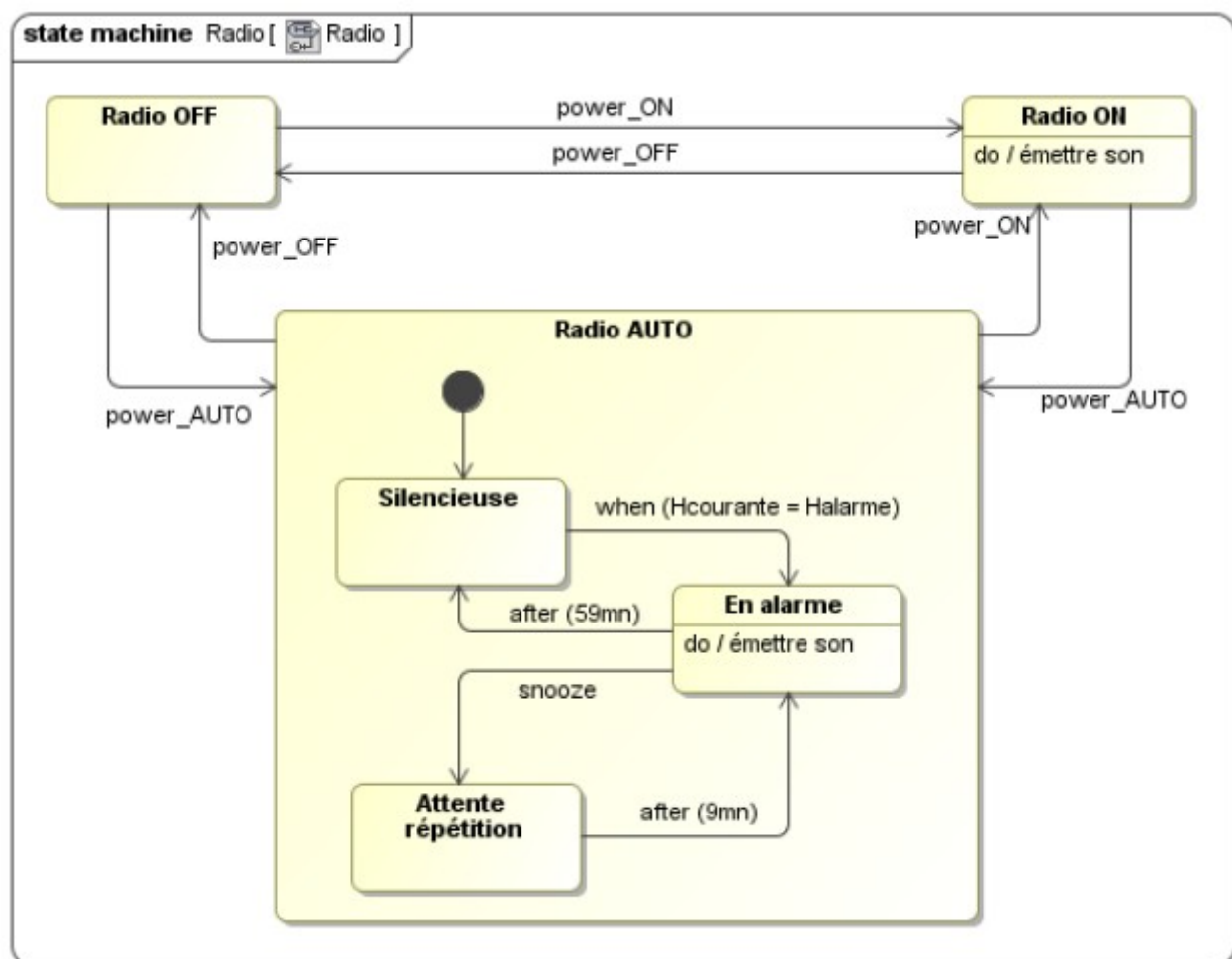


Figure 29 - Diagramme d'état du radio réveil avec snooze.

## 8.2 Système linéaire, Diagramme paramétrique.

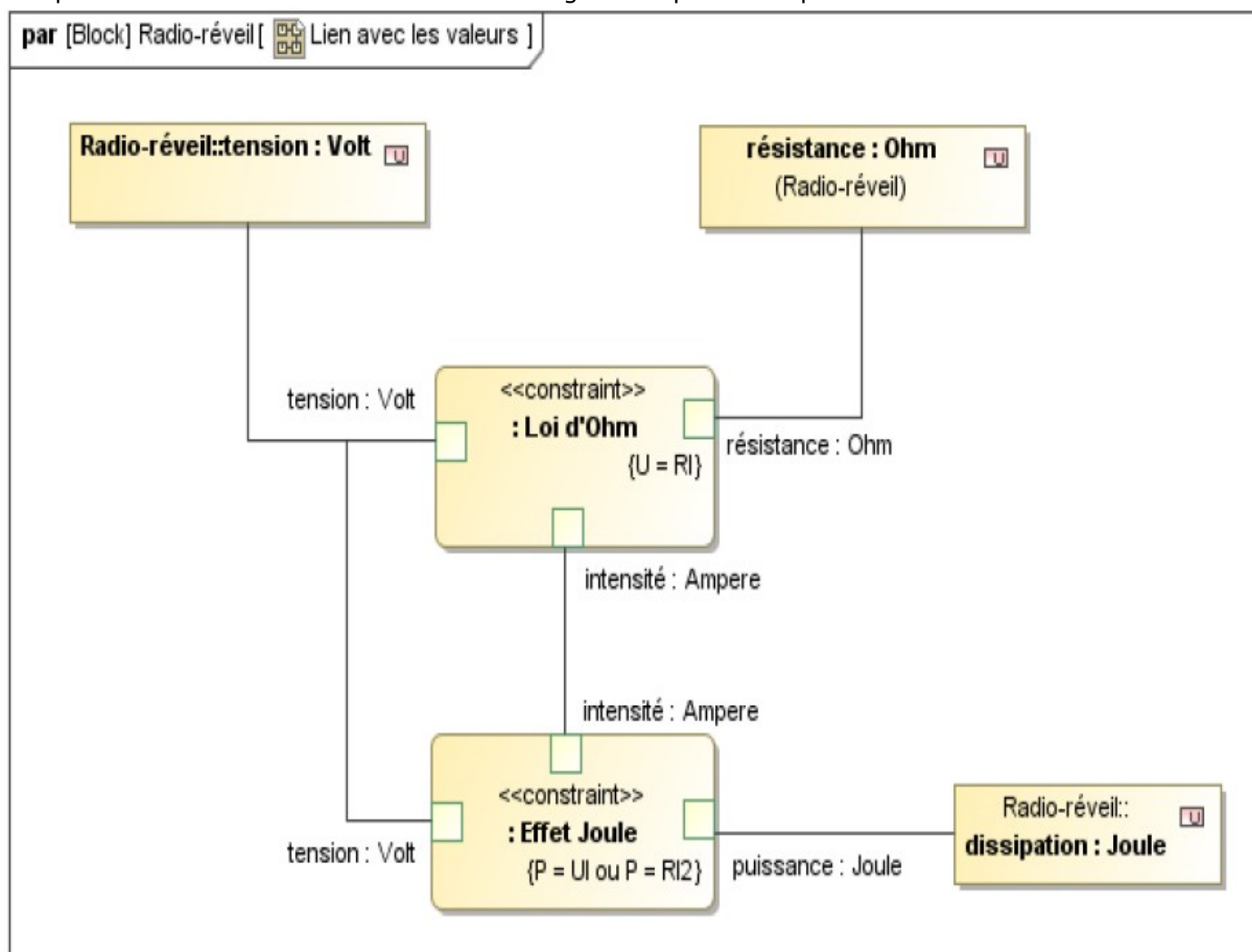
**Objectif** : il permet d'intégrer les paramètres clés du système et de spécifier des relations physiques ou mathématiques sur ces paramètres.

Des blocs de contrainte peuvent être associés (grâce à un lien « verify ») à une exigence dans le diagramme des exigences ou à un block (grâce à une agrégation forte) dans le BDD.



**Figure 30 Diagramme d'exigence et diagramme de définition des blocs pour la définition du diagramme paramétrique.**

On peut retrouver ces contraintes dans le diagramme paramétrique :



**Figure 31 - Diagramme paramétrique du radio réveil.**

**Limites/préconisations :**

Il s'agit bien d'un diagramme de structure. Les relations mathématiques entre paramètres ne sont pas orientées, il n'est pas question ici d'entrées/sorties.

Il ne faut pas confondre avec un IBD, les connecteurs du diagramme paramétrique ne transportent pas de flux, ce sont des connections logiques qui indiquent des équivalences entre des valeurs de paramètres.

Un diagramme de définition des blocks dédié à la modélisation qui contient les différentes équations est souhaitable.

---

## 9 Conclusion sur l'ingénierie système

---

L'Ingénierie Système est constituée d'un ensemble de méthodes pour la conception des systèmes complexes. Le développement de ces systèmes implique une maîtrise de nombreux domaines scientifiques. Le programme de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur, mais aussi d'autres cours de sciences (Mathématiques, Physique-Chimie) vous permettront de progresser et d'acquérir ainsi des compétences indispensables à la modélisation et la conception des systèmes complexes. De plus, étant donné les nombreux avantages des méthodes de conception non cloisonnées (Figure 3), plus versatiles et adaptées au contexte concurrentiel mondialisée, une communication sans faille entre les corps de métier est nécessaire. Pour que ces interactions soient efficaces, des outils d'analyse et de description riche doivent être maîtrisés. **Le langage de communication technique par la modélisation SysML est proposé pour remplir ces fonctions.** En pratique, les méthodes proposées dans ce cours permettent des échanges d'information fréquents et précis entre les différents acteurs de la conception.

**L'expression du besoin du client et du cahier des charges associé a d'abord été présentée.** Elle permet de s'assurer, tout au long du procédé de conception, que les solutions choisies répondent aux attentes du client. Elle s'appuie sur les diagrammes de **Cas d'utilisation**, de **Séquence**, et d'**Exigence**. Ensuite, nous avons vu comment le diagramme des exigences s'insère dans la démarche de **conception** pour faire le lien avec l'analyse du besoin (respect du cahier des charges). La **définition des frontières de l'étude** et la description de l'architecture **structurelle** sont exposées avec le **diagramme de définition des blocs**. La chaîne fonctionnelle peut se décrire en utilisant le **diagramme des flux** qui ouvrira de nouvelles possibilités de modélisation des systèmes complexes. Finalement, l'évolution des systèmes au cours du temps est abordée. Pour les systèmes discrets les **diagrammes d'état** et les **diagrammes d'activités** sont utilisés et pour les systèmes continus **les diagrammes paramétriques** sont choisis.

---

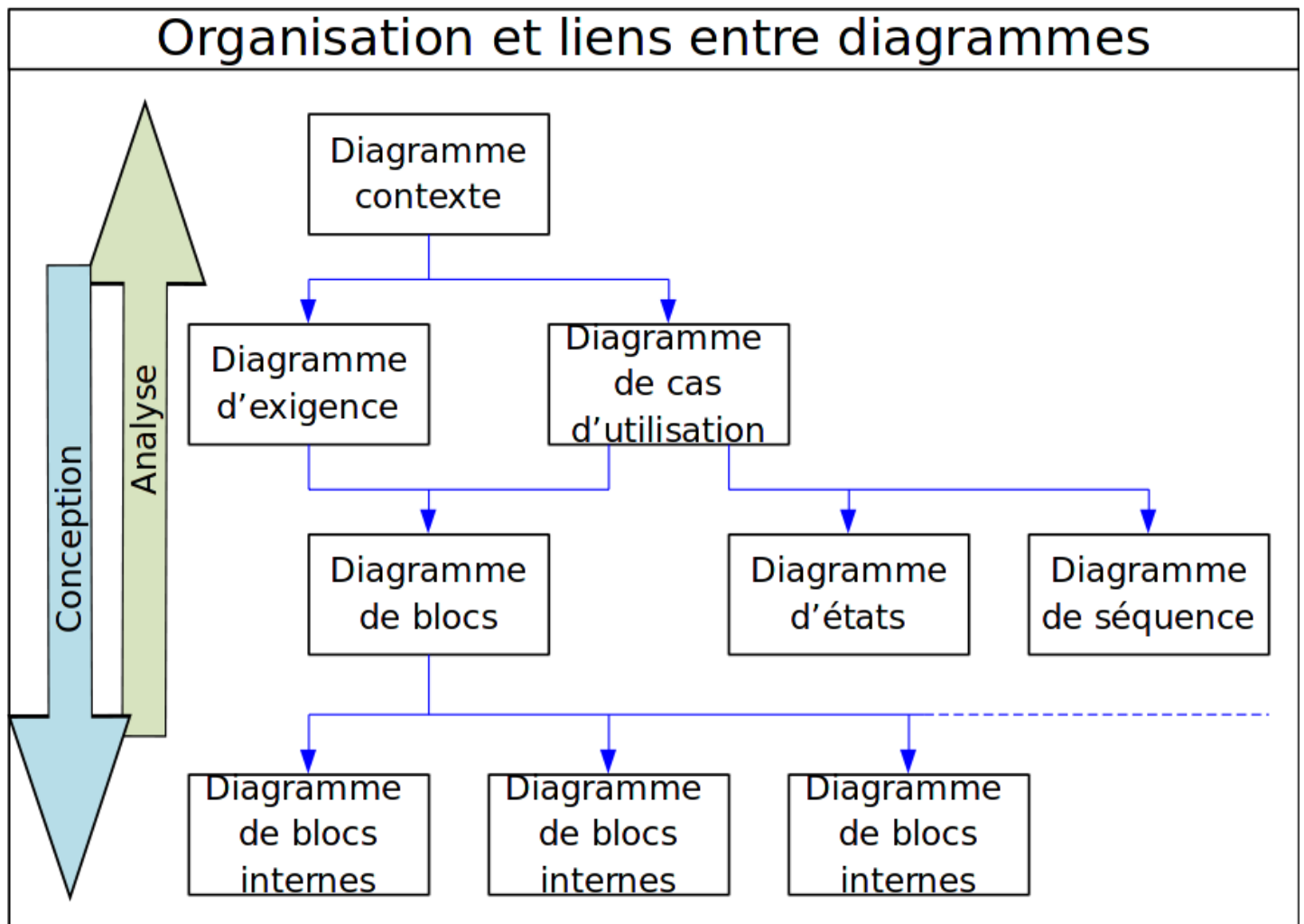
### 9.1 Et en pratique ?

---

La modélisation de système par le SysML s'opère suivant deux grandes démarches : l'analyse et/ou la conception.

- Dans le cas de l'étude d'un système existant, la démarche montant d'analyse est privilégiée.
- Dans le cas de la conception d'un nouveau produit nouveau, on opte pour une démarche descendante en faisant l'abstraction de solutions techniques pour maximiser la créativité et l'innovation.





**Figure 32 - Démarches montantes et descendante pour la modélisation de système.**