



Ingénierie des systèmes complexes, besoin et SysML

1 Ingénierie des systèmes complexes et démarche de l'ingénieur

1.1 Les systèmes complexes

L'objectif des sciences de l'ingénieur est de donner accès aux étudiants à des méthodes de raisonnement ainsi qu'à une culture technologique leur permettant de faire face à des problématiques liées à des systèmes complexes.

Le système est le point central de l'étude. Il peut être :

- **pluritechnologique** : il intègre des technologies différentes ;
- **multiphysique** : ces technologies font intervenir plusieurs domaines physiques (mécanique, électromagnétique, fluide, informatique, etc.) ;
- **multi-échelle** : les phénomènes interviennent à des échelles très différentes.

Définition

Système

Un système est un ensemble d'éléments qui interagissent entre eux. Ces interactions sont régies par des principes ou des règles.

- Un système répond à un besoin.
- Un système est un produit artificiel.

Un système n'est pas un ensemble. Il suffit de connaître tous les éléments d'un ensemble pour connaître l'ensemble. En revanche, il ne suffit pas de connaître tous les composants d'un système pour connaître le système : il faut aussi connaître les relations entre les composants.

Exemple

La connaissance des composants d'un vélo ne suffit pas pour constituer le vélo. On peut réaliser deux « systèmes » différents avec les mêmes pièces : il faut également connaître **les relations entre composants**.



FIGURE 1 – Avec les bonnes interactions, cet ensemble donne un vélo ou ... quelque chose d'inutile

La **complexité** d'un système tient au fait que les **relations** qui lient ses composants sont **multiples, interdépendantes et bouclées**. Le comportement global n'est alors pas directement prévisible à partir des comportements élémentaires des composants.

1.2 Frontière du système et acteurs

L'étude d'un système commence par son **isolement** par rapport à son environnement. Il faut pour cela définir ses limites par rapport à cet environnement. Elles constituent sa **frontière d'isolement** et peuvent être physiques ou fonctionnelles.

Les éléments qui constituent l'environnement d'un système définissent le contexte de l'analyse.

Exemple

Une prise murale électrique permet de connecter un appareil (grille-pain, micro-ondes, téléphone, etc.) au réseau électrique. Elle est donc indispensable au fonctionnement du système. Pourtant, elle ne fait pas « partie » du système.



Définition

Acteur – services attendus – interaction

Un acteur est un **élément externe**, humain ou non, qui interagit avec le système. Un système doit proposer des services attendus afin de **satisfaire le besoin** d'un acteur. Une **interaction** est l'action ou l'influence réciproque qui s'établit entre des éléments.

Remarque : Un acteur n'est pas forcément l'utilisateur et n'est pas forcément humain. Cela peut être une source d'énergie, un objet, un réseau de données, etc. Pour l'exemple précédent, le réseau électrique est un acteur.

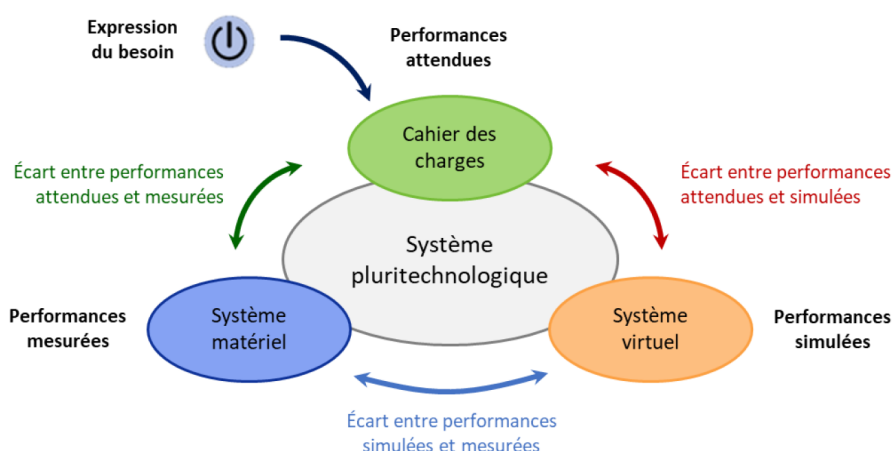
1.3 Conception d'un système

Définition

Ingénierie des systèmes

L'**ingénierie** des systèmes est une approche scientifique interdisciplinaire qui permet d'appréhender la conception de **systèmes complexes**.

La démarche de l'ingénieur s'appuie sur l'analyse des performances attendues, simulées et mesurées, ainsi que sur les écarts entre ces performances.



1. La démarche débute toujours par l'**analyse du besoin**. Un système répond à un besoin (se déplacer, s'amuser, réaliser des économies d'énergie, augmenter l'autonomie, etc.). L'expression du besoin établit les performances attendues.

2. **L'analyse de l'existant** permet de s'assurer qu'un système existant ne répond pas déjà au besoin. S'il peut être amélioré ou modifié, il s'agit de reconception ou d'évolution ; sinon, il s'agit d'une innovation.
3. **La modélisation** consiste à représenter un comportement ou un phénomène réel par des équations. Elle permet de réaliser des simulations et d'obtenir les **performances simulées** du système.
4. **L'expérimentation** se base sur la modélisation et permet de positionner les **performances mesurées** du système dans le monde réel.

Remarque : Il est courant de répéter plusieurs cycles de modélisation et d'expérimentation jusqu'à atteindre les performances attendues. Les systèmes complexes sont souvent découpés en sous-systèmes, étudiés puis validés comme des systèmes à part entière avant leur assemblage, qui sera à son tour à valider. Il s'agit également de la démarche attendue pour les **TIPE**.

1.4 Analyse du cycle de vie et éco-conception

Face aux **enjeux environnementaux**, il est primordial de prendre en compte toutes les phases de vie du système dès sa conception. En tant qu'utilisateur, la phase d'utilisation est celle avec laquelle nous sommes le plus familiers ; pourtant, ce n'est pas forcément la phase la plus marquante en matière d'exigences, de transport ou de pollution.

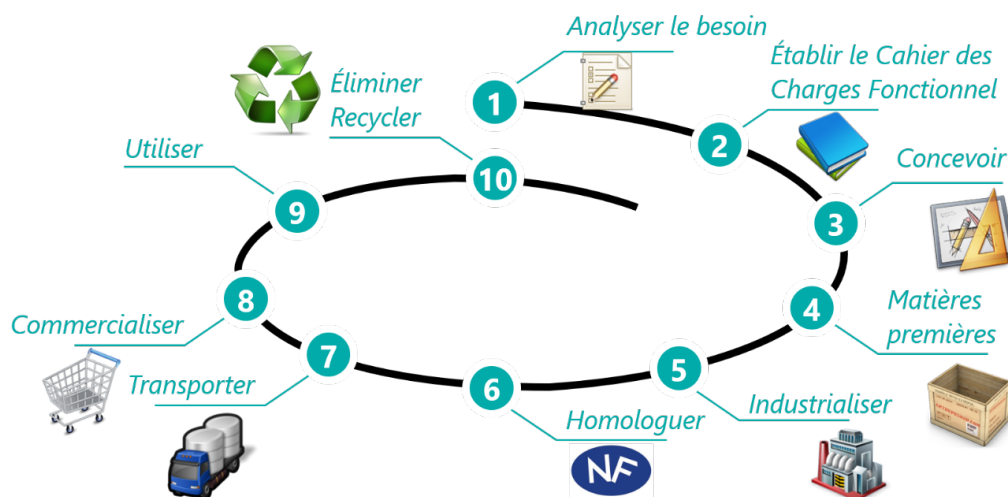


FIGURE 2 – Liste non exhaustive des phases de vie d'un système.

Anecdote : Pendant la phase d'utilisation d'une voiture, il n'est pas prévu qu'elle puisse rouler à 100kmh^{-1} en marche arrière. Pourtant, lors de la phase de transport, il faut que cette exigence soit satisfaite. Un constructeur automobile n'avait pas pensé à ce besoin : lors d'un transport en train sous la pluie, les voitures disposées dos à la marche ont été inondées.



1.4.1 ACV partielle d'un aspirateur autonome

Il n'est pas étonnant qu'un système {balai+pelle} soit moins polluant qu'un aspirateur, mais qu'en est-il de l'aspirateur classique et de l'aspirateur autonome ?



Nombre de systèmes pouvant être transportés par un container de 16 tonnes		
Balai + Pelle	Aspirateur classique	Aspirateur autonome
24615	2000	3137



Coefficient d'utilisation pour 20 m² (égal ici à la durée d'utilisation en min divisée par la surface nettoyée en m²)		
Balai + Pelle	Aspirateur classique	Aspirateur autonome
$\frac{10}{20} = 0,5$	$\frac{5}{20} = 0,25$	$\frac{40}{20} = 2$



Puissance relative consommée en W pour 20 m²		
Balai + Pelle	Aspirateur classique	Aspirateur autonome
0 W	525 W	50 W



	Effet de serre en kg de CO2 éq pour 1 kg de constituant en tenant compte du recyclage	Effet de serre en kg CO2 éq					
		Balai + pelle		Aspirateur classique		Aspirateur autonome	
		masse en kg	Effet de serre en kg de CO2 éq	masse en kg	Effet de serre en kg de CO2 éq	masse en kg	Effet de serre en kg de CO2 éq
Matériaux métalliques (acier)	0,84	0,15	0,126	2,5	2,1	0,8	0,672
Emballage carton + colle	1,03	0	0	1,5	1,545	0,71	0,7313
Polystyrène expansé	3,26	0	0	0,6	1,956	0,3	0,978
Thermo plastiques	3,93	0,25	0,9825	2,9	11,397	1,4	5,502
Caoutchouc	3,1	0,05	0,155	0,1	0,31	0,1	0,31
Bois	1,37	0,15	0,2055	0	0	0	0
Circuits imprimés et composants électroniques	147	0	0	0,4	58,8	0,8	117,6
Batterie + piles	0,652	0	0	0	0	0,9	0,5868
Total		1,47		Total	76,11	Total	126,38

Que ce soit pour la phase de transport ou d'utilisation, l'aspirateur autonome est moins polluant. Cependant, en ajoutant les phases de fabrication et de recyclage, le résultat devient discutable.

Remarque : Ceci est encore plus marquant avec les systèmes dédiés à la conversion d'énergie renouvelable. Lors de leur phase d'utilisation, ils ne consomment aucune énergie et ne font qu'en produire. En tenant compte du coût énergétique des autres phases de vie, il faut quelques années (1 à 3 ans en fonction de la provenance) pour atteindre la rentabilité énergétique. *Et entre 6 et 10 ans pour atteindre la rentabilité économique, pour une durée de vie de 25 à 30 ans.*



2 | Du besoin aux exigences

2.1 Le besoin

La première étape de la relation client–fournisseur est généralement la **capture du besoin**. Elle consiste à sonder le client ou l'utilisateur afin de définir le besoin.

Exprimer le besoin des clients potentiels est indispensable, mais complexe car **le besoin évolue constamment** sous l'effet des changements économiques, sociaux et environnementaux, ainsi que des innovations.

Afin de s'approcher le plus possible du système idéal pour le client, il s'agit d'explicitier quelle est l'exigence fondamentale qui justifie la conception du produit. **Il faut exprimer clairement les objectifs à atteindre**, les exigences que le système doit satisfaire : c'est le **cahier des charges**.

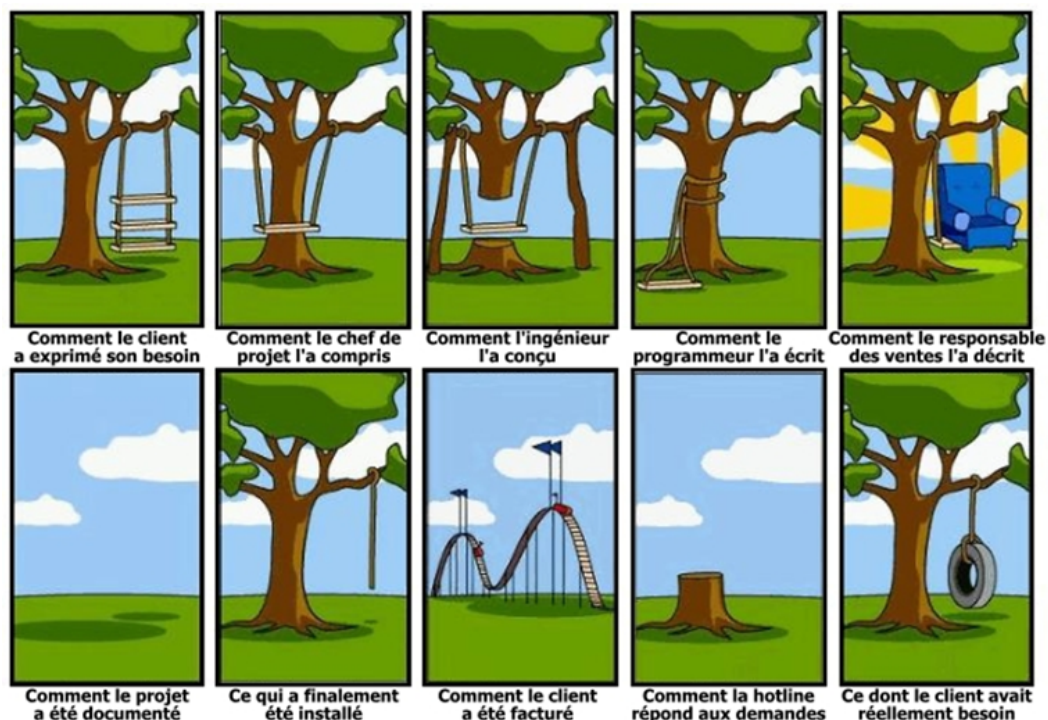
Définition

Besoin

Le besoin est une nécessité ou un désir éprouvé par l'utilisateur. Il peut être exprimé ou latent (potentiel). C'est la fonction de la mercatique de définir un modèle d'utilisateur-client en termes de besoin.

2.2 Le cahier des charges fonctionnel (CdCF)

Le besoin est exprimé dans un **cahier des charges** qui sert de **contrat** entre le client et le concepteur. Un oubli ou un malentendu peut donc être très problématique.



Le cahier des charges fonctionnel (CdCF) est contenu dans le cahier des charges. Celui-ci formalise le **besoin en termes d'exigences** sans tenir compte des contraintes organisationnelles ou temporelles.

Exigence

Une exigence est un besoin formulé, habituellement implicite ou imposé. Afin de quantifier le degré de satisfaction attendu du client, **une exigence est caractérisée par**

- un ou plusieurs **critères** (grandeurs mesurables);
- un **niveau attendu** (valeur exigée) pour chaque critère;
- éventuellement une **flexibilité**.

Un CdCF peut se présenter sous la forme suivante (extrait du CdCF d'un robot aspirateur autonome) :

Id.	Exigence	Critère	Niveau	Flexibilité
1.1	Le système doit coûter moins de 400 €	Prix	400 €	Moyenne
1.3	Le système doit avoir une autonomie minimale de 120 minutes	Temps d'utilisation	120 min	Forte
1.6.1	Le système doit se déplacer dans toutes les directions à une vitesse moyenne de 4 m/min et une vitesse maximale de 18 m/min	Vitesse moyenne; vitesse maximale	4 m/min; 18 m/min	Faible

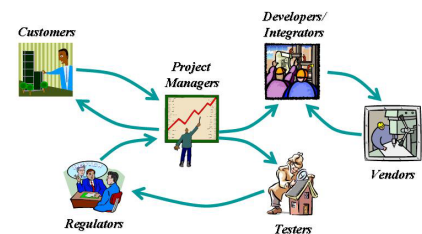
2.3 Les systèmes complexes sous forme de diagrammes : le langage SysML



La conception des systèmes industriels exige de mettre en commun le savoir-faire et les outils de **multiples disciplines** : mécanique des solides et des fluides, thermique, chimie, électronique, etc.

Elle produit souvent une **accumulation de documentations** qui doivent être croisées et mises à jour afin de maintenir la cohérence et de respecter les spécifications. La communication entre les différents acteurs est donc essentielle. La communauté de l'ingénierie système a défini un langage de **modélisation transversal et unifié** pour faciliter leur **communication** et leur collaboration.

Les **ingénieurs informaticiens** avaient rencontré la même problématique lors de l'essor de la programmation orientée objet. Ils avaient alors créé l'UML (*Unified Modeling Language*, langage de modélisation unifié).



Le SysML (*System Modeling Language*, langage de modélisation de système) reprend des principes de l'UML et les adapte à l'ingénierie système. Ce langage de modélisation se traduit sous la forme de neuf diagrammes (Figure 3), répartis en trois catégories :

- le diagramme d'exigences, qui montre les exigences du système et leurs relations (seul diagramme transverse);
- les diagrammes de structure (vues statiques du système);
- les diagrammes de comportement (vues dynamiques du système).

Au programme, nous ne verrons pas les diagrammes d'activité, de package et paramétrique.

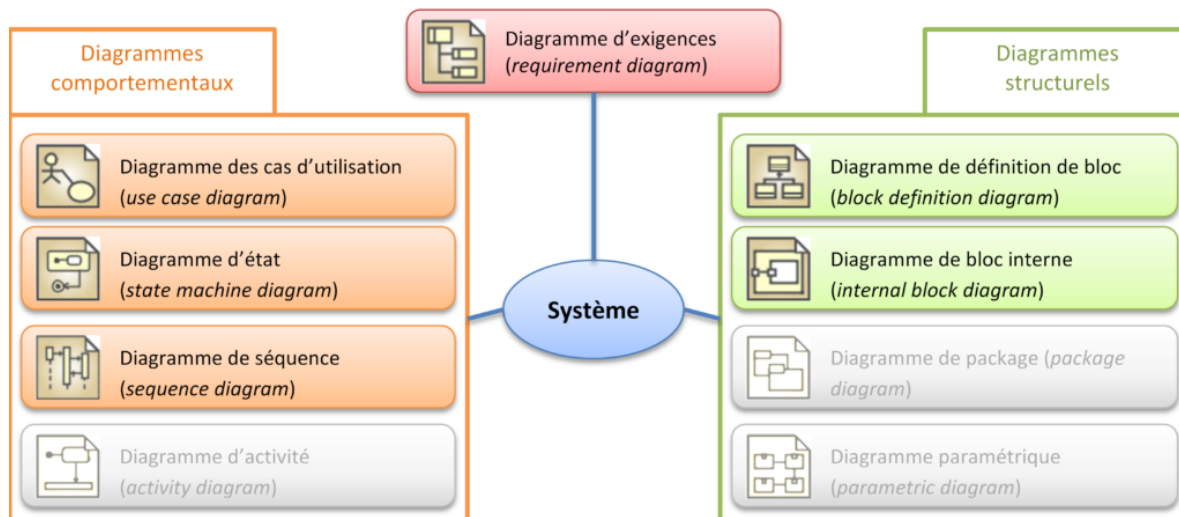


FIGURE 3 – Diagrammes du SysML

Remarques :

- Le langage n'impose pas d'ordre de réalisation des diagrammes ; chacun d'entre eux est une vision différente d'un même modèle. Ils sont donc réalisables dans l'ordre que l'on souhaite. Il n'y a d'ailleurs aucune obligation de réaliser tous les diagrammes ; c'est une question de choix quant à l'**information à communiquer**.
- Leur construction s'insère dans une **démarche itérative** : le travail sur un diagramme entraîne souvent des modifications ailleurs dans le modèle.

2.3.1 Le diagramme des exigences



Le diagramme SysML des exigences (*Requirement Diagram*, req) regroupe hiérarchiquement les **exigences** – fonctions, règles, contraintes ou performances – à satisfaire par le système. Il sert notamment à vérifier que la conception reste en accord avec le CdCF. Il fait ainsi office de « moelle épinière » du projet et est consulté tout au long de l'étude.

Pour la suite, prenons l'exemple d'un destructeur d'aiguille dans un cabinet dentaire.

Le personnel médical manipule des dizaines de seringues par jour ; des piqûres accidentelles avec une seringue usagée peuvent entraîner un risque majeur de contamination. Le besoin est donc d'éviter ces piqûres. Le destructeur automatique casse l'aiguille dès que la seringue usagée est insérée dans le système.



La Figure 4 représente une partie du diagramme des exigences de ce destructeur d'aiguilles.

2.3.2 Anatomie d'un diagramme SysML

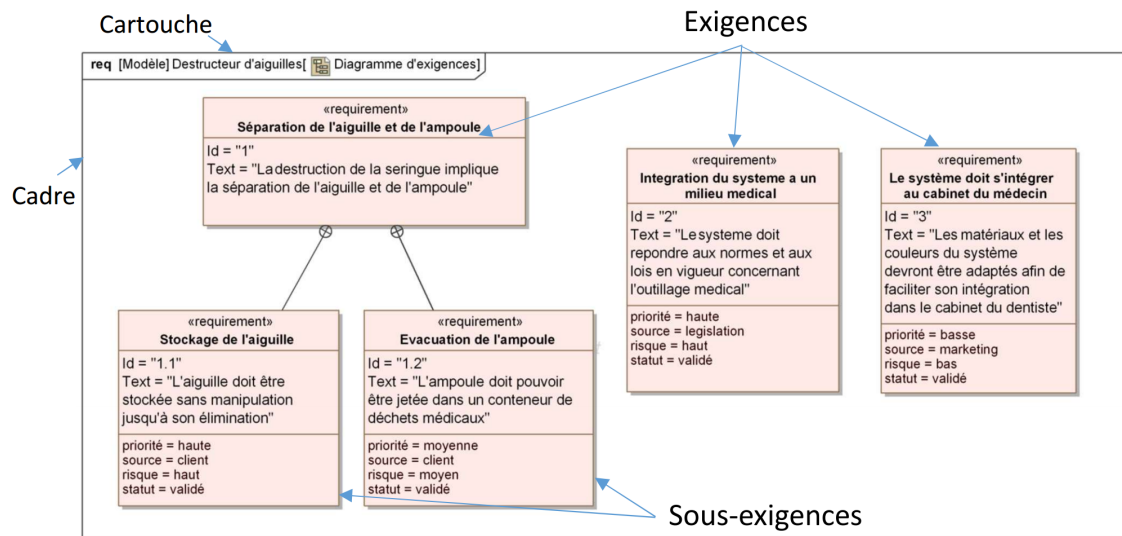


FIGURE 4 – Diagramme des exigences du destructeur d'aiguille

À l'intérieur du cadre, en haut à gauche, se trouve le cartouche. Celui-ci renseigne :

- le type de diagramme : ici req pour *requirement* ;
- le type de l'élément : ici type [Modèle] ;
- le système ou sous-système concerné : ici « Destructeur d'aiguille » ;
- le nom du diagramme : ici « Diagramme d'exigences ».

Le cadre et le cartouche sont présents sur tous les diagrammes SysML (quand ils sont bien réalisés et bien découpés...).

2.3.3 Anatomie d'une exigence

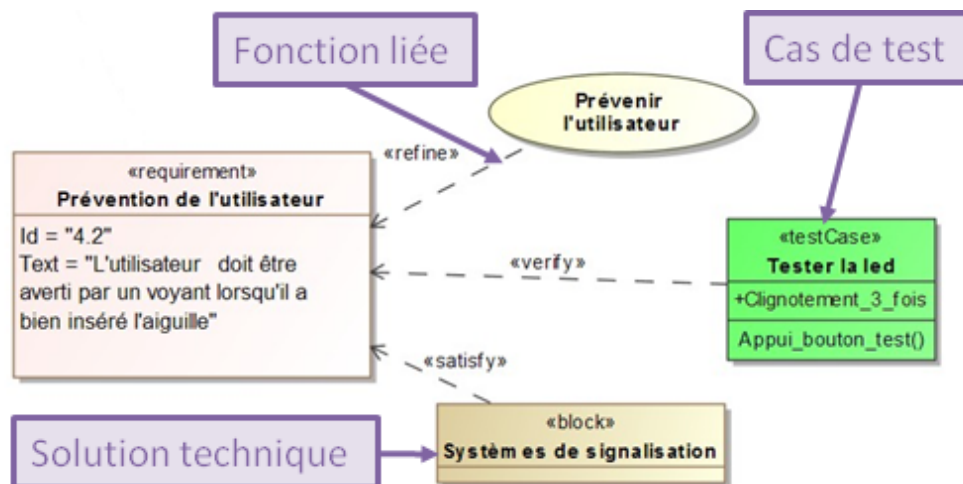
Une exigence se construit selon la logique suivante. Les blocs des autres diagrammes ne sont pas identiques, mais suivent une organisation comparable.

« Type de bloc »	
Nom	«requirement» Integration du systeme a un milieu medical
Identifiant unique	Id = "2"
Description	Text = "Le systeme doit répondre aux normes et aux lois en vigueur concernant l'outillage medical"
Compléments	priorité = haute source = legislation risque = haut statut = valide

2.3.4 Les associations

Les associations peuvent relier des éléments d'un même diagramme ou entre les éléments de différents diagrammes. La connaissance exhaustive de **la syntaxe SysML n'est pas un attendu** : il s'agit surtout de savoir lire ou compléter des diagrammes. Le sens des associations se déduit généralement du mot anglais et du contexte.

L'association d'un «*block*» de solution technique à une exigence peut se faire directement dans le diagramme d'exigences grâce à la relation «*satisfy*». Elle établit un lien avec un diagramme d'architecture. On peut également rencontrer des associations avec un diagramme de comportement.



Remarque : Nous verrons d'autres associations dans les prochains cours.