

# Etude de cas : modélisation MBSE du drone araignée

**Date :** 19 décembre 2022

**Auteur(s) :** Matthieu Bricogne

**Copyright :** M. Bricogne, université de technologie de Compiègne

**Licence :** CC 4.0 BY-NC-SA<sup>[<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.fr>]</sup> + licence commerciale ET-LIOS<sup>[<https://et-lios.s-mart.fr/licencecommerciale/>]</sup>

# Table des matières

Introduction .....	3
1. Présentation du système à étudier .....	4
2. Description générale du système : délimiter votre système .....	9
2.1. Introduction .....	9
2.2. Finalité et missions .....	9
2.3. Contexte organique .....	9
2.4. Architecture interne .....	10
2.5. Synthèse .....	10
3. La fonction Déplacement du système .....	11
3.1. Introduction .....	11
3.2. L'exigence fonctionnelle de déplacement .....	11
3.3. La fonction Déplacement du système .....	11
3.4. La structure du sous-système Déplacement .....	12
4. La fonction Adhérence du système .....	13
4.1. Introduction .....	13
4.2. L'exigence fonctionnelle d'adhérence .....	13
5. La fonction Communication du système .....	14
5.1. Introduction .....	14
5.2. L'exigence fonctionnelle de communication .....	14
6. La fonction Gestion de l'autonomie du système .....	15
6.1. Introduction .....	15
6.2. L'exigence fonctionnelle de gestion de l'autonomie .....	15
6.3. La structure du sous-système Système d'alimentation électronique .....	15
7. L'exigence de Maintenance du système .....	16
7.1. Introduction .....	16
7.2. L'exigence non fonctionnelle de maintenance .....	16
7.3. La fonction Mise en service du système .....	16
8. L'exigence de Sécurité du système .....	17
8.1. Introduction .....	17
8.2. L'exigence non fonctionnelle de sécurité .....	17
9. Synthèse des exigences et correspondance avec les composants .....	18
9.1. Introduction .....	18
9.2. Synthèse des exigences et composants .....	18
10. Organisation et navigation du modèle .....	19
10.1. Introduction .....	19
10.2. Diagramme de package .....	19
Synthèse .....	20
Glossaire .....	21

# Introduction



6 heures

## \* Mettre en œuvre une démarche MBSE basée sur SysML

Comprendre l'intérêt du MBSE dans une démarche d'Ingénierie Système pour la conception de systèmes multidisciplinaires

Mettre en œuvre du MBSE et savoir modéliser un système en s'appuyant sur les diagrammes SysML les plus appropriés

### Contexte

Lors de cette séquence, vous allez apprendre à dérouler une partie de la démarche d'Ingénierie Système, qui se base sur les modèles pour mieux cerner et définir le système que vous cherchez à concevoir.

Le système à étudier va être présenté, puis les travaux antérieurs sur lesquels vous allez vous appuyer vont être décrits, avant de préciser le périmètre de l'étude actuelle.

# 1. Présentation du système à étudier

## Cas d'étude : le drone araignée

Afin de mieux appréhender les connaissances transmises dans le cadre de ce module et de pouvoir appliquer les compétences acquises, un cas fil rouge a été imaginé. Il s'agit d'un drone araignée hexapode.

## Pourquoi le drone araignée ?

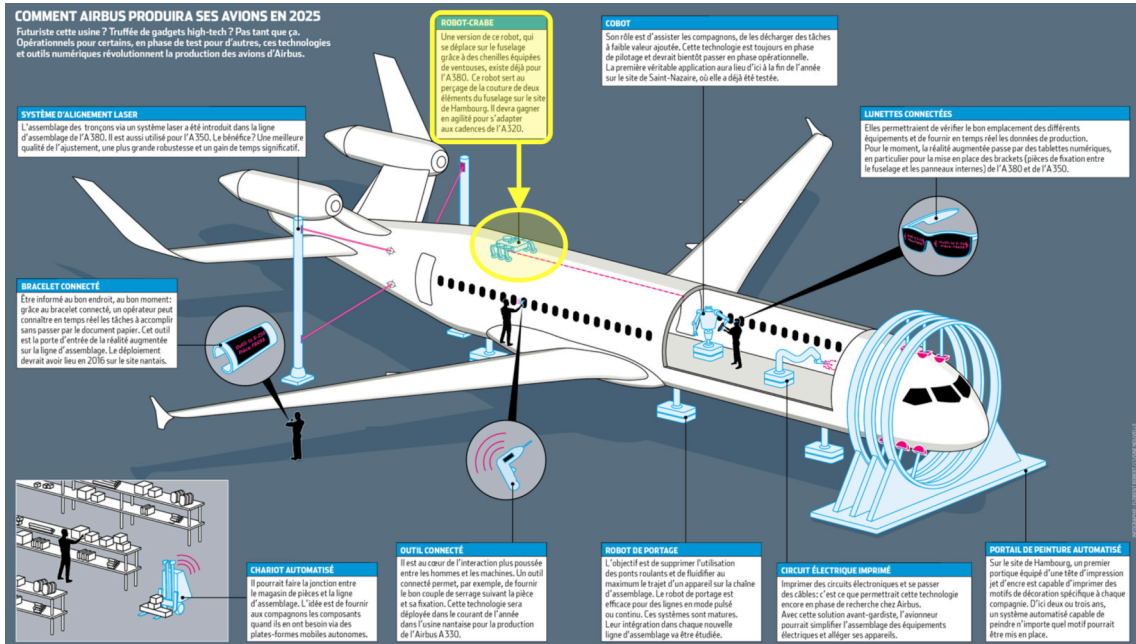
La problématique de l'inspection ou de la maintenance de grandes structures ou de structures 3D complexes réside parfois dans la difficulté d'accès à certains espaces ou encore dans la dangerosité de certaines opérations. Pour faciliter ces inspections, une solution robotisée a été imaginée. Il s'agit d'un drone terrestre grim pant, baptisé « Light Expert Examination Automated Arthropod » - LEEAA. Pour ce faire, une analyse fonctionnelle « traditionnelle » a été réalisée et un premier prototype a été conçu. Il s'agit d'un robot araignée hexapode.



*Structure de base du drone araignée*

L'objectif de ce drone est de faciliter les inspections et la maintenance de structures telles que des carlingues d'avion ou buildings vitrés.

Une potentielle utilisation du drone araignée est illustrée sur la figure ci-dessous.



Projet d'usine du futur : comment Airbus produira ses avions en 2025



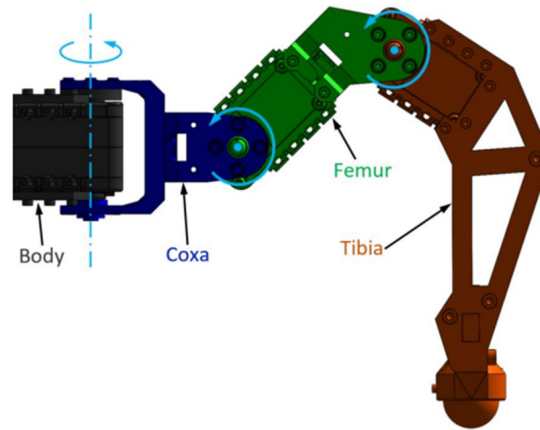
L'ensemble des travaux s'inspirent, reprennent ou s'appuient sur des réalisations d'étudiants impliqués dans différentes formations :

- aux Arts et Métiers, campus d'Aix en Provence, Mastère Spécialisé® « Créateur de solutions drones : usages innovants et technologies »
- à l'INSA de Lyon, département Génie Mécanique
- à l'IUT de Mantas
- à l'Université de Technologie de Compiègne, département Ingénierie Mécanique
  - module TN29 - « Outils de définition et de développement de systèmes »
  - module TX - « Travaux Expérimentaux »

Un grand merci pour leur implication !

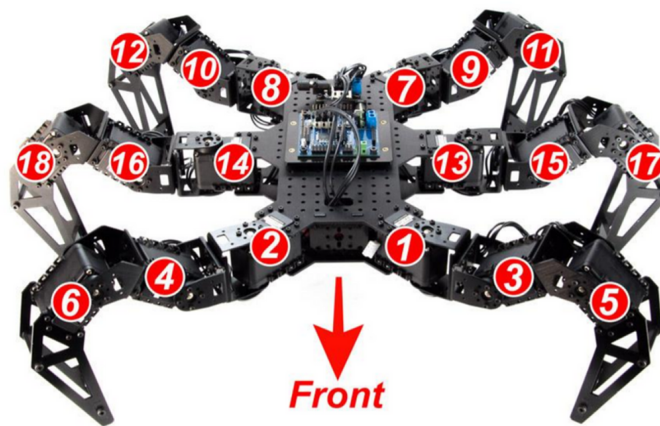
Comme évoque ci-avant, le système étudié est un système autonome hexapode permettant la maintenance (inspection, réparation voire nettoyage).

Suite aux premiers travaux réalisés, une base mobile a été conçue. Elle est constituée de 6 pattes, elles-mêmes constituées d'un tibia, d'un fémur et d'une cuisse, animés par 3 servomoteurs pour chacune des rotations.



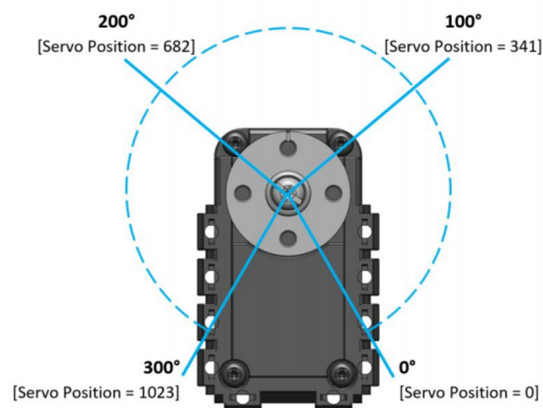
Structure d'une patte du robot et degrés de liberté

Le robot est orienté et les servomoteurs qui animent chaque articulation sont donc identifiés :



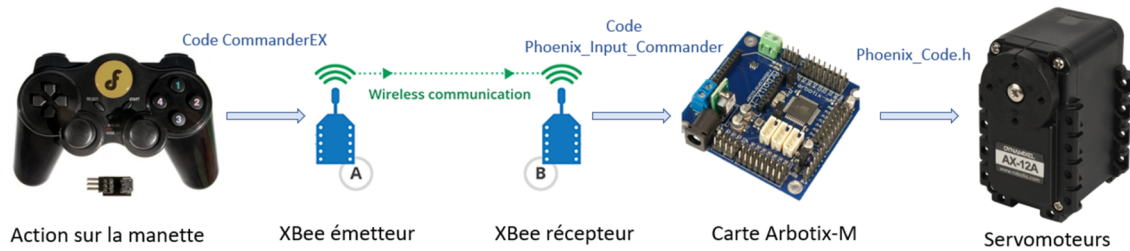
Identification des servomoteurs et orientation

Chaque servomoteur est pilotable de 0 à 300 degrés et 1024 positions sont référencées.



Servomoteur : pilotable de 0° à 300° ; 1024 positions

Aujourd'hui, ce robot est piloté par un joystick qui communique avec le robot grâce au protocole de communication XBee.



*Mode de pilotage et protocole de communication*

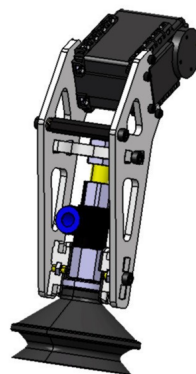
Le premier prototype réalisé au sein de l'entreprise pour laquelle vous travaillez est capable de se déplacer sur une surface plane et horizontale. Vous êtes en charge de la réalisation de la 2ème génération du robot, qui permet notamment d'ajouter des fonctionnalités liées au franchissement d'obstacles et au déplacement / maintien sur une surface orientée. A l'issue de votre étude, le drone doit

- évoluer de manière « autonome » sur une surface 3D continue en tangence,
- être capable de franchir des obstacles, une marche d'une dizaine de centimètres étant envisagée à ce stade,
- pouvoir se maintenir sur tous types de matériaux solides, quelle que soit son orientation. Une rugosité considérée comme acceptable devra être précisée durant cette étude.

Une étude préalable a été menée pour étudier la faisabilité d'un tel système. Pour assurer la fonction de maintien (force d'attraction/rétention), 4 critères issus de l'analyse des besoins ont été pris en considération

1. La réversibilité du processus : pour marcher, le système doit successivement adhérer ou au contraire ne plus adhérer à la surface ;
2. la versatilité : le système doit s'adapter à différents matériaux et différentes orientations des surfaces ;
3. la disponibilité commerciale / le coût des technologies associées ;
4. le respect de la surface d'intervention.

Pour ces différentes raisons, une solution technique basée sur la dépression (système pneumatique), semble possible.



*Patte du robot intégrant un système pneumatique*

A terme, la base mobile devra pouvoir accueillir différents add-on (ex : vissage, perçage, nettoyage, marquage...) opérés par une commande dédiée, mais à l'heure actuelle, cette partie ne fait pas partie de votre étude.

Au niveau du pilotage, le robot doit être autonome pour la mission d'inspection, mais en cas de difficulté,

le pilote doit être en mesure de repasser en mode manuel et de piloter le drone à distance, grâce à un système lui permettant de visionner l'environnement dans lequel le drone évolue. Le système de supervision distante du drone est donc à prendre en considération.



## 2. Description générale du système : délimiter votre système

### 2.1. Introduction



60 min dont 20 min de correction



- Définir les objectifs du système
- Définir l'environnement dans lequel le système évoluera
- Définir les interactions externes du système
- Définir les principales fonctions du système

### 2.2. Finalité et missions

*Temps estimé : 10 min*

Sans formalisme particulier, décrire la **finalité** du système que vous cherchez à concevoir et les **missions principales** qu'il va devoir remplir. A ce stade, nul besoin d'être très précis, il est préférable de choisir habilement la formulation pour tenter d'être exhaustif.

### 2.3. Contexte organique

*Temps estimé : 20 min + 10 min de correction*

#### Contexte organique

- Objets (au sens large pouvant inclure des humains), constituants du contexte d'utilisation en liaison avec le système étudié. Ces objets ne font pas partie du système étudié.
- Liens physiques (interfaces ou connexions physiques) entre ces objets, constituants du contexte et le système étudié.

En d'autres termes, ce qu'il y a autour du système et la nature de ces interactions.

#### Pour le raisonnement

A l'étape précédente, les missions du drone ont été définies.

- Sur cette base, qui interagit avec le système ?
- De quoi le système va-t-il avoir besoin ?
- Quels sont les éléments extérieurs qui peuvent influencer/nuire au bon comportement du

systeme ?

### ★ Pour la modélisation

Les relations entre les blocs sont également à soigner. Penser à utiliser, à bon escient, les généralisations, compositions, agrégations et autres cardinalités.

Réaliser le contexte organique du système, à l'aide d'un diagramme de définition de blocs<sup>[p.21]</sup>.

## 2.4. Architecture interne

*Temps estimé : 20 min + 10 min de correction*

### 🔑 Architecture interne

Ce qui compose, en tentant de conserver au maximum un point de vue fonctionnel, le système et les liens détaillés entre les différents éléments. Ces éléments devront être développés et fournis à votre client.

### ★ Pour le raisonnement

Quelles sont les grandes fonctions qui permettent au robot d'assurer :

- son déplacement ?
- son autonomie ?
- ses échanges avec le pilote ?
- etc.

Réaliser l'architecture interne du système, à l'aide d'un diagramme de définition de blocs<sup>[p.21]</sup>.

## 2.5. Synthèse

A l'issue de ces étapes, vous devriez avoir une vision plus **précise** et surtout **partagée** de :

- ce qui interagit avec votre système
- dans quel environnement votre système va évoluer
- ce que va devoir faire votre système
- ce qui compose votre système
- ce que vous devez développer



Cette première phase de travail permet de n'omettre aucun élément dans l'environnement de votre système mais également à votre système. C'est une clarification.

## 3. La fonction Déplacement du système

### 3.1. Introduction



180 min dont 30 de correction



Identifier, spécifier, et modéliser les exigences associées à l'exigence fonctionnelle de déplacement  
Modéliser la fonction Déplacement du système et ses interactions  
Réaliser la structure du sous-système Déplacement, incluant les flux

### 3.2. L'exigence fonctionnelle de déplacement

*Temps estimé* : 20 min + 10 min de correction

A partir du travail réalisé jusqu'alors, on cherche à spécifier et hiérarchiser toutes les exigences liées au **déplacement** du système. Pour cela, on utilise un diagramme d'exigences.

#### Diagramme d'exigences

≈ req

≈ requirement diagram

Les diagrammes d'exigences servent à préciser ce que l'on attend du système, généralement dérivées du cahier des charges.

Réaliser le diagramme d'exigences de l'exigence fonctionnelle de déplacement.

### 3.3. La fonction Déplacement du système

*Temps estimé* : 20 min + 10 min de correction

Vous avez défini la structure des exigences fonctionnelles de déplacement du système.

On s'intéresse maintenant au cas d'utilisation Déplacement et ses composantes.

On cherche à décrire la fonction Déplacement pour que le système exécute ses missions. On utilise un diagramme de cas d'utilisation.

#### Diagramme de cas d'utilisation

≈ uc

≈ use case

Un diagramme de cas d'utilisation fournit une description de haut niveau de la fonctionnalité qui est

réalisée par l'interaction entre les systèmes ou les parties du système.

Les diagrammes de cas d'utilisation intègrent des relations standardisées :

- <<include>> : le cas d'utilisation de base « ne peut se faire sans » ou « impose que »
- <<extend>> : le cas d'utilisation de base « peut éventuellement se faire avec »
- <<spécialisation>> : il permet de définir la spécialisation d'un cas d'utilisation

Réaliser le diagramme de cas d'utilisation de la fonction Déplacement.

### 3.4. La structure du sous-système Déplacement

*Temps estimé : 20 min + 10 min de correction*

En considérant l'architecture fonctionnelle réalisée, nous allons définir les constituants du sous-système Déplacement. On utilisera un diagramme de blocs internes.

#### Diagramme de blocs internes

≈ *ibd*

≈ *internal block diagram*

Un diagramme de blocs internes est un diagramme structurel statique.

L'objectif des diagrammes de blocs internes (IBD) est de montrer le contenu structurel encapsulé (composants, propriétés, connecteurs, ports, interfaces) des blocs afin qu'ils puissent être décomposés de manière récursive et "reliés" à l'aide d'interfaces. Autrement dit, un IBD est une vue "boîte blanche" (je comprends et je décris ce qu'il y a à l'intérieur du système considéré) d'un bloc qui a jusqu'alors été décrit en "boîte noire" (je ne sais pas ce qui se passe à l'intérieur, je ne peux que constater son comportement).

#### Question n° 1

Réaliser le diagramme de blocs internes du système de déplacement.

#### Question n° 2

Ajouter les flux Mécanique, Énergie, Contrôle, Données qui transitent entre eux (OU éventuellement Information, Énergie et Matière).

## 4. La fonction Adhérence du système

### 4.1. Introduction



| 15 min



| Identifier, spécifier, et modéliser les exigences associées à l'exigence fonctionnelle d'adhérence

### 4.2. L'exigence fonctionnelle d'adhérence

*Temps estimé* : 10 min + 5 min de correction

A partir du travail réalisé jusqu'alors, on cherche à spécifier et hiérarchiser toutes les exigences liées à **l'adhérence** du système. Pour cela, on utilise un diagramme d'exigences<sup>[p.21]</sup>.

Réaliser le diagramme d'exigences de l'exigence fonctionnelle d'adhérence.

# 5. La fonction Communication du système

## 5.1. Introduction



15 min



Identifier, spécifier, et modéliser les exigences associées à l'exigence fonctionnelle de communication

## 5.2. L'exigence fonctionnelle de communication

*Temps estimé* : 10 min + 5 min de correction

A partir du travail réalisé jusqu'alors, on cherche à spécifier et hiérarchiser toutes les exigences liées à **la communication** du système. Pour cela, on utilise un diagramme d'exigences<sup>[p.21]</sup>.

Réaliser le diagramme d'exigences de l'exigence fonctionnelle de communication du système.

## 6. La fonction Gestion de l'autonomie du système

### 6.1. Introduction



30 min dont 10 min de correction



Identifier, spécifier, et modéliser les exigences associées à l'exigence fonctionnelle de gestion de l'autonomie

Réaliser la structure du sous-système Système d'alimentation, incluant les flux

### 6.2. L'exigence fonctionnelle de gestion de l'autonomie

*Temps estimé* : 10 min + 5 min de correction

A partir du travail réalisé, on cherche à spécifier et hiérarchiser toutes les exigences liées à **la gestion de l'autonomie** du système. Pour cela, on utilise un diagramme d'exigences<sup>[p.21]</sup>.

Réaliser le diagramme d'exigences de l'exigence fonctionnelle de gestion de l'autonomie du système.

### 6.3. La structure du sous-système Système d'alimentation électronique

En considérant l'architecture fonctionnelle réalisée à l'étape **Architecture interne**, nous allons définir les constituants du sous-système Système d'alimentation électronique. On utilisera un diagramme de blocs internes<sup>[p.21]</sup>.

#### Question n° 1

Réaliser le diagramme de blocs internes du système d'alimentation électronique.

#### Question n° 2

Ajouter les flux d'énergie qui transitent entre eux.

## 7. L'exigence de Maintenance du système

### 7.1. Introduction



30 min dont 10 min de correction



Identifier, spécifier, et modéliser les exigences associées à l'exigence non fonctionnelle de maintenance

Modéliser la fonction Mise en service du système et ses interactions

### 7.2. L'exigence non fonctionnelle de maintenance

*Temps estimé* : 10 min + 5 min de correction

A partir du travail réalisé jusqu'alors, on cherche à spécifier et hiérarchiser toutes les exigences liées à **la maintenance** du système. Pour cela, on utilise un diagramme d'exigences<sup>[p.21]</sup>.


Réaliser le diagramme d'exigences de l'exigence non fonctionnelle de maintenance.

### 7.3. La fonction Mise en service du système

*Temps estimé* : 10 min + 5 min de correction

Vous avez défini la structure de l'exigence non fonctionnelle de maintenance du système.

On s'intéresse maintenant à la fonction Mise en service et ses interactions.

On cherche à décrire la fonction Mise en service pour que le système exécute ses missions. On utilise un  diagramme de cas d'utilisation.<sup>[p.11]</sup>

Réaliser le diagramme de cas d'utilisation de la fonction Mise en service.



## 8. L'exigence de Sécurité du système

### 8.1. Introduction



| 15 min dont 5 min de correction



| Spécifier et hiérarchiser l'exigence non fonctionnelle de sécurité

### 8.2. L'exigence non fonctionnelle de sécurité

A partir du travail réalisé à l'étape *Exigences techniques du système*, on cherche à spécifier et hiérarchiser toutes les exigences liées à **la sécurité** du système. Pour cela, on utilise un diagramme d'exigences<sup>[p.21]</sup>.

Réaliser le diagramme d'exigences de l'exigence non fonctionnelle de sécurité.

# 9. Synthèse des exigences et correspondance avec les composants

## 9.1. Introduction



15 min



Appréhender le lien entre exigences et architecture

## 9.2. Synthèse des exigences et composants

Maintenant que vous avez réalisé les différents diagrammes d'exigences et diagrammes de blocs internes du système, nous allons chercher à répondre aux questions suivantes :

- quel(s) composant(s) permet(tent) de satisfaire telle exigence ?
- quelle(s) exigence(s) sont impactées par la modification de tel(s) composant(s) ?



Cette vidéo<sup>[<https://www.youtube.com/watch?v=t4vRYhEWQOg&t=2008s>]</sup> montre comment créer ce type de matrice.

Réaliser une matrice de correspondance entre la synthèse des exigences et les composants.


# 10. Organisation et navigation du modèle

## 10.1. Introduction



- | Organiser le modèle et permettre sa navigabilité

## 10.2. Diagramme de package

A partir du travail réalisé jusqu'alors, créer un  diagramme de package qui apporte une structure à l'ensemble des diagrammes que vous avez réalisés. Si le logiciel utilisé le permet, utiliser les liens hypertextes pour permettre d'ouvrir les différents diagrammes à partir de ce diagrammes de package.

En vous appuyant sur les typologies de diagrammes SysML, proposer une diagramme de package de synthèse

# Synthèse

Lors de cette séquence, vous avez appris à mettre en œuvre une partie d'une démarche d'Ingénierie Système basée sur la modélisation, en manipulant les diagrammes les plus connus du langage SysML.

# Glossaire

<b>Architecture interne</b>	<p>Ce qui compose, en tentant de conserver au maximum un point de vue fonctionnel, le système et les liens détaillés entre les différents éléments. Ces éléments devront être développés et fournis à votre client.</p>
<b>Contexte organique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Objets (au sens large pouvant inclure des humains), constituants du contexte d'utilisation en liaison avec le système étudié. Ces objets ne font pas partie du système étudié.</li> <li>• Liens physiques (interfaces ou connexions physiques) entre ces objets, constituants du contexte et le système étudié.</li> </ul> <p>En d'autres termes, ce qu'il y a autour du système et la nature de ces interactions.</p>
<b>Diagramme d'exigences</b> <i>≈ req</i> <i>≈ requirement diagram</i>	<p>Les diagrammes d'exigences servent à préciser ce que l'on attend du système, généralement dérivées du cahier des charges.</p>
<b>Diagramme de blocs internes</b> <i>≈ ibd</i> <i>≈ internal block diagram</i>	<p>Un diagramme de blocs internes est un diagramme structurel statique. L'objectif des diagrammes de blocs internes (IBD) est de montrer le contenu structurel encapsulé (composants, propriétés, connecteurs, ports, interfaces) des blocs afin qu'ils puissent être décomposés de manière récursive et "reliés" à l'aide d'interfaces. Autrement dit, un IBD est une vue "boîte blanche" (je comprends et je décris ce qu'il y a à l'intérieur du système considéré) d'un bloc qui a jusqu'alors été décrit en "boîte noire" (je ne sais pas ce qui se passe à l'intérieur, je ne peux que constater son comportement).</p>
<b>Diagramme de cas d'utilisation</b> <i>≈ uc</i> <i>≈ use case</i>	<p>Un diagramme de cas d'utilisation fournit une description de haut niveau de la fonctionnalité qui est réalisée par l'interaction entre les systèmes ou les parties du système.</p>
<b>Diagramme de définition de blocs</b> <i>≈ bdd</i> <i>≈ block definition diagram</i>	<p>Un diagramme de définition de blocs est un diagramme structurel statique.</p> <p>L'objectif des diagrammes de définition de blocs est de spécifier les composants du système, leur contenu (propriétés, comportements, contraintes), leurs interfaces et leurs relations.</p>