

# CI-1 : Analyser et décrire les systèmes industriels

## CI-1-1 : Décrire un système avec l'ingénierie système

LYCÉE CARNOT - DIJON, 2024 - 2025

Germain Gondor

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Industries & Entreprises
- 3 Industrie 4.0
- 4 Cahier des Charges Fonctionnelles (CdCF)
- 5 Ingénierie Système
- 6 SysML
- 7 Analyse et description des systèmes à l'aide de SysML

# Sommaire

- 1 Introduction
  - Ingénieur pour demain
  - Devenir ingénieur
  - Être élève en CPGE
  - Devenir ingénieur 3D
  - Compétences ingénieur
- 2 Industries & Entreprises
- 3 Industrie 4.0
- 4 Cahier des Charges Fonctionnelles (CdCF)
- 5 Ingénierie Système
- 6 SysML

# Ingénieur pour demain

Élèves en CPGE, de nombreuses portes s'ouvrent à vous. Certains deviendront:

# Ingénieur pour demain

Élèves en CPGE, de nombreuses portes s'ouvrent à vous. Certains deviendront:

- profs (ce n'est pas grave...)

# Ingénieur pour demain

Élèves en CPGE, de nombreuses portes s'ouvrent à vous. Certains deviendront:

- profs (ce n'est pas grave...)
- chercheurs (enseignants chercheurs)

# Ingénieur pour demain

Élèves en CPGE, de nombreuses portes s'ouvrent à vous. Certains deviendront:

- profs (ce n'est pas grave...)
- chercheurs (enseignants chercheurs)
- ingénieurs (la plupart)

# Ingénieur pour demain

Élèves en CPGE, de nombreuses portes s'ouvrent à vous. Certains deviendront:

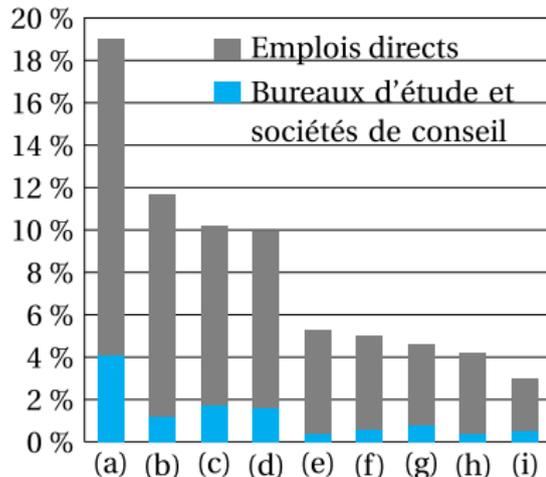
- profs (ce n'est pas grave...)
- chercheurs (enseignants chercheurs)
- ingénieurs (la plupart)
- ...

# Ingénieur pour demain

L'éventail des secteurs économiques dans lesquels vous allez travailler est très large :

# Ingénieur pour demain

L'éventail des secteurs économiques dans lesquels vous allez travailler est très large : Pour cela, vous intégrerez ou vous créerez des **entreprises**.



- (a) Industries automobile, aéronautique, navale et ferroviaire
- (b) Bâtiment, travaux publics et construction
- (c) Énergies (industries liées au pétrole, gaz, nucléaire, etc.)
- (d) Technologies de l'information (service)
- (e) Industries chimique et pharmaceutique
- (f) Autres secteurs industriels
- (g) Institutions financières, banque et assurance
- (h) Industrie agroalimentaire (transformation)
- (i) Agriculture, sylviculture et pêche

# Vos défis pour demain

Accès à l'eau

# Vos défis pour demain

Accès à l'eau



# Vos défis pour demain

Accès à l'eau



# Vos défis pour demain

## Accès à l'eau



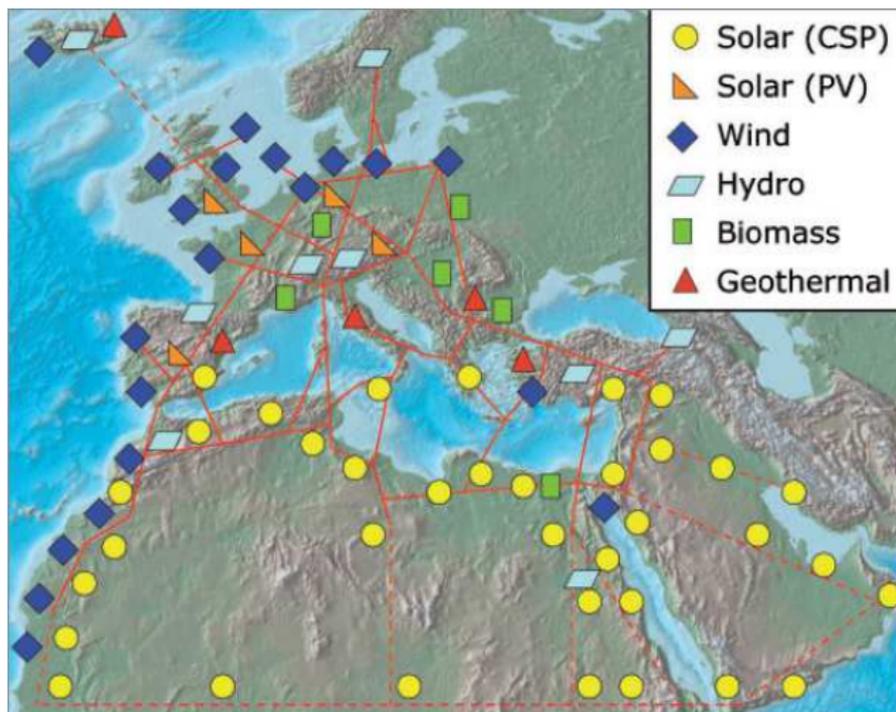
# Vos défis pour demain

## Accès à l'eau



# Vos défis pour demain

Accès à l'énergie



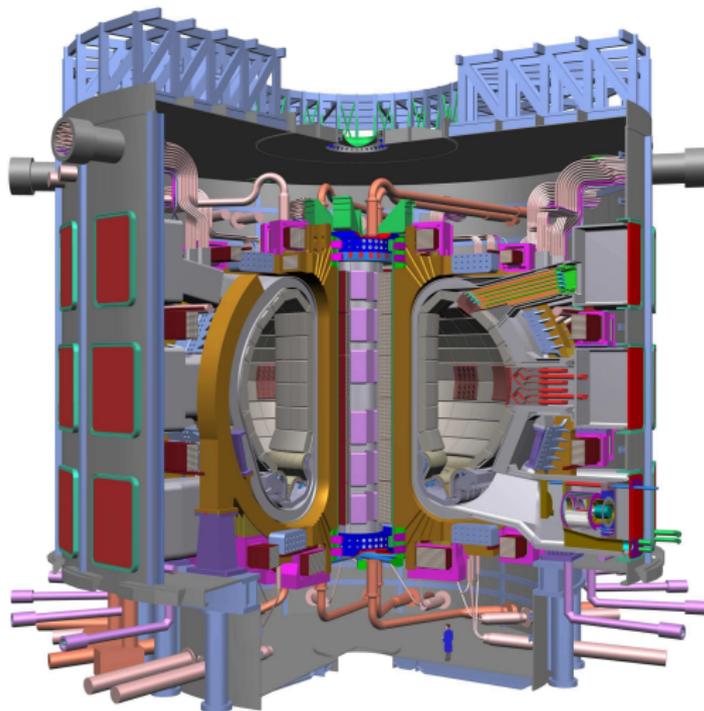
# Vos défis pour demain

Accès à l'énergie



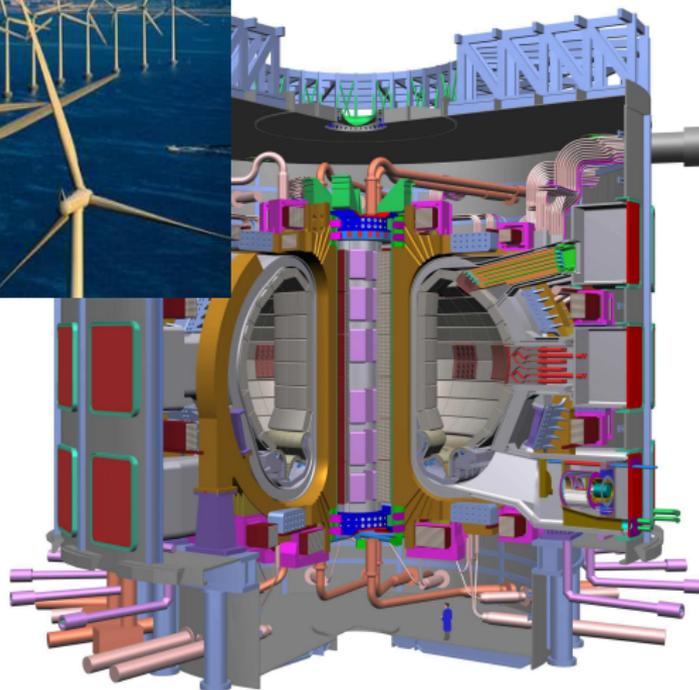
# Vos défis pour demain

Accès à l'énergie



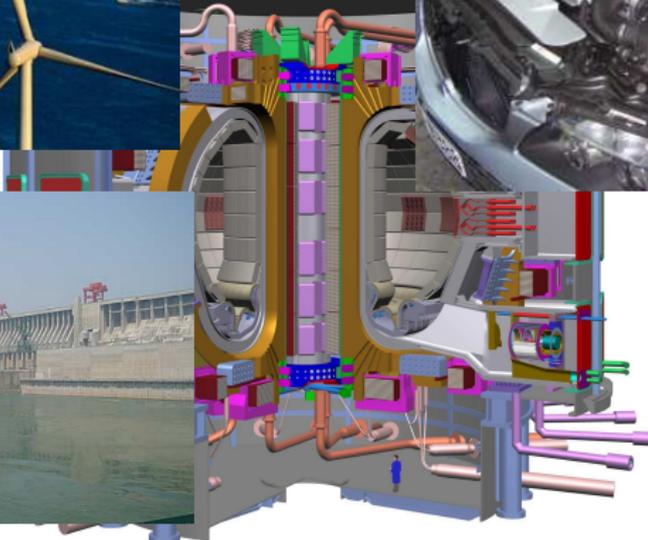
# Vos défis pour demain

Accès à l'énergie



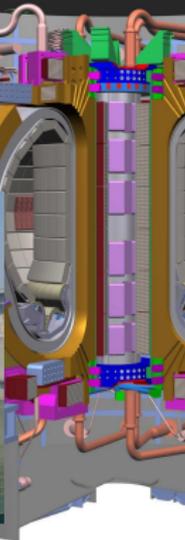
# Vos défis pour demain

Accès à l'énergie



# Vos défis pour demain

## Accès à l'énergie



# Vos défis pour demain

Gérer les bouleversements climatiques



# Vos défis pour demain

Gérer les bouleversements climatiques



# Vos défis pour demain

Accès à la santé



# Vos défis pour demain

## Accès aux transports



Airbus A380



Supertanker



Train Grande Vitesse



Echangeur fluvial rotatif de Filkirk

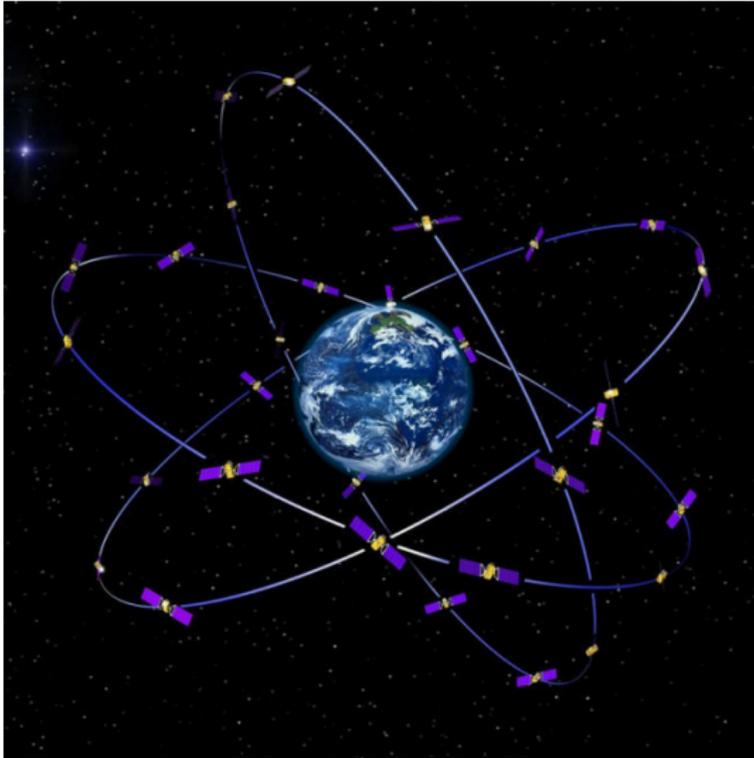
# Vos défis pour demain

Accès à l'information



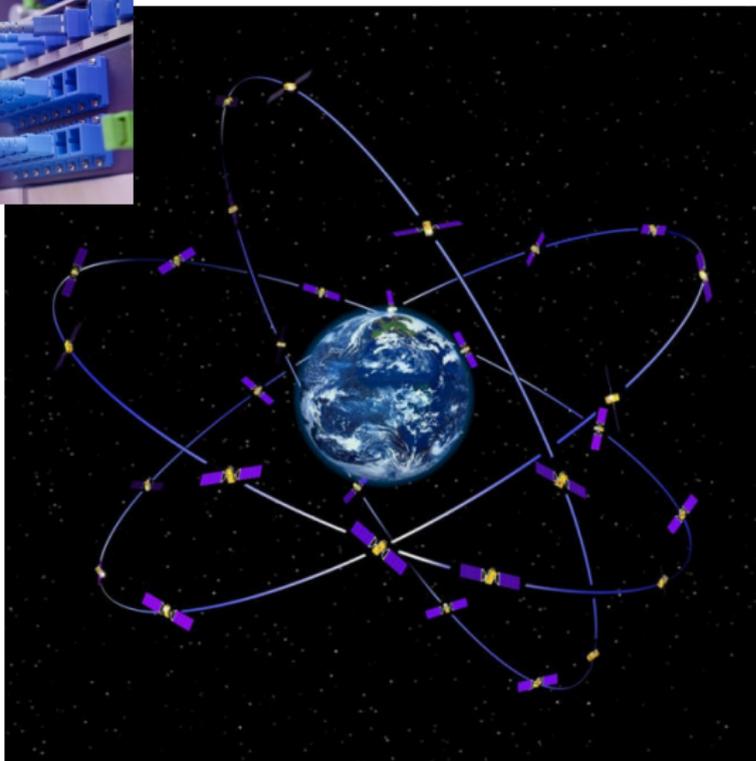
# Vos défis pour demain

Accès à l'information



# Vos défis pour demain

## Accès à l'information



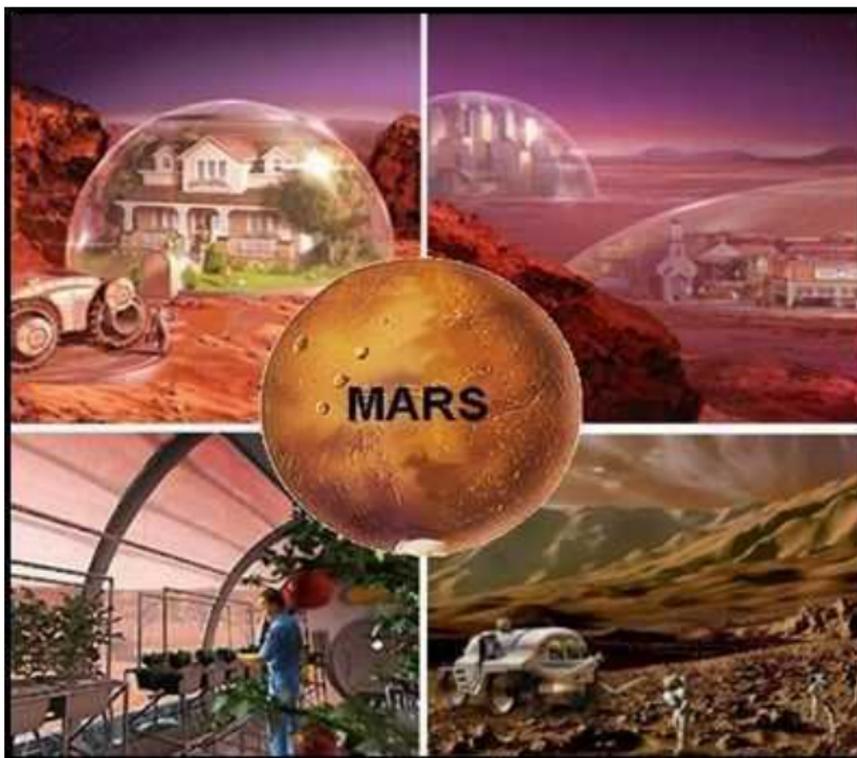
# Vos défis pour demain

## Habiter d'autres planètes



# Vos défis pour demain

## Habiter d'autres planètes



# Être élève en CPGE :

# Être élève en CPGE :



# Être élève en CPGE :



Ce n'est pas cela !

# Être élève en CPGE :



# Être élève en CPGE :



Facebook??

# Être élève en CPGE :



Facebook?? C'est pour les vieux...

# Être élève en CPGE :



ouah té an prépa, boloss...

# Être élève en CPGE :

QUELQUES HUMANOÏDES RARES



**CENTRALIEN**



**NORMALIEN**



**ALIEN**

# Être élève en CPGE :

QUELQUES HUMANOÏDES RARES



**CENTRALIEN**



**NORMALIEN**

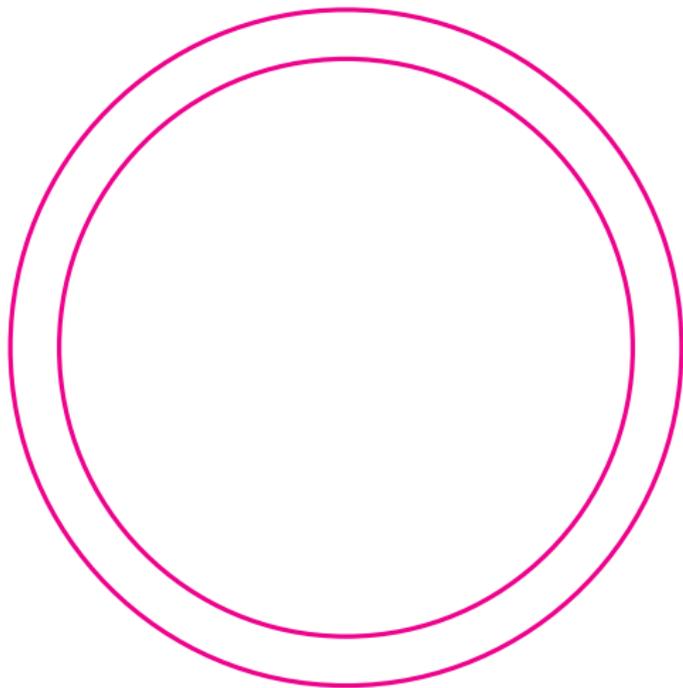


**ALIEN**

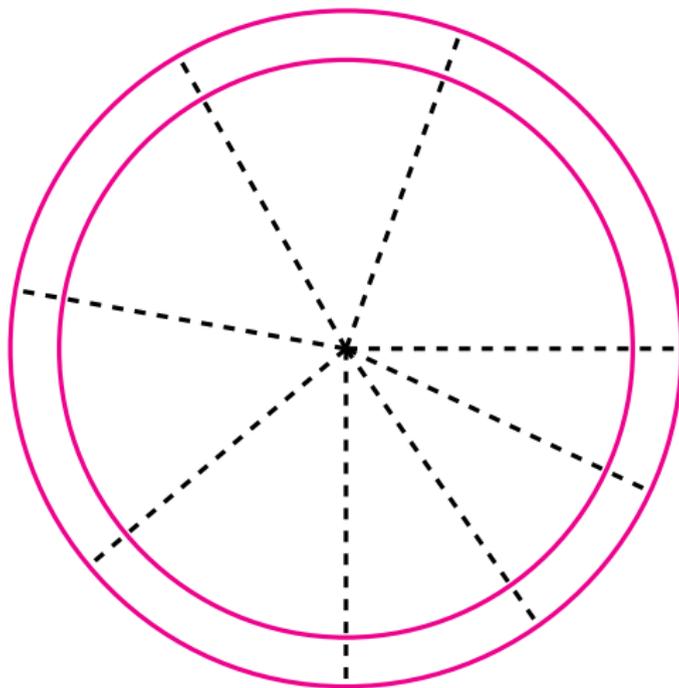
Attention, ceci pourrait vous arriver !

# Être élève en CPGE :

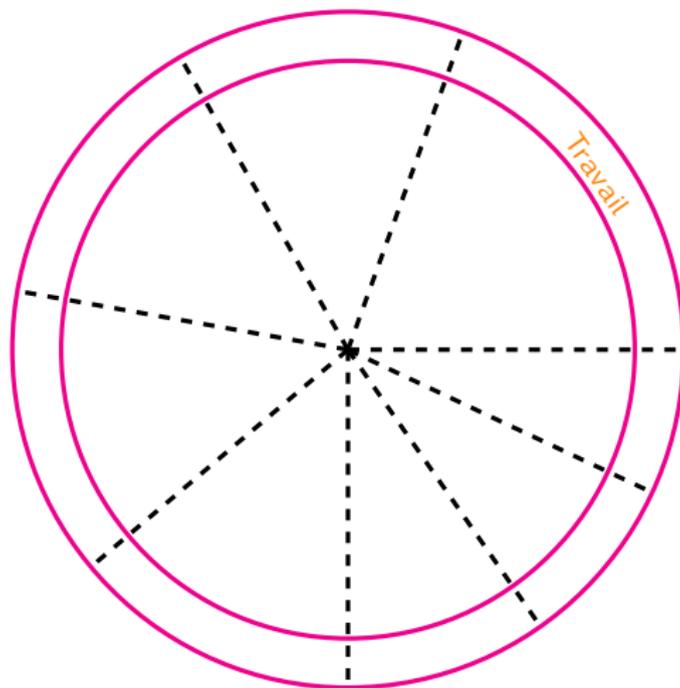
# Être élève en CPGE :



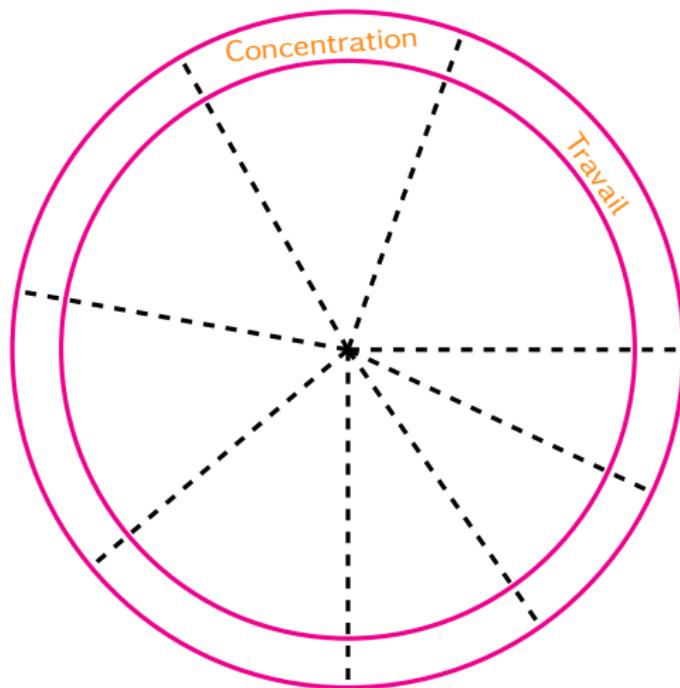
# Être élève en CPGE :



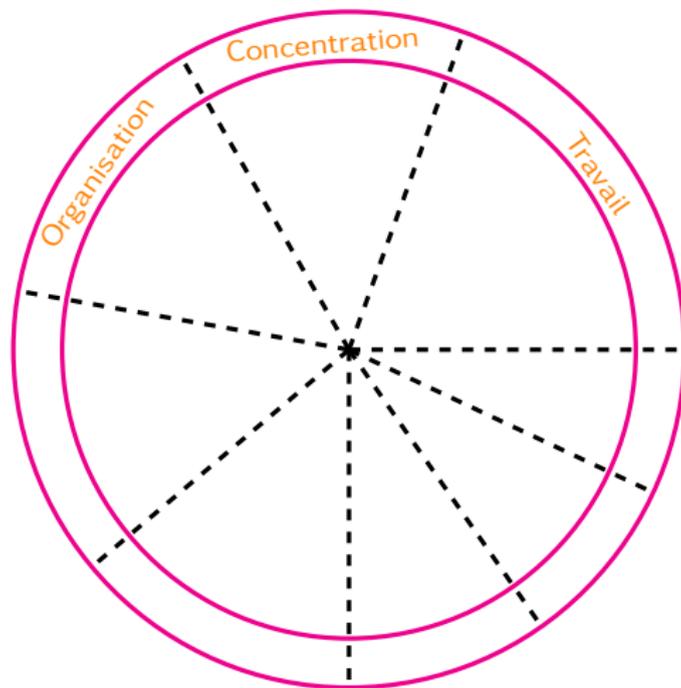
# Être élève en CPGE :



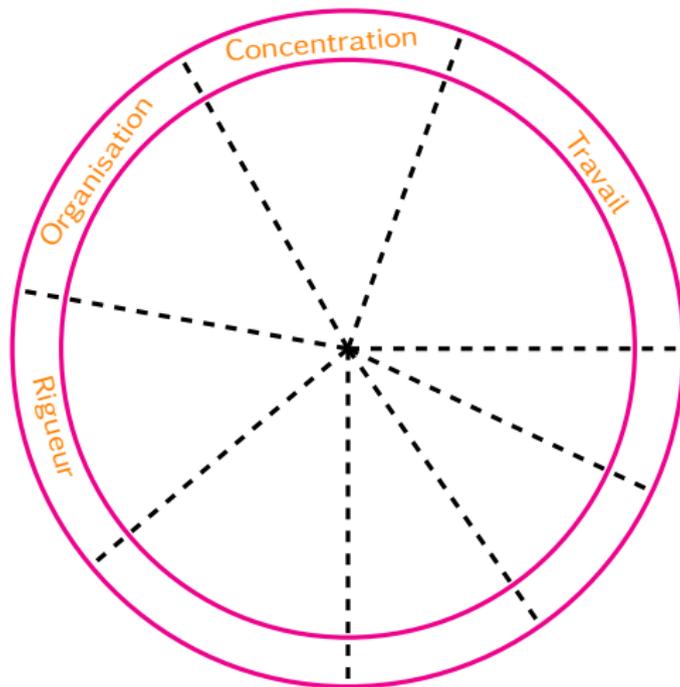
# Être élève en CPGE :



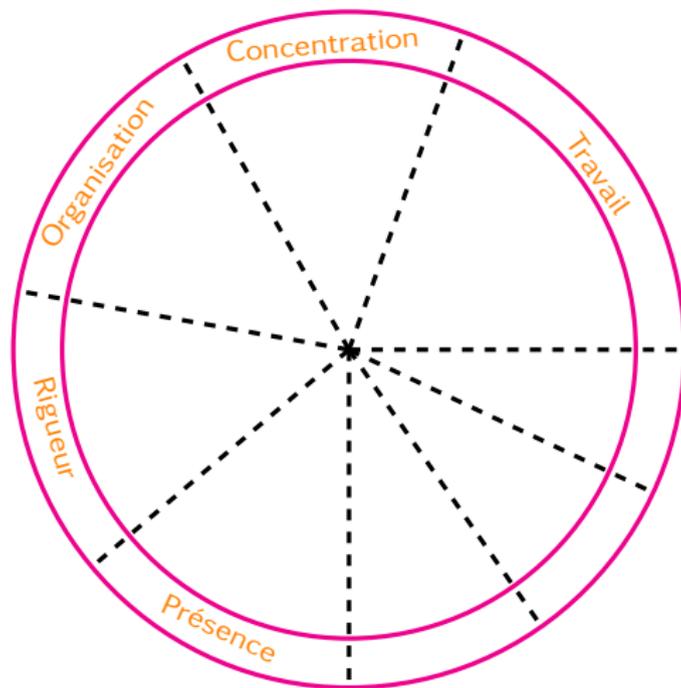
# Être élève en CPGE :



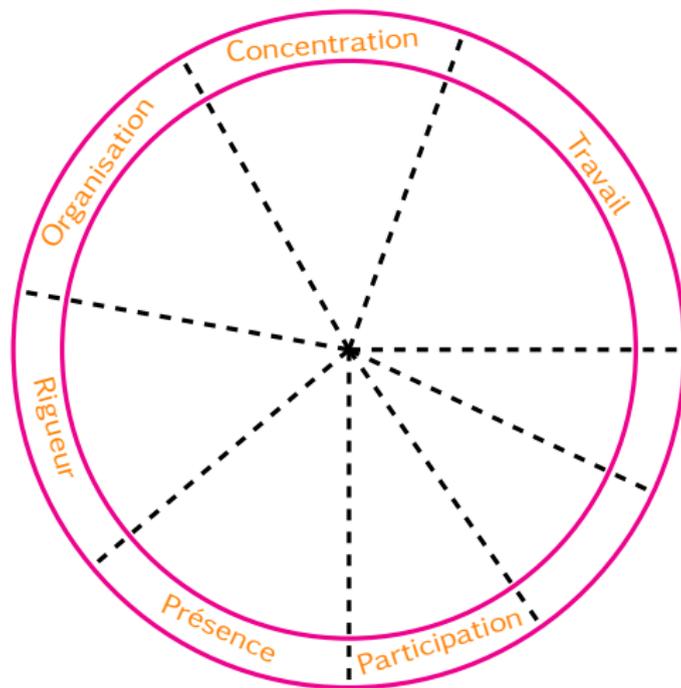
# Être élève en CPGE :



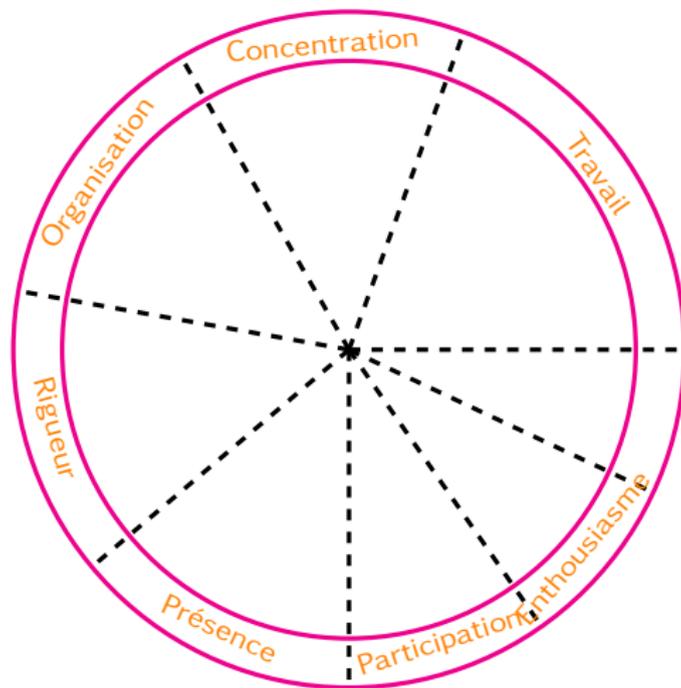
# Être élève en CPGE :



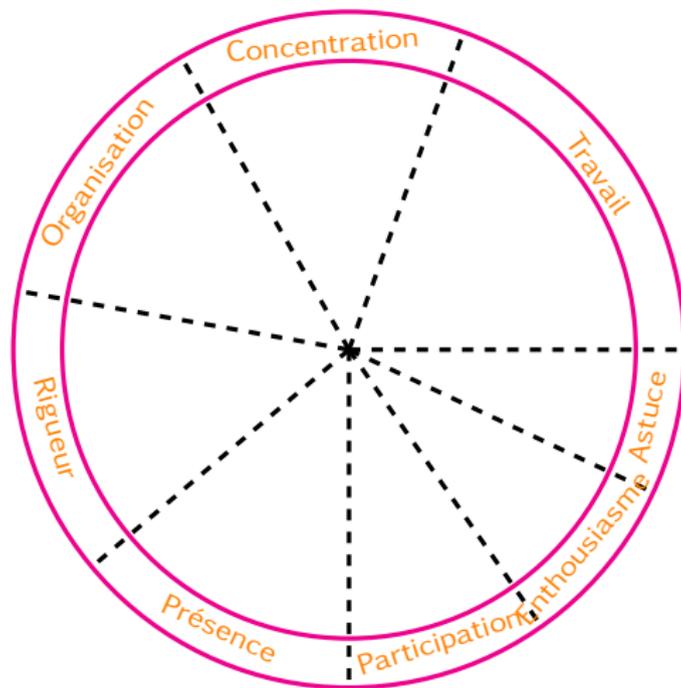
# Être élève en CPGE :



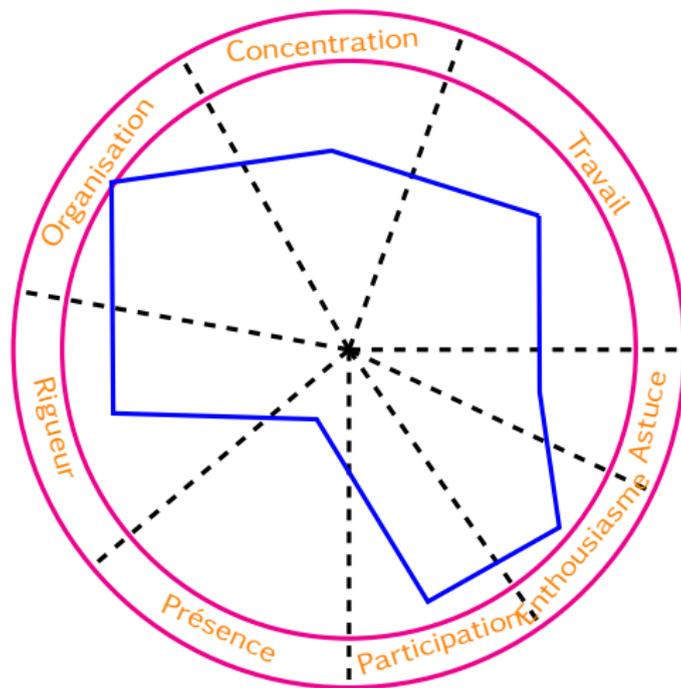
# Être élève en CPGE :



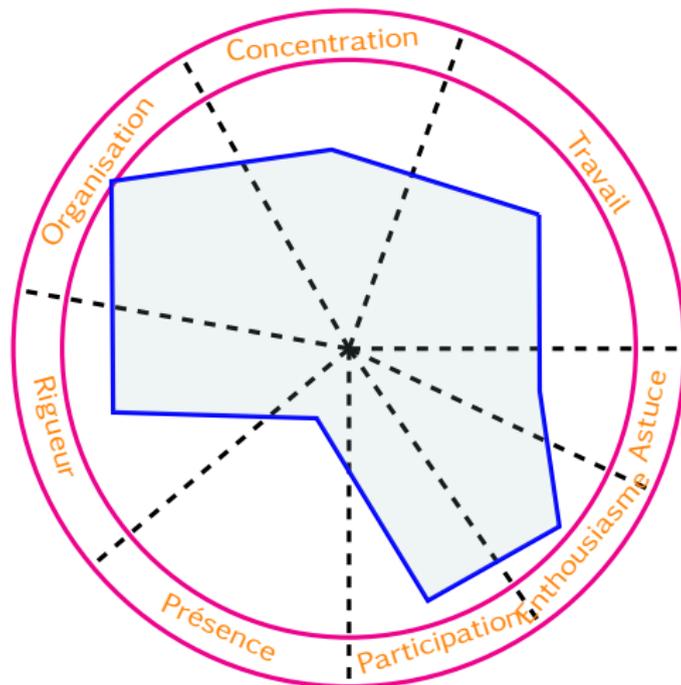
# Être élève en CPGE :



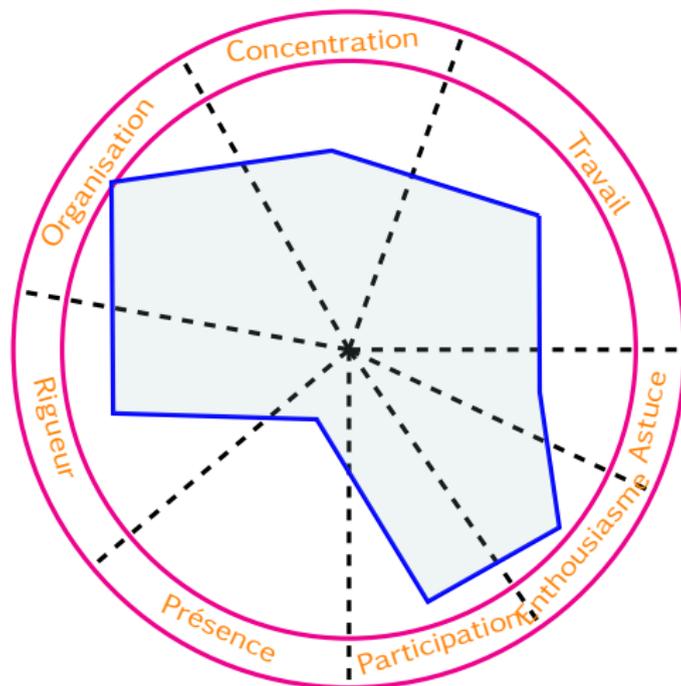
# Être élève en CPGE :



# Être élève en CPGE :



# Être élève en CPGE :



Il faut chercher à obtenir la plus grande surface pour profiter pleinement de ce passage en classe préparatoire.

# Devenir ingénieur 3D

Pour relever les défis du XXI<sup>ème</sup> siècle, vous devez devenir des  
ingénieurs trois dimensions :

# Devenir ingénieur 3D

Pour relever les défis du XXI<sup>ème</sup> siècle, vous devez devenir des  
ingénieurs trois dimensions :

- généralistes, de hauts niveaux scientifique et technique

# Devenir ingénieur 3D

Pour relever les défis du XXI<sup>ème</sup> siècle, vous devez devenir des  
ingénieurs trois dimensions :

- généralistes, de hauts niveaux scientifique et technique
- experts dans le lancement et le pilotage de projets innovants

# Devenir ingénieur 3D

Pour relever les défis du XXI<sup>ème</sup> siècle, vous devez devenir des **ingénieurs trois dimensions** :

- généralistes, de hauts niveaux scientifique et technique
- experts dans le lancement et le pilotage de projets innovants
- à forte culture internationale

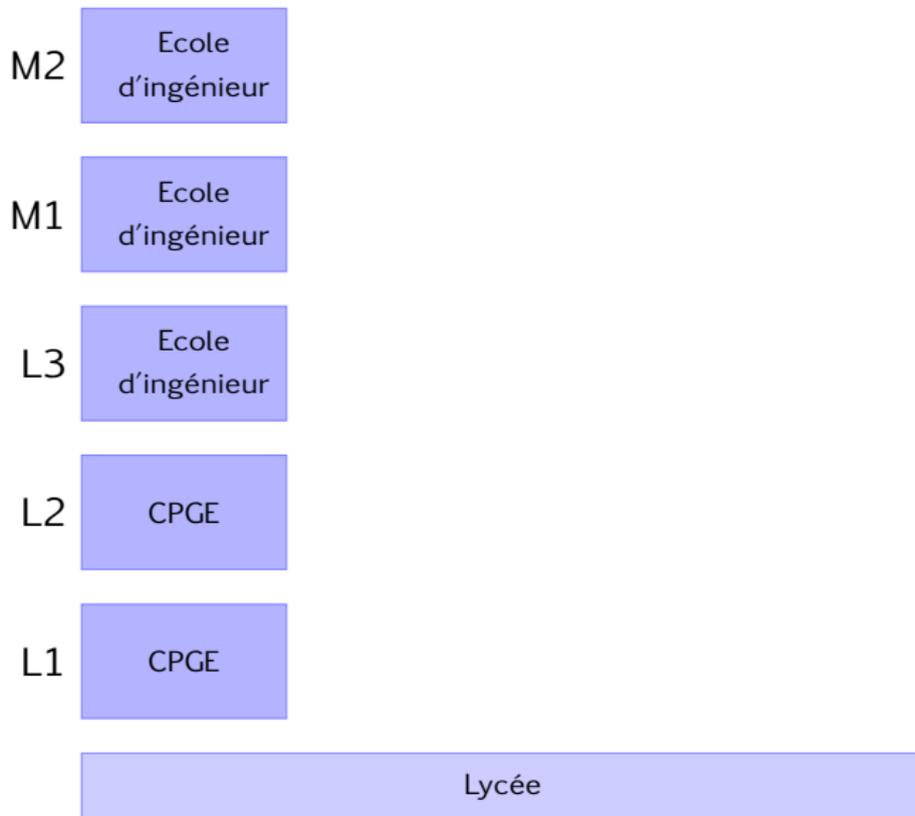
# Devenir ingénieur 3D

Pour relever les défis du XXI<sup>ème</sup> siècle, vous devez devenir des **ingénieurs trois dimensions** :

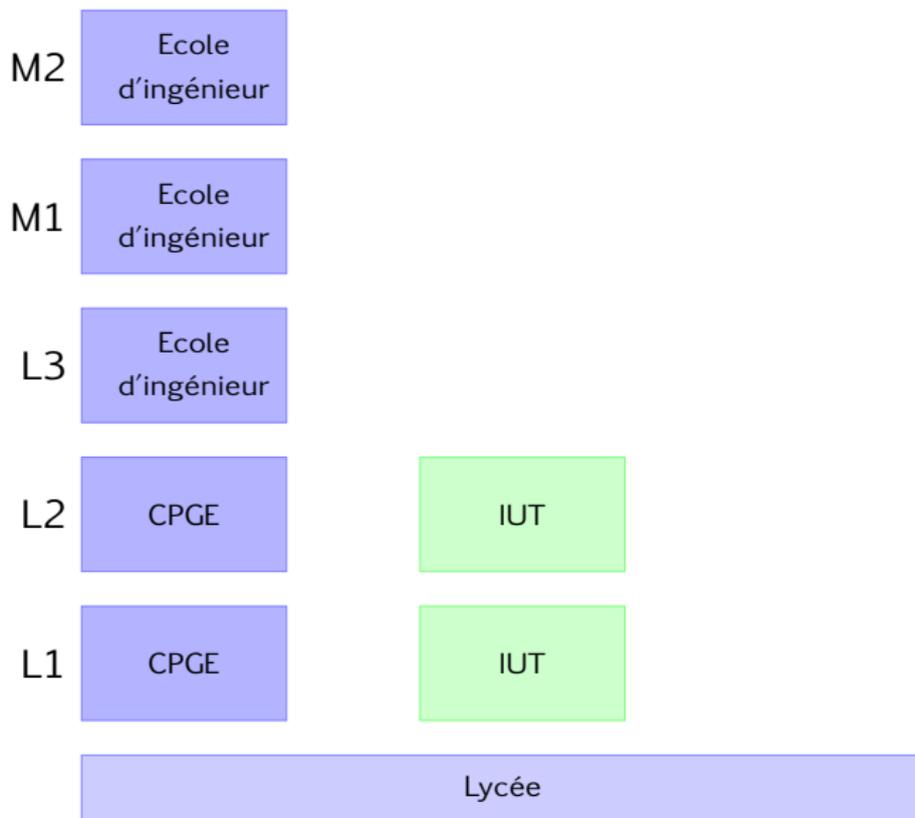
- généralistes, de hauts niveaux scientifique et technique
- experts dans le lancement et le pilotage de projets innovants
- à forte culture internationale

Formés pour les entreprises, les gouvernements et les institutions, vous devrez être capables d'**intégrer les grandes questions environnementales et sociétales** dans une stratégie de développement équilibré.

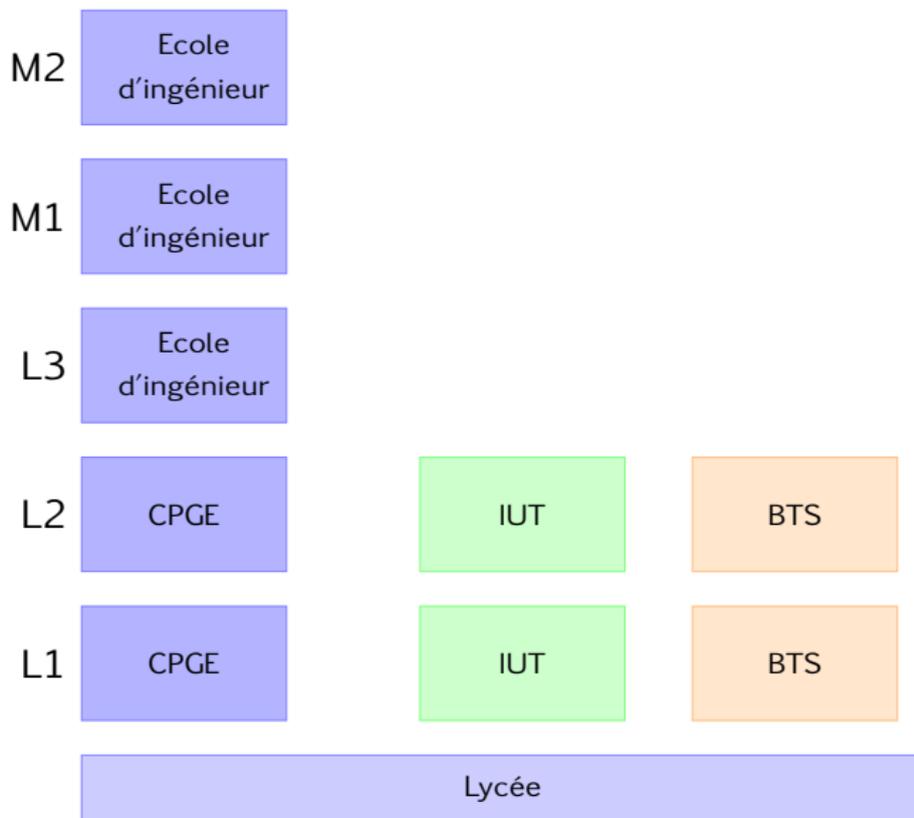
# 40 % de la formation d'ingénieur s'effectue en prépa !



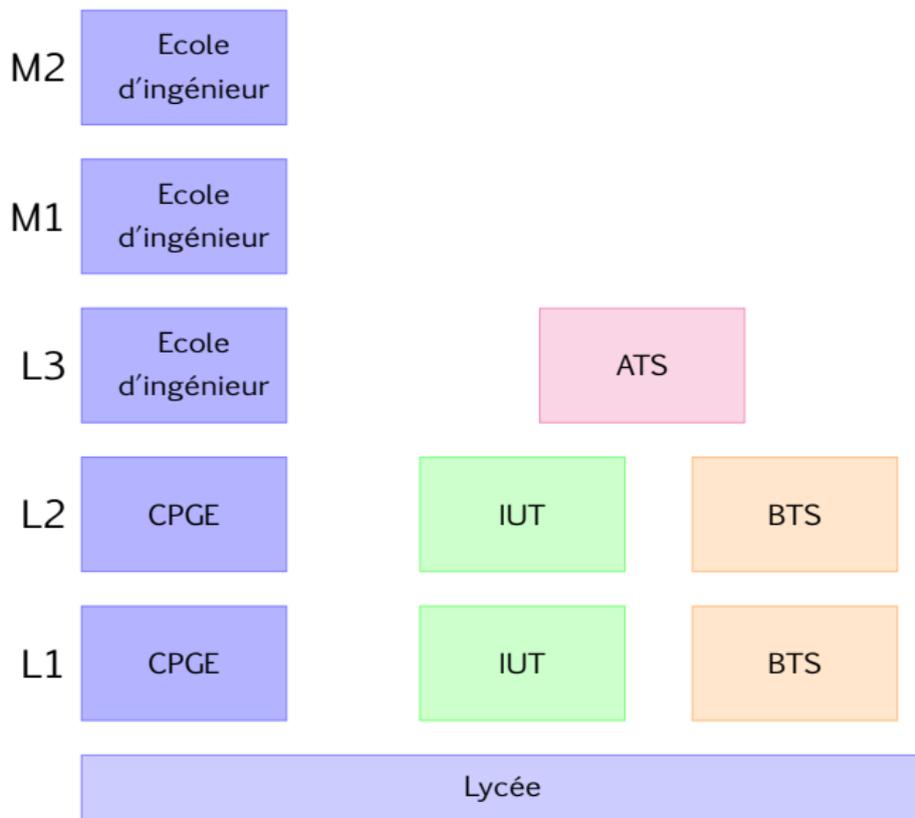
# 40 % de la formation d'ingénieur s'effectue en prépa !



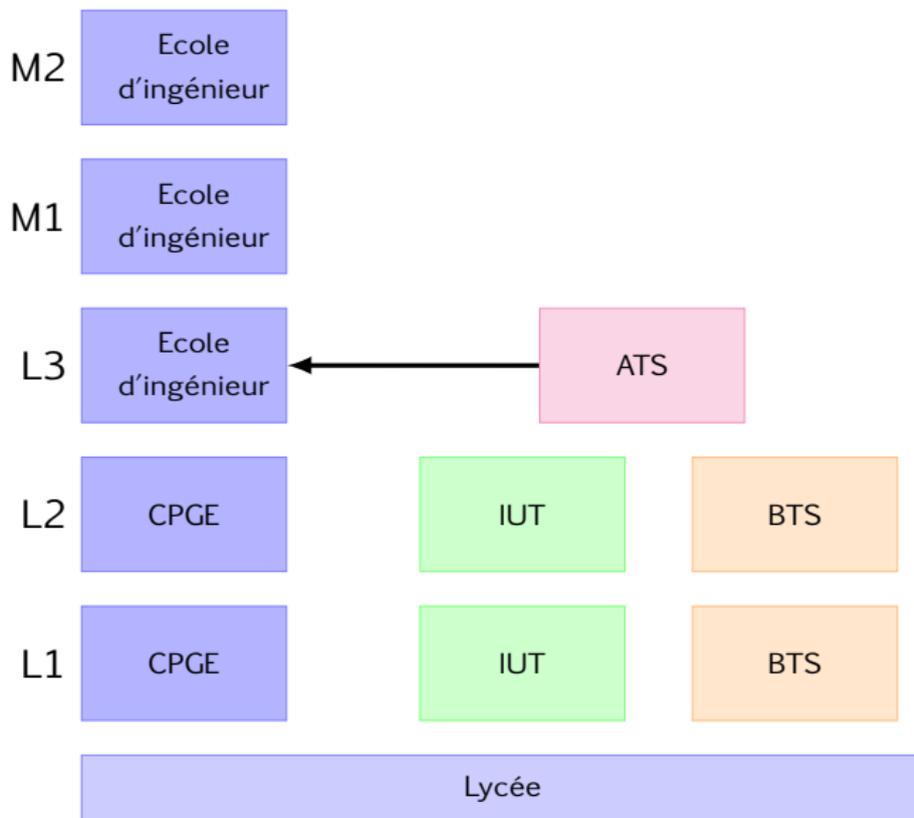
# 40 % de la formation d'ingénieur s'effectue en prépa !



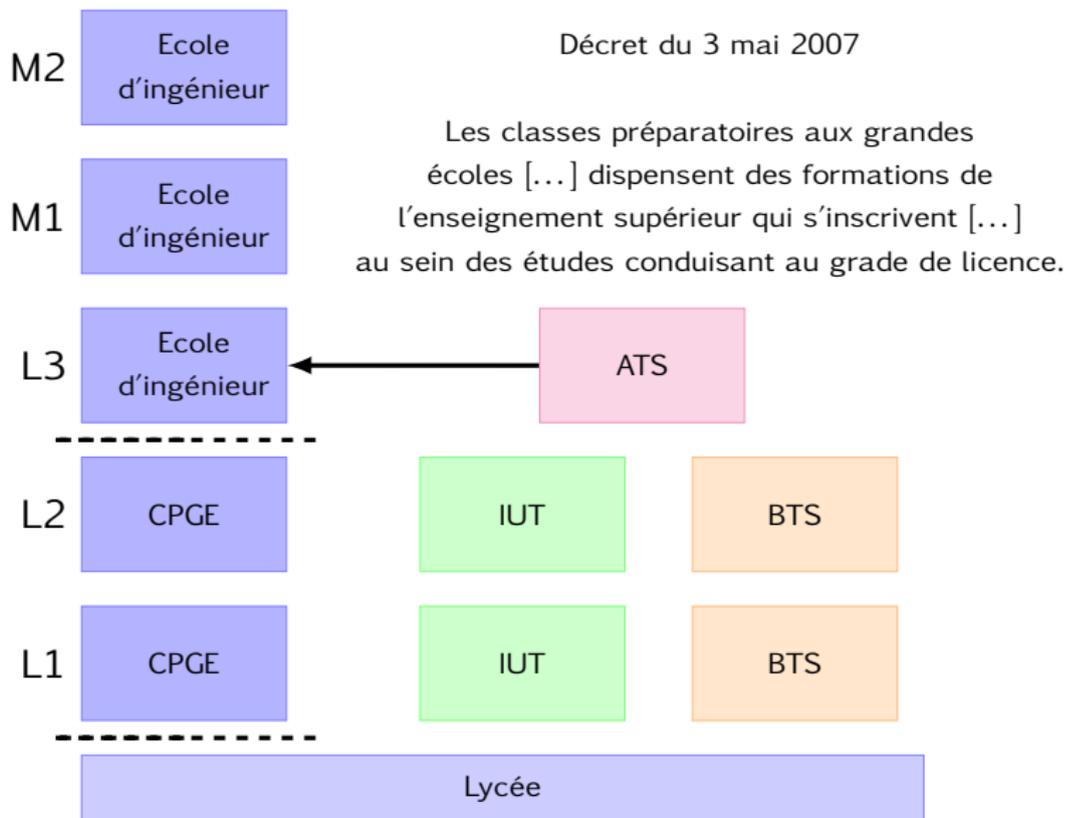
# 40 % de la formation d'ingénieur s'effectue en prépa !



# 40 % de la formation d'ingénieur s'effectue en prépa !



# 40 % de la formation d'ingénieur s'effectue en prépa !

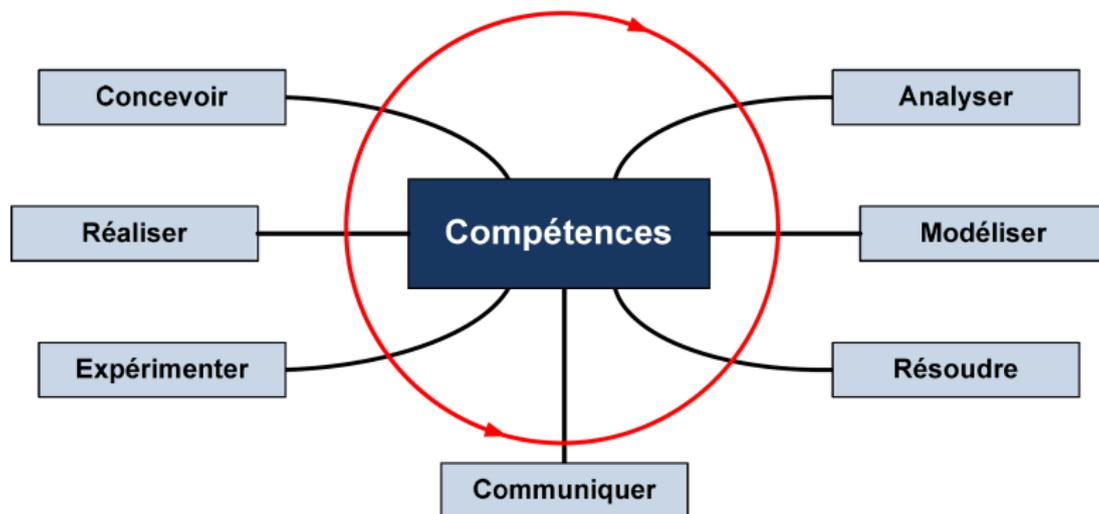


# Compétences ingénieur

La classe préparatoire constitue vos deux premières années de formation durant laquelle vous allez acquérir un grand nombre de connaissances mais aussi de compétences.

# Compétences ingénieur

La classe préparatoire constitue vos deux premières années de formation durant laquelle vous allez acquérir un grand nombre de connaissances mais aussi de compétences.



# Compétences ingénieur

La filière **PTSI-PT** permet d'acquérir des compétences dans **tous** les champs présentés précédemment.

# Compétences ingénieur

La filière **PTSI-PT** permet d'acquérir des compétences dans **tous** les champs présentés précédemment.

En filière **PCSI-PSI** tout comme en **MP2I-PSI** ou **MPSI-PSI**, la compétence **Réaliser** n'est pas abordée.

# Compétences ingénieur

La filière **PTSI-PT** permet d'acquérir des compétences dans **tous** les champs présentés précédemment.

En filière **PCSI-PSI** tout comme en **MP2I-PSI** ou **MPSI-PSI**, la compétence **Réaliser** n'est pas abordée.

Enfin, pour obtenir la compétence **Expérimenter**, les **MP2I** et **MPSI** devront prendre l'option SI au second semestre.

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Industries & Entreprises**
  - Problématique
  - Entreprise
- 3 Industrie 4.0
- 4 Cahier des Charges Fonctionnelles (CdCF)
- 5 Ingénierie Système
- 6 SysML
- 7 Analyse et description des systèmes à l'aide de SysML

# Problématique

Pour survivre, une entreprise doit réussir à **satisfaire ses clients**.

# Problématique

Pour survivre, une entreprise doit réussir à **satisfaire ses clients**.

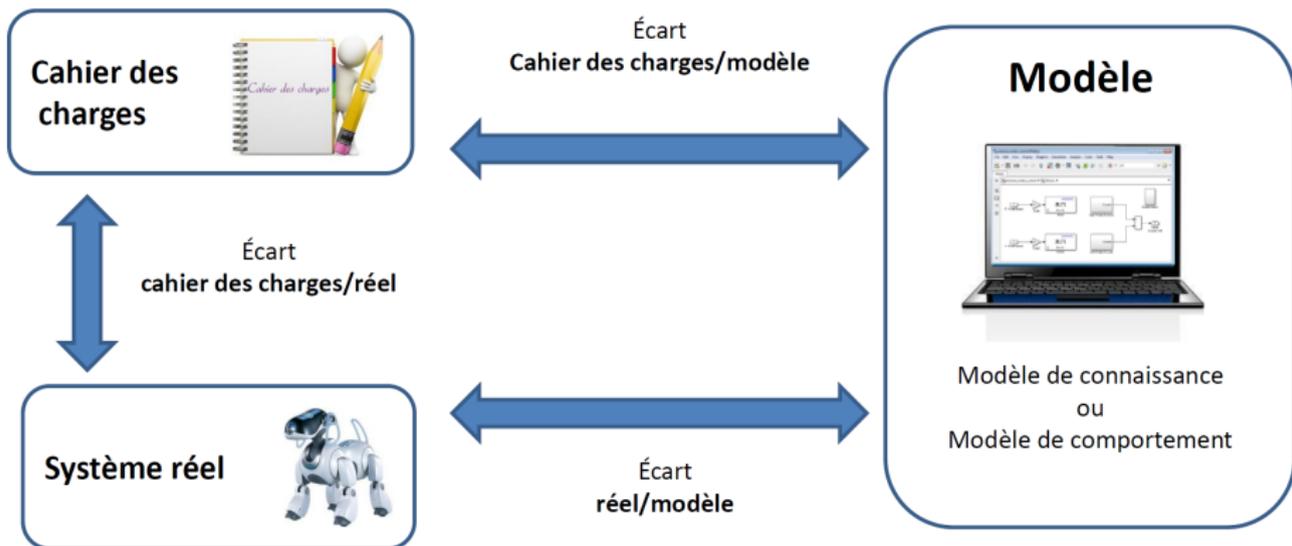
Ce dernier est donc au cœur du processus de conception. En effet, à cause de la concurrence qui peut proposer des produits similaires, le rôle de l'entreprise est donc de **minimiser l'écart entre le besoin du client et la prestation ou le produit réalisé**.

# Problématique

Pour survivre, une entreprise doit réussir à **satisfaire ses clients**.

Ce dernier est donc au cœur du processus de conception. En effet, à cause de la concurrence qui peut proposer des produits similaires, le rôle de l'entreprise est donc de **minimiser l'écart entre le besoin du client et la prestation ou le produit réalisé**.

Ainsi tout produit, tout système naît de la volonté de satisfaire un besoin. Ce besoin peut être un simple rêve, une envie ou la réponse à un problème.



# Besoin

## DÉFINITION : Besoin

*nécessité ou au désir éprouvé par l'utilisateur (l'acheteur) potentiel. Il concerne la nature de ses attentes et non le volume du marché. Il peut être exprimé ou implicite (besoin non exprimé actuel ou futur).*

Au cours du temps, les besoins exprimés ont évolués. A partir d'une simple description d'un usage:

# Besoin

## DÉFINITION : Besoin

*nécessité ou au désir éprouvé par l'utilisateur (l'acheteur) potentiel. Il concerne la nature de ses attentes et non le volume du marché. Il peut être exprimé ou implicite (besoin non exprimé actuel ou futur).*

Au cours du temps, les besoins exprimés ont évolués. A partir d'une simple description d'un usage:

- tondre la pelouse,

# Besoin

## DÉFINITION : Besoin

*nécessité ou au désir éprouvé par l'utilisateur (l'acheteur) potentiel. Il concerne la nature de ses attentes et non le volume du marché. Il peut être exprimé ou implicite (besoin non exprimé actuel ou futur).*

Au cours du temps, les besoins exprimés ont évolués. A partir d'une simple description d'un usage:

- tondre la pelouse,
- se déplacer rapidement,

# Besoin

## DÉFINITION : Besoin

*nécessité ou au désir éprouvé par l'utilisateur (l'acheteur) potentiel. Il concerne la nature de ses attentes et non le volume du marché. Il peut être exprimé ou implicite (besoin non exprimé actuel ou futur).*

Au cours du temps, les besoins exprimés ont évolués. A partir d'une simple description d'un usage:

- tondre la pelouse,
- se déplacer rapidement,
- communiquer à distance,

# Besoin

## DÉFINITION : Besoin

*nécessité ou au désir éprouvé par l'utilisateur (l'acheteur) potentiel. Il concerne la nature de ses attentes et non le volume du marché. Il peut être exprimé ou implicite (besoin non exprimé actuel ou futur).*

Au cours du temps, les besoins exprimés ont évolués. A partir d'une simple description d'un usage:

- tondre la pelouse,
- se déplacer rapidement,
- communiquer à distance,
- mémoriser l'information,

# Besoin

## DÉFINITION : Besoin

*nécessité ou au désir éprouvé par l'utilisateur (l'acheteur) potentiel. Il concerne la nature de ses attentes et non le volume du marché. Il peut être exprimé ou implicite (besoin non exprimé actuel ou futur).*

Au cours du temps, les besoins exprimés ont évolués. A partir d'une simple description d'un usage:

- tondre la pelouse,
- se déplacer rapidement,
- communiquer à distance,
- mémoriser l'information,
- ...

# Besoin

On arrive ensuite à des contraintes plus importantes comme des contraintes de coût ou une exigence d'innovation:

# Besoin

On arrive ensuite à des contraintes plus importantes comme des contraintes de coût ou une exigence d'innovation:

- tondre la pelouse automatiquement,

# Besoin

On arrive ensuite à des contraintes plus importantes comme des contraintes de coût ou une exigence d'innovation:

- tondre la pelouse automatiquement,
- communiquer à distance la voix et l'image avec un objet portable,

# Besoin

On arrive ensuite à des contraintes plus importantes comme des contraintes de coût ou une exigence d'innovation:

- tondre la pelouse automatiquement,
- communiquer à distance la voix et l'image avec un objet portable,
- enregistrer toute ma discothèque et l'écouter n'importe où,

# Besoin

On arrive ensuite à des contraintes plus importantes comme des contraintes de coût ou une exigence d'innovation:

- tondre la pelouse automatiquement,
- communiquer à distance la voix et l'image avec un objet portable,
- enregistrer toute ma discothèque et l'écouter n'importe où,
- ...

# Besoin

On arrive ensuite à des contraintes plus importantes comme des contraintes de coût ou une exigence d'innovation:

- tondre la pelouse automatiquement,
- communiquer à distance la voix et l'image avec un objet portable,
- enregistrer toute ma discothèque et l'écouter n'importe où,
- ...

A cela se rajoute maintenant des exigences d'environnement ou sociétales :

# Besoin

On arrive ensuite à des contraintes plus importantes comme des contraintes de coût ou une exigence d'innovation:

- tondre la pelouse automatiquement,
- communiquer à distance la voix et l'image avec un objet portable,
- enregistrer toute ma discothèque et l'écouter n'importe où,
- ...

A cela se rajoute maintenant des exigences d'environnement ou sociétales :

- la réalisation du besoin doit se faire sans déchets,

# Besoin

On arrive ensuite à des contraintes plus importantes comme des contraintes de coût ou une exigence d'innovation:

- tondre la pelouse automatiquement,
- communiquer à distance la voix et l'image avec un objet portable,
- enregistrer toute ma discothèque et l'écouter n'importe où,
- ...

A cela se rajoute maintenant des exigences d'environnement ou sociétales :

- la réalisation du besoin doit se faire sans déchets,
- être recyclable,

# Besoin

On arrive ensuite à des contraintes plus importantes comme des contraintes de coût ou une exigence d'innovation:

- tondre la pelouse automatiquement,
- communiquer à distance la voix et l'image avec un objet portable,
- enregistrer toute ma discothèque et l'écouter n'importe où,
- ...

A cela se rajoute maintenant des exigences d'environnement ou sociétales :

- la réalisation du besoin doit se faire sans déchets,
- être recyclable,
- être équitable,

# Besoin

On arrive ensuite à des contraintes plus importantes comme des contraintes de coût ou une exigence d'innovation:

- tondre la pelouse automatiquement,
- communiquer à distance la voix et l'image avec un objet portable,
- enregistrer toute ma discothèque et l'écouter n'importe où,
- ...

A cela se rajoute maintenant des exigences d'environnement ou sociétales :

- la réalisation du besoin doit se faire sans déchets,
- être recyclable,
- être équitable,
- ...

# Produit

## DÉFINITION : Produit

|| *ce qui est ou sera fourni à un utilisateur pour répondre à un besoin*

# Produit

## DÉFINITION : Produit

|| *ce qui est ou sera fourni à un utilisateur pour répondre à un besoin*

Un produit n'est pas obligatoirement un objet technique, cela peut tout aussi bien être un service ou un processus.

Nous nous intéresserons ici uniquement aux produits techniques (industriels).

Avec l'évolution des besoins, les produits ont suivi la même évolution vers plus de technologie et d'automatisation intégrée.

# Produit

Nettoyer le sol



# Produit

Nettoyer le sol



Nettoyer le sol  
et ramasser la  
poussière



# Produit

Nettoyer le sol  
et ramasser la  
poussière



Nettoyer le sol  
et ramasser  
une grande  
quantité de  
poussière



# Produit

Nettoyer le sol  
et ramasser  
une grande  
quantité de  
poussière



Nettoyer le sol  
et ramasser la  
poussière sans  
sac



# Produit

Nettoyer le sol  
et ramasser la  
poussière sans  
sac



Nettoyer le sol  
automatiquement



# Produit

Nettoyer le sol  
automatiquement



# Produit

Nettoyer le sol	Nettoyer le sol et ramasser la poussière	Nettoyer le sol et ramasser une grande quantité de poussière	Nettoyer le sol et ramasser la poussière sans sac	Nettoyer le sol automatiquement
				

# Produit

Nettoyer le sol	Nettoyer le sol et ramasser la poussière	Nettoyer le sol et ramasser une grande quantité de poussière	Nettoyer le sol et ramasser la poussière sans sac	Nettoyer le sol automatiquement
				

Le terme **produit** est souvent remplacé par le terme **système** qui permet une signification plus riche et permet d'élargir à d'autres champs que les produits industriels.

# Entreprise

# Entreprise

## DÉFINITION : Entreprise

*association de personnes mettant en commun des ressources intellectuelles, financières et matérielles dans un objectif partagé : la conception, la réalisation, la commercialisation et le suivi d'un produit ou d'un service à destination d'utilisateurs appelés clients.*

Pour satisfaire le besoin du client mais aussi pour survivre et/ou croître, elle doit veiller à:

Pour satisfaire le besoin du client mais aussi pour survivre et/ou croître, elle doit veiller à:

- un contrôle des **coûts** :

Pour satisfaire le besoin du client mais aussi pour survivre et/ou croître, elle doit veiller à:

- un contrôle des **coûts** :
  - **d'étude:** études de marchés, conception, simulation, conception des outillages

Pour satisfaire le besoin du client mais aussi pour survivre et/ou croître, elle doit veiller à:

- un contrôle des **coûts** :
  - **d'étude:** études de marchés, conception, simulation, conception des outillages
  - **d'industrialisation:** achat des machines, fabrication...

Pour satisfaire le besoin du client mais aussi pour survivre et/ou croître, elle doit veiller à:

- un contrôle des **coûts** :
  - **d'étude:** études de marchés, conception, simulation, conception des outillages
  - **d'industrialisation:** achat des machines, fabrication...
  - **de commercialisation:** publicité, transport...

Pour satisfaire le besoin du client mais aussi pour survivre et/ou croître, elle doit veiller à:

- un contrôle des **coûts** :
  - **d'étude:** études de marchés, conception, simulation, conception des outillages
  - **d'industrialisation:** achat des machines, fabrication...
  - **de commercialisation:** publicité, transport...
  - **d'élimination:** destruction, stockage, recyclage...

Pour satisfaire le besoin du client mais aussi pour survivre et/ou croître, elle doit veiller à:

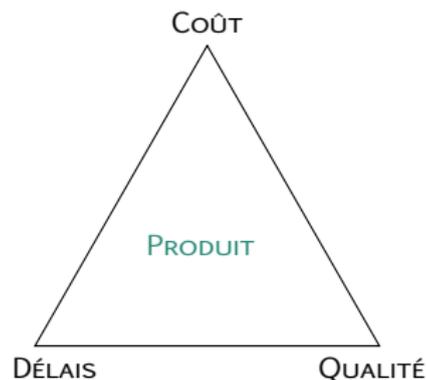
- un contrôle des **coûts** :
  - **d'étude**: études de marchés, conception, simulation, conception des outillages
  - **d'industrialisation**: achat des machines, fabrication...
  - **de commercialisation**: publicité, transport...
  - **d'élimination**: destruction, stockage, recyclage...
- une bonne **qualité** du produit

Pour satisfaire le besoin du client mais aussi pour survivre et/ou croître, elle doit veiller à:

- un contrôle des **coûts** :
  - **d'étude**: études de marchés, conception, simulation, conception des outillages
  - **d'industrialisation**: achat des machines, fabrication...
  - **de commercialisation**: publicité, transport...
  - **d'élimination**: destruction, stockage, recyclage...
- une bonne **qualité** du produit
- des **délais** faibles afin d'assurer une bonne réactivité

Pour satisfaire le besoin du client mais aussi pour survivre et/ou croître, elle doit veiller à:

- un contrôle des **coûts** :
  - **d'étude**: études de marchés, conception, simulation, conception des outillages
  - **d'industrialisation**: achat des machines, fabrication...
  - **de commercialisation**: publicité, transport...
  - **d'élimination**: destruction, stockage, recyclage...
- une bonne **qualité** du produit
- des **délais** faibles afin d'assurer une bonne réactivité



# Définitions

## DÉFINITION : Prix

|| *Équivalent monétaire d'un produit lors d'une transaction commerciale.*

## DÉFINITION : Coût

|| *Charge ou dépense supportée par un intervenant économique à la suite de la production et (ou) de l'utilisation d'un produit.*

## DÉFINITION : Qualité

|| *Ensemble des propriétés et caractéristiques d'un produit qui lui donne l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites.*

# Définitions

## DÉFINITION : Valeur

*Jugement porté par un utilisateur sur le produit. C'est ce qui mesure le degré de satisfaction accordé par le client au produit.*

# Définitions

## DÉFINITION : Valeur

*Jugement porté par un utilisateur sur le produit. C'est ce qui mesure le degré de satisfaction accordé par le client au produit.*

## REMARQUE :

# Définitions

## DÉFINITION : Valeur

*Jugement porté par un utilisateur sur le produit. C'est ce qui mesure le degré de satisfaction accordé par le client au produit.*

## REMARQUE :

$$\text{Qualité} = \frac{\text{Satisfaction offerte}}{\text{Satisfaction souhaitée}} \quad \text{Valeur} = \frac{\text{Satisfaction du besoin}}{\text{Prix}}$$

# Définitions

## DÉFINITION : Valeur

*Jugement porté par un utilisateur sur le produit. C'est ce qui mesure le degré de satisfaction accordé par le client au produit.*

## REMARQUE :

$$\text{Qualité} = \frac{\text{Satisfaction offerte}}{\text{Satisfaction souhaitée}} \quad \text{Valeur} = \frac{\text{Satisfaction du besoin}}{\text{Prix}}$$

La **qualité** étant une **notion abstraite**, il convient de se fixer des **critères d'appréciation** permettant de quantifier ces satisfactions.

# Sommaire

1 Introduction

2 Industries & Entreprises

**3 Industrie 4.0**

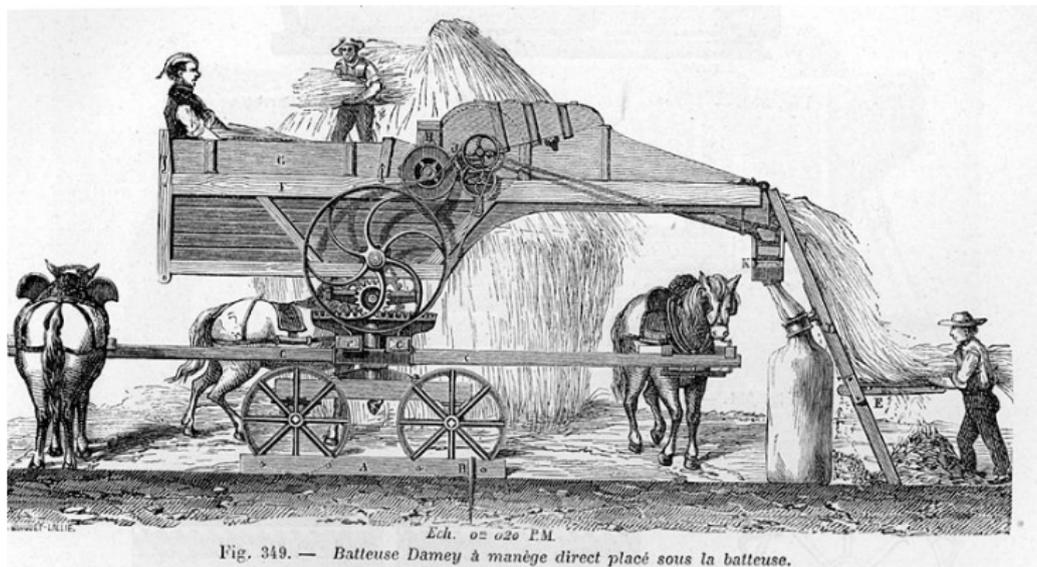
- Les révolutions industrielles
- Les systèmes cyber-physiques
- Exemples de CPS
- Nouveaux challenges pour les ingénieurs
- Performance
- Systèmes complexes

4 Cahier des Charges Fonctionnelles (CdCF)

5 Ingénierie Système

6 SysML

# Première révolution industrielle



# Première révolution industrielle



# Première révolution industrielle

# Première révolution industrielle

- possible grâce aux progrès dans l'agriculture

# Première révolution industrielle

- possible grâce aux progrès dans l'agriculture
- généralisation de la mécanisation dans l'industrie textile notamment

# Première révolution industrielle

- possible grâce aux progrès dans l'agriculture
- généralisation de la mécanisation dans l'industrie textile notamment
- essor de la métallurgie avec la procédé de la fonte au coke et le passage de la fonte à l'acier

# Première révolution industrielle

- possible grâce aux progrès dans l'agriculture
- généralisation de la mécanisation dans l'industrie textile notamment
- essor de la métallurgie avec la procédé de la fonte au coke et le passage de la fonte à l'acier
- nouvelle énergie : la machine à vapeur

# Deuxième révolution industrielle



Raffinerie à Cleveland (Ohio) en 1889

# Deuxième révolution industrielle

# Deuxième révolution industrielle

- deux nouvelles énergies : électricité et pétrole

# Deuxième révolution industrielle

- deux nouvelles énergies : électricité et pétrole
- développement de la sidérurgie

# Deuxième révolution industrielle

- deux nouvelles énergies : électricité et pétrole
- développement de la sidérurgie
- explosion de la chimie et surtout la chimie organique

# Deuxième révolution industrielle

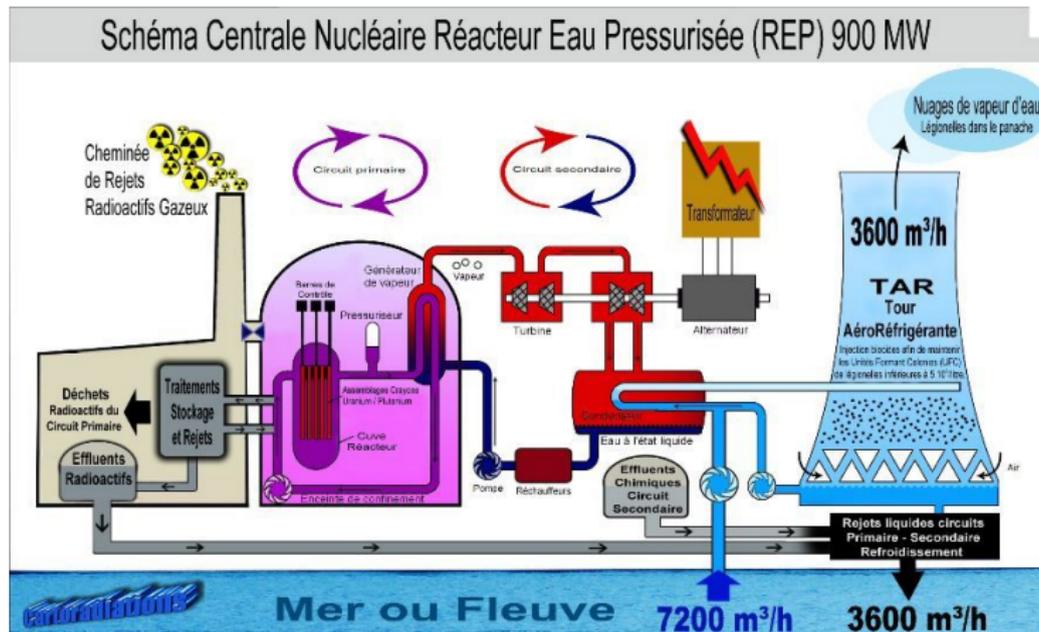
- deux nouvelles énergies : électricité et pétrole
- développement de la sidérurgie
- explosion de la chimie et surtout la chimie organique
- apparition de l'automobile

## Deuxième révolution industrielle



Compagnie Ford en 1913.

## Troisième révolution industrielle



# Troisième révolution industrielle



# Troisième révolution industrielle

# Troisième révolution industrielle

- nouvelle énergie : le nucléaire

# Troisième révolution industrielle

- nouvelle énergie : le nucléaire
- développement de l'électronique et l'informatique

# Troisième révolution industrielle

- nouvelle énergie : le nucléaire
- développement de l'électronique et l'informatique
- production miniaturisée et automatisation

# Troisième révolution industrielle

- nouvelle énergie : le nucléaire
- développement de l'électronique et l'informatique
- production miniaturisée et automatisation
- apparition des technologies spatiales et biotechnologies

# Troisième révolution industrielle

- nouvelle énergie : le nucléaire
- développement de l'électronique et l'informatique
- production miniaturisée et automatisation
- apparition des technologies spatiales et biotechnologies
- création d'Internet

# Quatrième révolution industrielle



# Systèmes cyber-physiques

Les interactions entre systèmes cyber-physiques vont permettre de faire émerger en temps réel un comportement permettant d'augmenter les caractéristiques de **flexibilité**, **reconfigurabilité** ou encore **agilité du système de production complet**.

# Principe ?

Conjonction de la commande et de la communication.

# Principe ?

Conjonction de la commande et de la communication.

La commande est pleinement axée sur le **contrôle en boucle fermée**, où des **capteurs surveillent le process physique**, qui est lui-même **modifié par les actionneurs** pilotés par la commande.

# Quelques définitions

## DÉFINITION : Système Cyber-Physiques (Rakumar et al.,2010)

*|| systèmes physiques desquels les opérations sont surveillées, contrôlées, coordonnées et intégrées par un cœur, centres de calculs et de communications*

## Quelques définitions

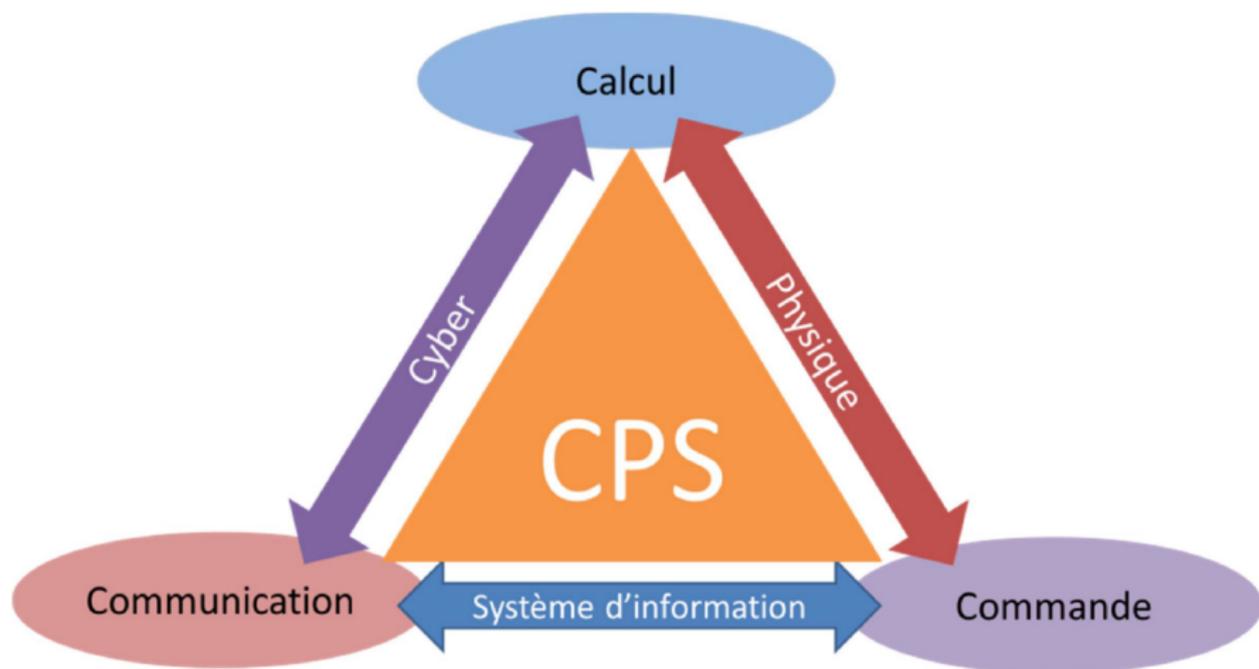
### DÉFINITION : Système Cyber-Physiques (Rakumar et al.,2010)

*|| systèmes physiques desquels les opérations sont surveillées, contrôlées, coordonnées et intégrées par un cœur, centres de calculs et de communications*

### DÉFINITION : Système Cyber-Physiques (Monostori, 2014)

*|| Les CPS sont des systèmes formés d'entités collaboratives, dotées de capacité de calcul, qui sont en connexion intensive avec le monde physique environnant et les phénomènes s'y déroulant, fournissant et utilisant à la fois les services de mise à disposition et de traitement de données disponibles sur le réseau*

# Capacités de base d'un CPS



# Caractérisation fonctionnelle des CPS

# Caractérisation fonctionnelle des CPS

- Haut niveau d'intégration physique/cyber

# Caractérisation fonctionnelle des CPS

- Haut niveau d'**intégration physique/cyber**
- Capacités de **traitement** dans chaque composant physique, dû au fait que les ressources en traitement et communication sont généralement limitées

# Caractérisation fonctionnelle des CPS

- Haut niveau d'**intégration physique/cyber**
- Capacités de **traitement** dans chaque composant physique, dû au fait que les ressources en traitement et communication sont généralement limitées
- Comparaisons au **jumeau numérique**

# Caractérisation fonctionnelle des CPS

- Haut niveau d'**intégration physique/cyber**
- Capacités de **traitement** dans chaque composant physique, dû au fait que les ressources en traitement et communication sont généralement limitées
- Comparaisons au **jumeau numérique**
- Hautement **connectés**, via réseaux avec ou sans fil, Bluetooth, GSM, GPS etc.

# Caractérisation fonctionnelle des CPS

- Haut niveau d'**intégration physique/cyber**
- Capacités de **traitement** dans chaque composant physique, dû au fait que les ressources en traitement et communication sont généralement limitées
- Comparaisons au **jumeau numérique**
- Hautement **connectés**, via réseaux avec ou sans fil, Bluetooth, GSM, GPS etc.
- Adapté à des **échelles temporelles et spatiales multiples**

# Caractérisation fonctionnelle des CPS

- Haut niveau d'**intégration physique/cyber**
- Capacités de **traitement** dans chaque composant physique, dû au fait que les ressources en traitement et communication sont généralement limitées
- Comparaisons au **jumeau numérique**
- Hautement **connectés**, via réseaux avec ou sans fil, Bluetooth, GSM, GPS etc.
- Adapté à des **échelles temporelles et spatiales multiples**
- Capable de **reconfiguration/réorganisation dynamique**

# Caractérisation fonctionnelle des CPS

- Haut niveau d'**intégration physique/cyber**
- Capacités de **traitement** dans chaque composant physique, dû au fait que les ressources en traitement et communication sont généralement limitées
- Comparaisons au **jumeau numérique**
- Hautement **connectés**, via réseaux avec ou sans fil, Bluetooth, GSM, GPS etc.
- Adapté à des **échelles temporelles et spatiales multiples**
- Capable de **reconfiguration/réorganisation dynamique**
- Hautement **automatisés**, en boucles fermées

# Caractérisation fonctionnelle des CPS

- Haut niveau d'**intégration physique/cyber**
- Capacités de **traitement** dans chaque composant physique, dû au fait que les ressources en traitement et communication sont généralement limitées
- Comparaisons au **jumeau numérique**
- Hautement **connectés**, via réseaux avec ou sans fil, Bluetooth, GSM, GPS etc.
- Adapté à des **échelles temporelles et spatiales multiples**
- Capable de **reconfiguration/réorganisation dynamique**
- Hautement **automatisés**, en boucles fermées
- **Fiables**, voire **certifiés** dans certains cas

# Fonctionnalités générales attendues d'un CPS

# Fonctionnalités générales attendues d'un CPS

- directement enregistrer les données physiques en utilisant des capteurs et agir sur les phénomènes physiques en utilisant des actionneurs

# Fonctionnalités générales attendues d'un CPS

- directement enregistrer les données physiques en utilisant des **capteurs** et agir sur les phénomènes physiques en utilisant des **actionneurs**
- évaluer et sauvegarder les données enregistrées, et interagir activement ou en réaction aux événements avec à la fois le monde physique et digital

# Fonctionnalités générales attendues d'un CPS

- directement enregistrer les données physiques en utilisant des **capteurs** et agir sur les phénomènes physiques en utilisant des **actionneurs**
- évaluer et sauvegarder les données enregistrées, et interagir activement ou en réaction aux événements avec à la fois le monde physique et digital
- être connecté avec les autres CPS et à un réseau global via des moyens de communications numériques (avec et/ou sans fil, local et/ou global)

# Fonctionnalités générales attendues d'un CPS

- directement enregistrer les données physiques en utilisant des **capteurs** et agir sur les phénomènes physiques en utilisant des **actionneurs**
- évaluer et sauvegarder les données enregistrées, et interagir activement ou en réaction aux événements avec à la fois le monde physique et digital
- être connecté avec les autres CPS et à un réseau global via des moyens de communications numériques (avec et/ou sans fil, local et/ou global)
- utiliser de manière globale les données et services disponibles

# Fonctionnalités générales attendues d'un CPS

- directement enregistrer les données physiques en utilisant des **capteurs** et agir sur les phénomènes physiques en utilisant des **actionneurs**
- évaluer et sauvegarder les données enregistrées, et interagir activement ou en réaction aux événements avec à la fois le monde physique et digital
- être connecté avec les autres CPS et à un réseau global via des moyens de communications numériques (avec et/ou sans fil, local et/ou global)
- utiliser de manière globale les données et services disponibles
- avoir un ensemble d'interfaces homme-machine multimodales

# Catégories selon le niveau de fonctionnalité

## Catégories selon le niveau de fonctionnalité

- **Au niveau Connexion** : le CPS opère sur un réseau Plug&Play et utilise des données envoyées par un réseau de capteurs

## Catégories selon le niveau de fonctionnalité

- **Au niveau Connexion** : le CPS opère sur un réseau Plug&Play et utilise des données envoyées par un réseau de capteurs
- **Au niveau Conversion**: le CPS sait traiter l'information et la retranscrire en informations de plus haut niveau

## Catégories selon le niveau de fonctionnalité

- **Au niveau Connexion** : le CPS opère sur un réseau Plug&Play et utilise des données envoyées par un réseau de capteurs
- **Au niveau Conversion**: le CPS sait traiter l'information et la retranscrire en informations de plus haut niveau
- **Au niveau Cyber**: le CPS a une connaissance des autres CPS de l'environnement et peut interagir avec eux pour enrichir son propre traitement d'information

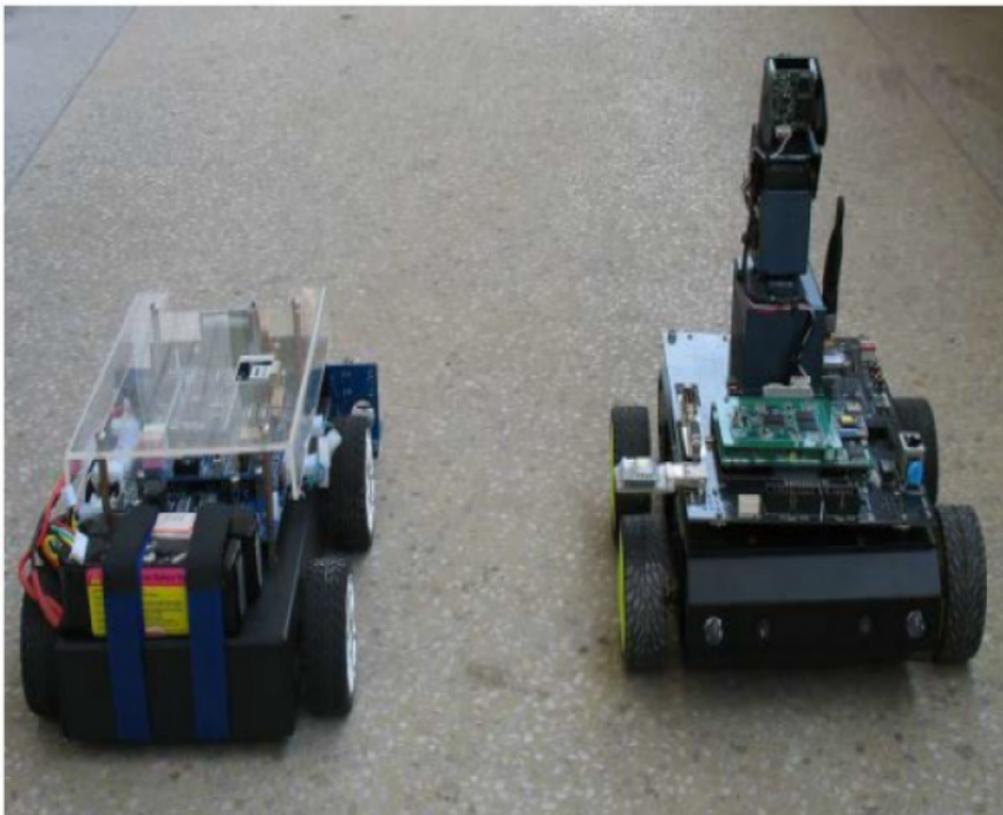
## Catégories selon le niveau de fonctionnalité

- **Au niveau Connexion :** le CPS opère sur un réseau Plug&Play et utilise des données envoyées par un réseau de capteurs
- **Au niveau Conversion:** le CPS sait traiter l'information et la retranscrire en informations de plus haut niveau
- **Au niveau Cyber:** le CPS a une connaissance des autres CPS de l'environnement et peut interagir avec eux pour enrichir son propre traitement d'information
- **Au niveau Cognition:** le CPS est capable d'établir un diagnostic basé sur des simulations de son propre comportement et une analyse différentielle des données de capteurs

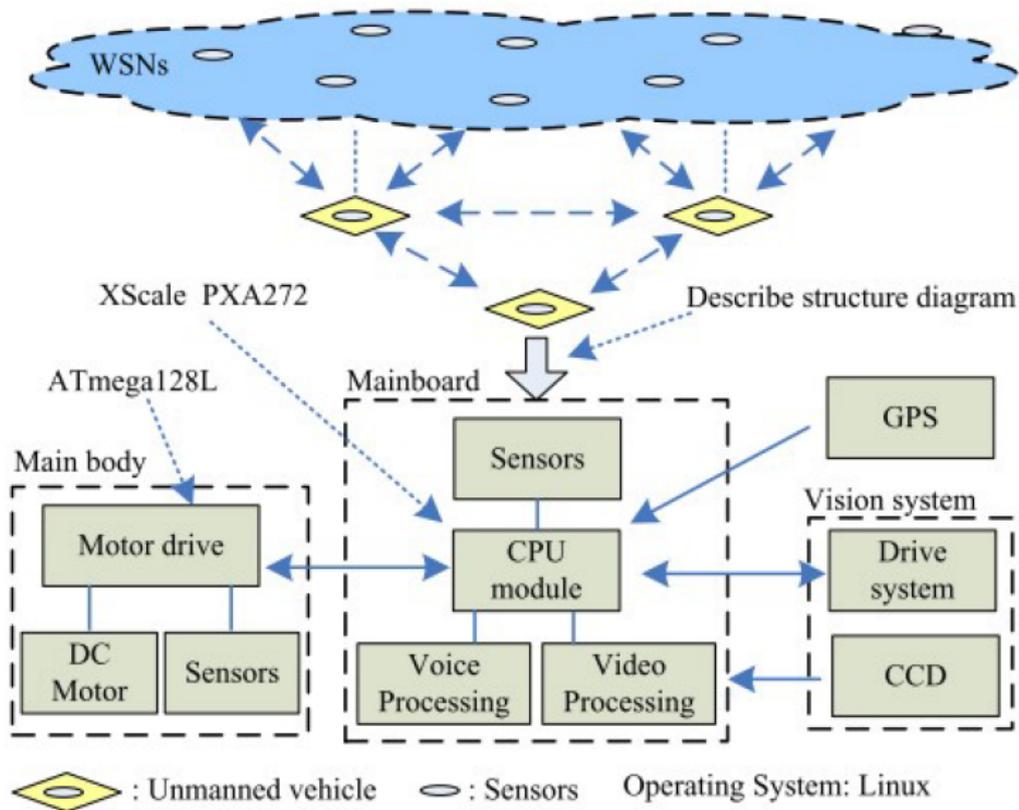
## Catégories selon le niveau de fonctionnalité

- **Au niveau Connexion :** le CPS opère sur un réseau Plug&Play et utilise des données envoyées par un réseau de capteurs
- **Au niveau Conversion:** le CPS sait traiter l'information et la retranscrire en informations de plus haut niveau
- **Au niveau Cyber:** le CPS a une connaissance des autres CPS de l'environnement et peut interagir avec eux pour enrichir son propre traitement d'information
- **Au niveau Cognition:** le CPS est capable d'établir un diagnostic basé sur des simulations de son propre comportement et une analyse différentielle des données de capteurs
- **Au niveau Configuration:** le CPS peut s'adapter seul en cas de défaillance, se reconfigurer ou ajuster de manière autonome ses paramètres afin de retourner à un comportement nominal.

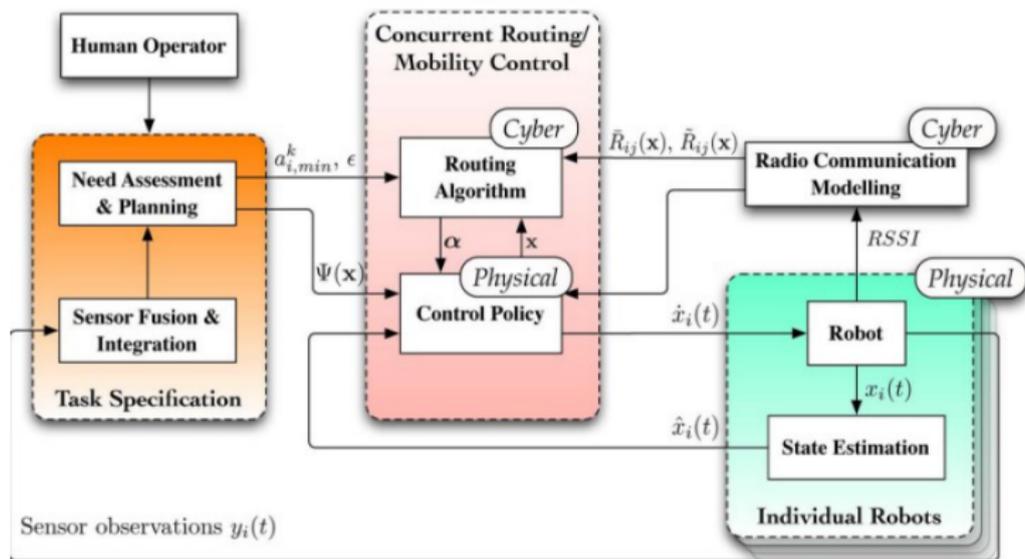
# Prototype de véhicules autonome



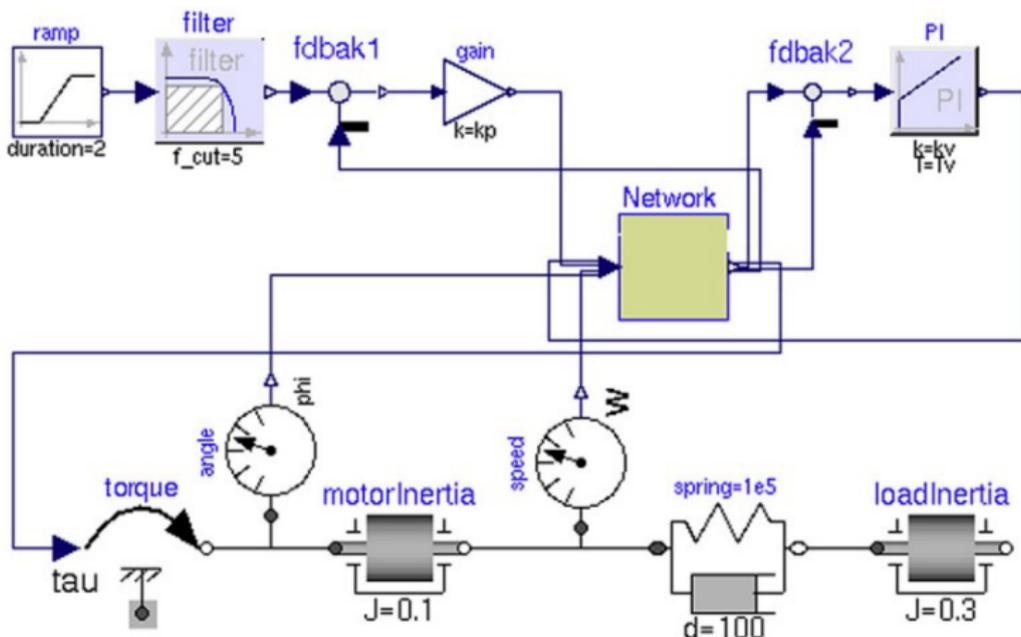
# Architecture de véhicule autonome



# Architecture de contrôle d'équipes de robots



# Commande flexible du moteur électrique



# Équipement mobile utilisé par un opérateur lors d'une tâche de maintenance

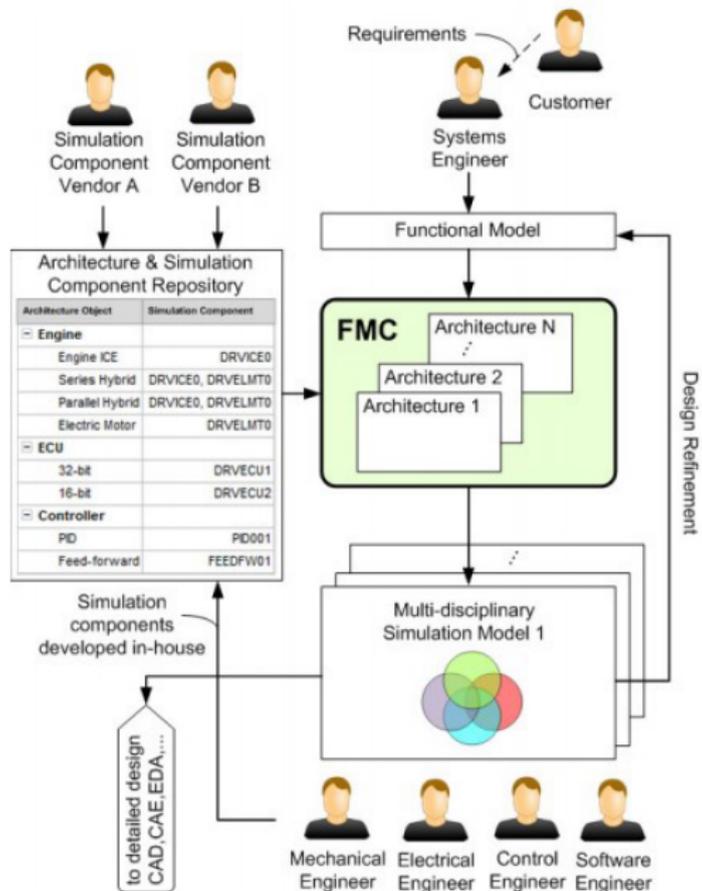


## Nouveaux challenges

Les nouveaux besoins nécessitent une adaptation des modèles, méthodes, outils, organisations et environnements de conception :

- **Modélisation formelle et analyse dynamique** des CPS, dû à l'évolution constante de ce type de système dynamique hybride
- Analyse et évaluation de performance des CPS, par une comparaison permanente entre les valeurs obtenues par **le modèle et par la détection**
- Vérification, validation, certification, évaluation de la **robustesse** des CPS;
- Diminution du risque de défaillance
- Sécurisation du traitement de l'information et des réseaux.

Le côté multi-métiers apparaît clairement, et amène une réflexion sur le processus de conception dans son ensemble, que ce soit pour la liaison commande/mécanique ou pour la liaison commande/réseau.



# Performance

Les performances et la complexité des systèmes et des produits qui nous entourent sont toujours grandissants. L'intégration des nouvelles technologies dans ces nouveaux produits impose de nouvelles approches (dans la conception, la fabrication, la commercialisation).

L'ensemble de ces activités d'ingénierie est confié aux chercheurs, ingénieurs, techniciens qui **imaginent, conçoivent et réalisent des systèmes modernes pour répondre aux besoins** toujours en évolution des consommateurs.

L'étude de ces systèmes modernes, dans le cadre de l'entreprise, se conduit selon plusieurs points de vue:

L'étude de ces systèmes modernes, dans le cadre de l'entreprise, se conduit selon plusieurs points de vue:

- fonctionnel : Quelle fonction le produit remplit-il ?

L'étude de ces systèmes modernes, dans le cadre de l'entreprise, se conduit selon plusieurs points de vue:

- fonctionnel : Quelle fonction le produit remplit-il ?
- structurel : Comment se constitue le produit (composants et constituant) ?

L'étude de ces systèmes modernes, dans le cadre de l'entreprise, se conduit selon plusieurs points de vue:

- fonctionnel : Quelle fonction le produit remplit-il ?
- structurel : Comment se constitue le produit (composants et constituant) ?
- temporel : Quelles sont les évolutions du comportement du produit au cours du temps ?

L'étude de ces systèmes modernes, dans le cadre de l'entreprise, se conduit selon plusieurs points de vue:

- fonctionnel : Quelle fonction le produit remplit-il ?
- structurel : Comment se constitue le produit (composants et constituant) ?
- temporel : Quelles sont les évolutions du comportement du produit au cours du temps ?
- économique : Quels sont les aspects économiques soumis au produit ?

# Systèmes complexes

Un système est un ensemble de composants qui collaborent à la réalisation d'un ensemble de tâches en vue de fournir un ensemble de services.

Nous pouvons trouver diverses définitions du système. Citons les suivantes :

Nous pouvons trouver diverses définitions du système. Citons les suivantes :

### DÉFINITION : Système [NASA1995]

*ensemble de composants inter reliés qui interagissent les uns avec les autres d'une manière organisée pour accomplir une finalité commune.*

Nous pouvons trouver diverses définitions du système. Citons les suivantes :

### DÉFINITION : Système [NASA1995]

*ensemble de composants inter reliés qui interagissent les uns avec les autres d'une manière organisée pour accomplir une finalité commune.*

### DÉFINITION : Système [INCOSE2004]<sup>a</sup>

a. INCOSE : International Council on Systems Engineering

*Ensemble intégré d'éléments qui accomplissent un objectif défini.*

Un système est dit **complexe** lorsque les inter-relations liant les composants sont **multiples, interdépendantes et bouclées** : le comportement global n'est donc pas directement prévisible à partir des comportements élémentaires des composants.

Un système est dit **complexe** lorsque les inter-relations liant les composants sont **multiples, interdépendantes et bouclées** : le comportement global n'est donc pas directement prévisible à partir des comportements élémentaires des composants.

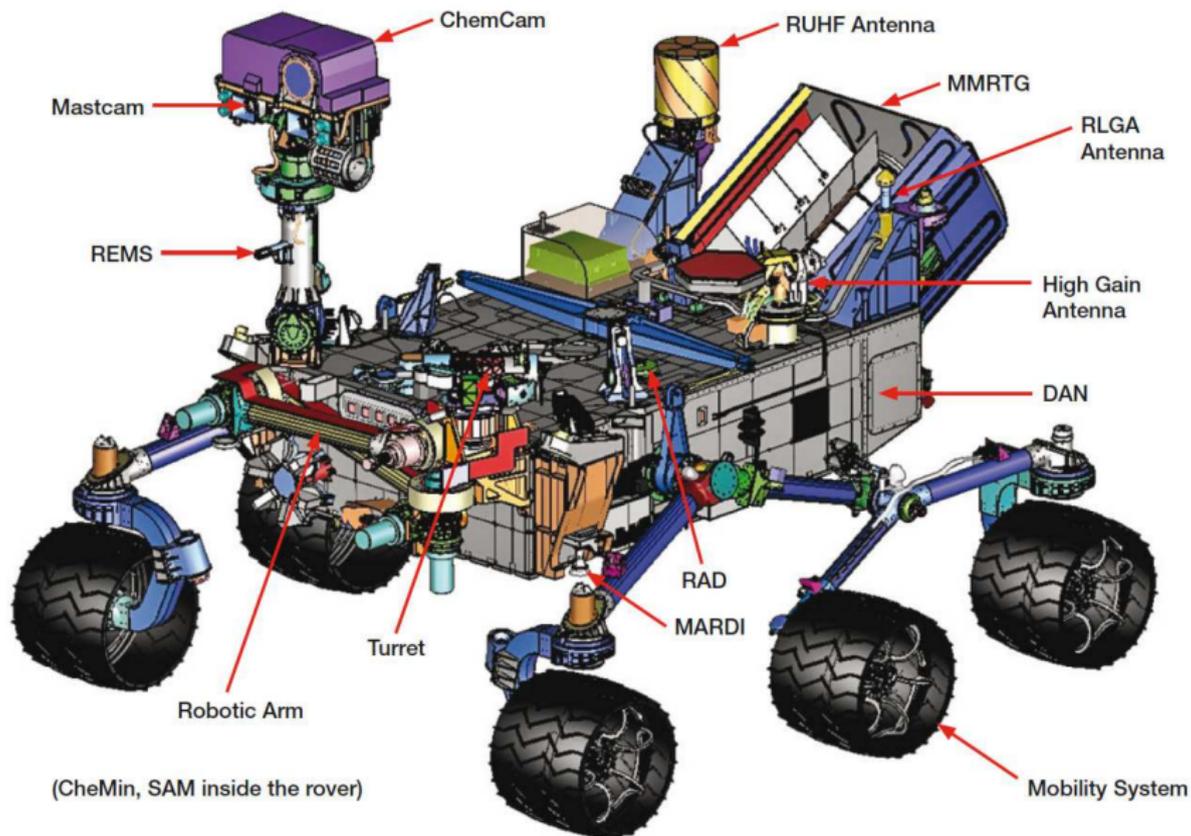
Le comportement des systèmes complexes dépend souvent d'un grand nombre de paramètres et de conditions initiales influant fortement sur la réponse dynamique.

Un système est dit **complexe** lorsque les inter-relations liant les composants sont **multiples, interdépendantes et bouclées** : le comportement global n'est donc pas directement prévisible à partir des comportements élémentaires des composants.

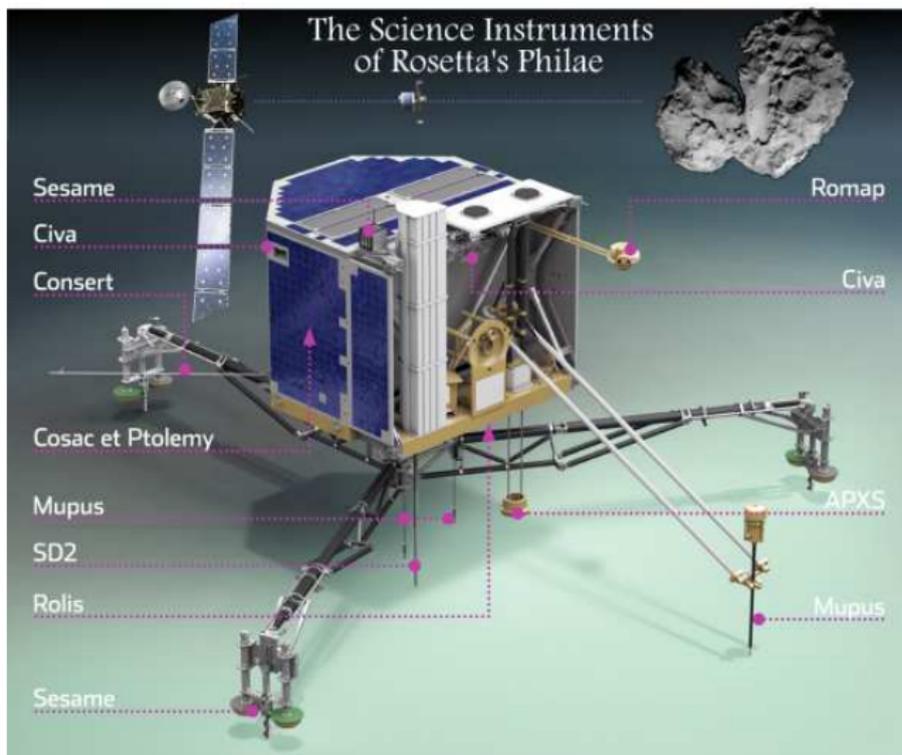
Le comportement des systèmes complexes dépend souvent d'un grand nombre de paramètres et de conditions initiales influant fortement sur la réponse dynamique.

La météorologie ou les organismes vivants sont certainement des exemples parmi les plus représentatifs de tels systèmes dont la compréhension est encore aujourd'hui à compléter.

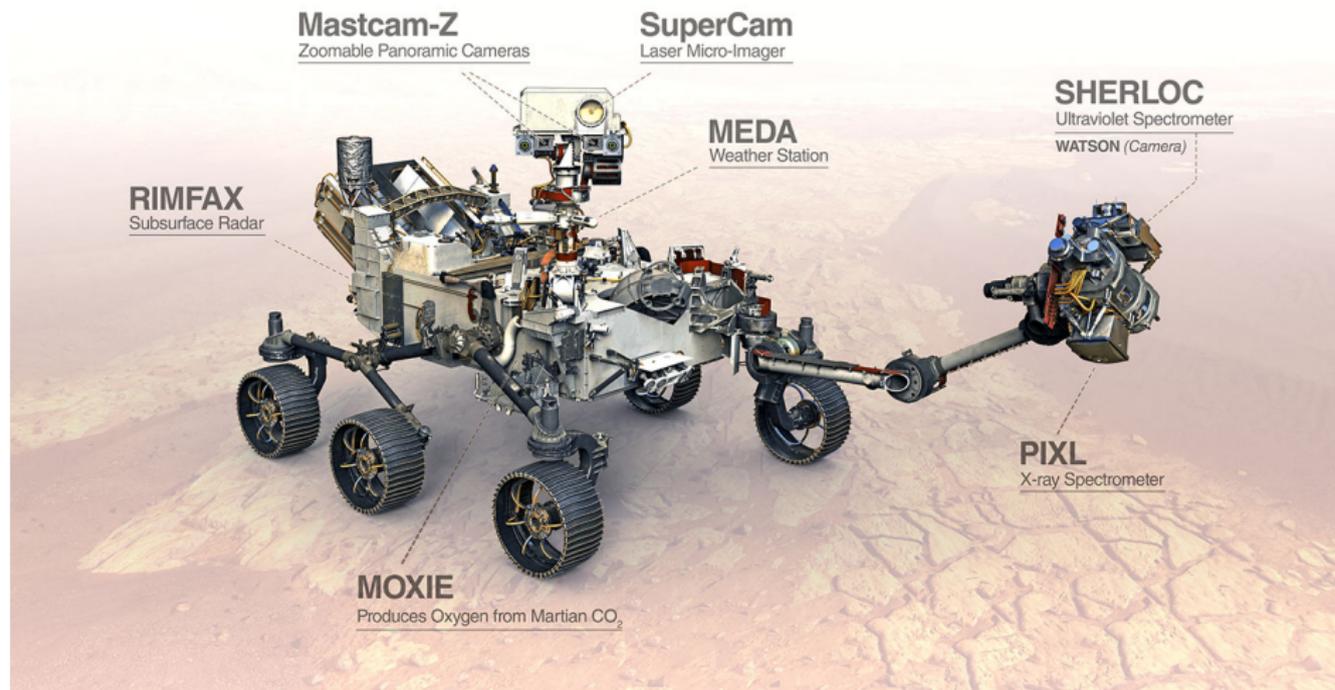
# Curiosity



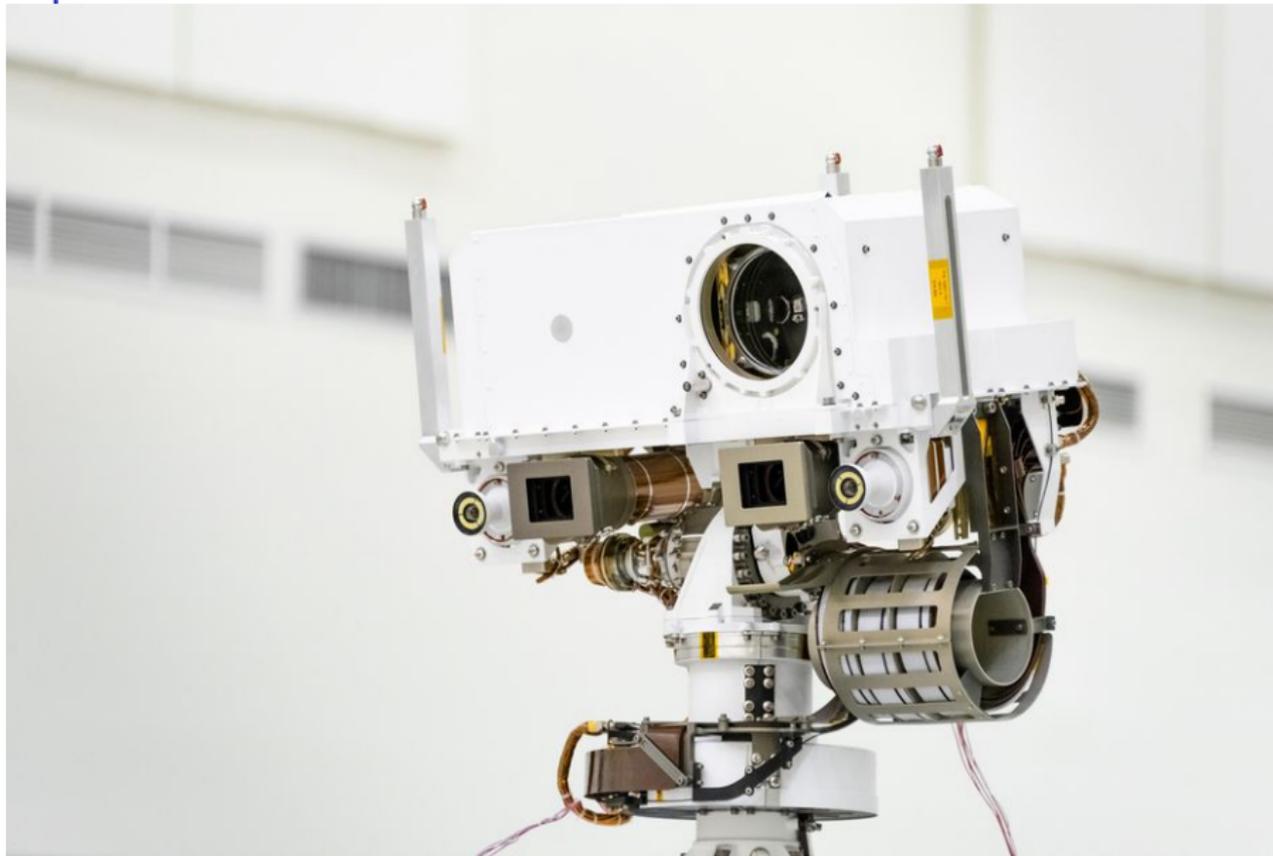
# Philae



# Perseverance



# SuperCam



Un système complexe est bien souvent pluri-disciplinaire ou pluritechnique et son analyse nécessite la coopération de spécialistes de plusieurs disciplines.

L'analyse des systèmes complexes requière une organisation intellectuelle différente de celle des systèmes simples.

# Système simple

Un **système simple** s'étudie par un raisonnement déductif par isolement des phénomènes élémentaires (validé par une expérience par exemple) ou par relations de cause à effet.

# Système simple

Un **système simple** s'étudie par un raisonnement déductif par isolement des phénomènes élémentaires (validé par une expérience par exemple) ou par relations de cause à effet.

hypothèses

# Système simple

Un **système simple** s'étudie par un raisonnement déductif par isolement des phénomènes élémentaires (validé par une expérience par exemple) ou par relations de cause à effet.

hypothèses  $\Rightarrow$  modèle

# Système simple

Un **système simple** s'étudie par un raisonnement déductif par isolement des phénomènes élémentaires (validé par une expérience par exemple) ou par relations de cause à effet.

hypothèses  $\Rightarrow$  modèle  $\Rightarrow$  résultat

# Système simple

Un système simple s'étudie par un raisonnement déductif par isolement des phénomènes élémentaires (validé par une expérience par exemple) ou par relations de cause à effet.

hypothèses  $\Rightarrow$  modèle  $\Rightarrow$  résultat  $\Rightarrow$  conclusion

# Système complexe

Un système complexe s'étudie :

# Système complexe

Un système complexe s'étudie :

- en triant les entrées et sorties significatives,

# Système complexe

Un système complexe s'étudie :

- en triant les entrées et sorties significatives,
- en hiérarchisant l'organisation interne en niveaux,

# Système complexe

Un système complexe s'étudie :

- en triant les entrées et sorties significatives,
- en hiérarchisant l'organisation interne en niveaux,
- en cherchant des relations (souvent non causales) entre paramètres,

# Système complexe

Un système complexe s'étudie :

- en triant les entrées et sorties significatives,
- en hiérarchisant l'organisation interne en niveaux,
- en cherchant des relations (souvent non causales) entre paramètres,
- en identifiant des critères de comparaison,

# Système complexe

Un système complexe s'étudie :

- en triant les entrées et sorties significatives,
- en hiérarchisant l'organisation interne en niveaux,
- en cherchant des relations (souvent non causales) entre paramètres,
- en identifiant des critères de comparaison,
- en identifiant les boucles de rétroaction

# Système complexe

Un système complexe s'étudie :

- en triant les entrées et sorties significatives,
- en hiérarchisant l'organisation interne en niveaux,
- en cherchant des relations (souvent non causales) entre paramètres,
- en identifiant des critères de comparaison,
- en identifiant les boucles de rétroaction
- en proposant des solutions ou modèles partiellement valides.

# Système complexe

Un système complexe s'étudie :

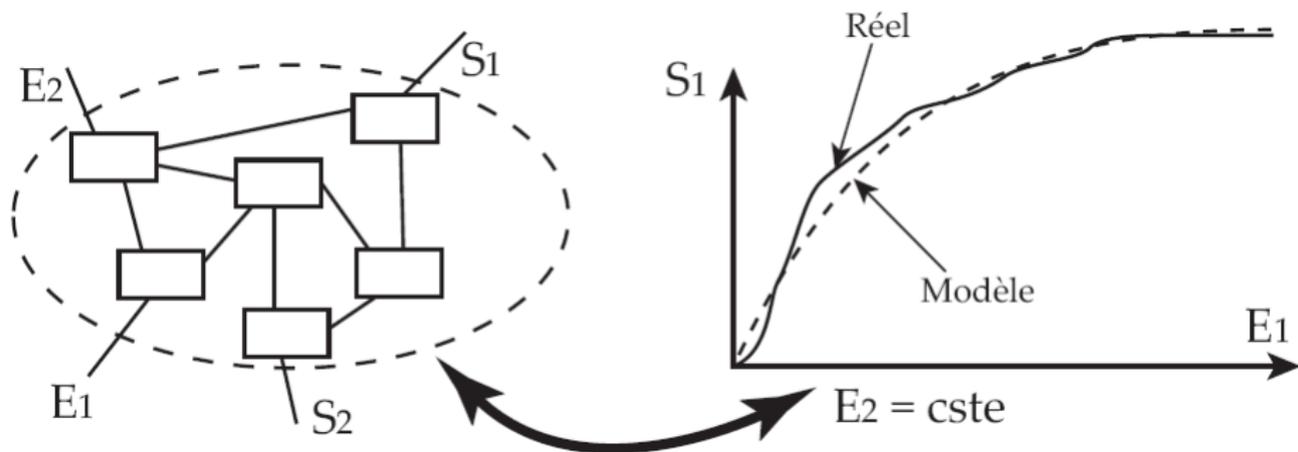
- en triant les entrées et sorties significatives,
- en hiérarchisant l'organisation interne en niveaux,
- en cherchant des relations (souvent non causales) entre paramètres,
- en identifiant des critères de comparaison,
- en identifiant les boucles de rétroaction
- en proposant des solutions ou modèles partiellement valides.

C'est le but de l'Ingénierie Système.

L'analyse des systèmes complexes nécessite une approche **inductive** qui vise à **modéliser le comportement** du système dans des cas simplifiés.

L'analyse des systèmes complexes nécessite une approche **inductive** qui vise à **modéliser le comportement** du système dans des cas simplifiés. Cette approche sollicite l'**esprit de synthèse et d'initiative**.

L'analyse des systèmes complexes nécessite une approche **inductive** qui vise à **modéliser le comportement** du système dans des cas simplifiés. Cette approche sollicite l'**esprit de synthèse et d'initiative**.



L'analyse des systèmes est un point central en Sciences de l'Ingénieur aux concours. Il n'est pas que demandé de restituer des connaissances apprises au cours de l'année. L'évaluation portera sur les capacités à :

L'analyse des systèmes est un point central en Sciences de l'Ingénieur aux concours. Il n'est pas que demandé de restituer des connaissances apprises au cours de l'année. L'évaluation portera sur les capacités à :

- **présenter** un système réel dans son contexte et dans sa globalité,

L'analyse des systèmes est un point central en Sciences de l'Ingénieur aux concours. Il n'est pas que demandé de restituer des connaissances apprises au cours de l'année. L'évaluation portera sur les capacités à :

- **présenter** un système réel dans son contexte et dans sa globalité,
- **mobiliser** vos connaissances pour analyser le comportement du système complexe,

L'analyse des systèmes est un point central en Sciences de l'Ingénieur aux concours. Il n'est pas que demandé de restituer des connaissances apprises au cours de l'année. L'évaluation portera sur les capacités à :

- **présenter** un système réel dans son contexte et dans sa globalité,
- **mobiliser** vos connaissances pour analyser le comportement du système complexe,
- **proposer** des solutions vis-à-vis de problèmes techniques.

L'analyse des systèmes est un point central en Sciences de l'Ingénieur aux concours. Il n'est pas que demandé de restituer des connaissances apprises au cours de l'année. L'évaluation portera sur les capacités à :

- **présenter** un système réel dans son contexte et dans sa globalité,
- **mobiliser** vos connaissances pour analyser le comportement du système complexe,
- **proposer** des solutions vis-à-vis de problèmes techniques.

Concrètement, il s'agit de faire preuve d'**esprit de synthèse** pour présenter le système et les résultats, d'**esprit d'initiative** et de **créativité** lors des manipulations du système, de proposer des modèles simples.

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Industries & Entreprises
- 3 Industrie 4.0
- 4 Cahier des Charges Fonctionnelles (CdCF)**
  - Pourquoi faire ?
  - Définition et composition
- 5 Ingénierie Système
- 6 SysML
- 7 Analyse et description des systèmes à l'aide de SysML

# Cahier des Charges Fonctionnelles

## Pourquoi faire ?

La **satisfaction des attentes du client** ou services attendus par celui-ci constitue la **finalité** du processus de conception et par conséquent du système.

# Cahier des Charges Fonctionnelles

## Pourquoi faire ?

La **satisfaction des attentes du client** ou services attendus par celui-ci constitue la **finalité** du processus de conception et par conséquent du système.

Une fois le système réalisé, le client juge de sa satisfaction des services attendus de manière subjective grâce au ressenti procuré par ses cinq sens.

# Cahier des Charges Fonctionnelles

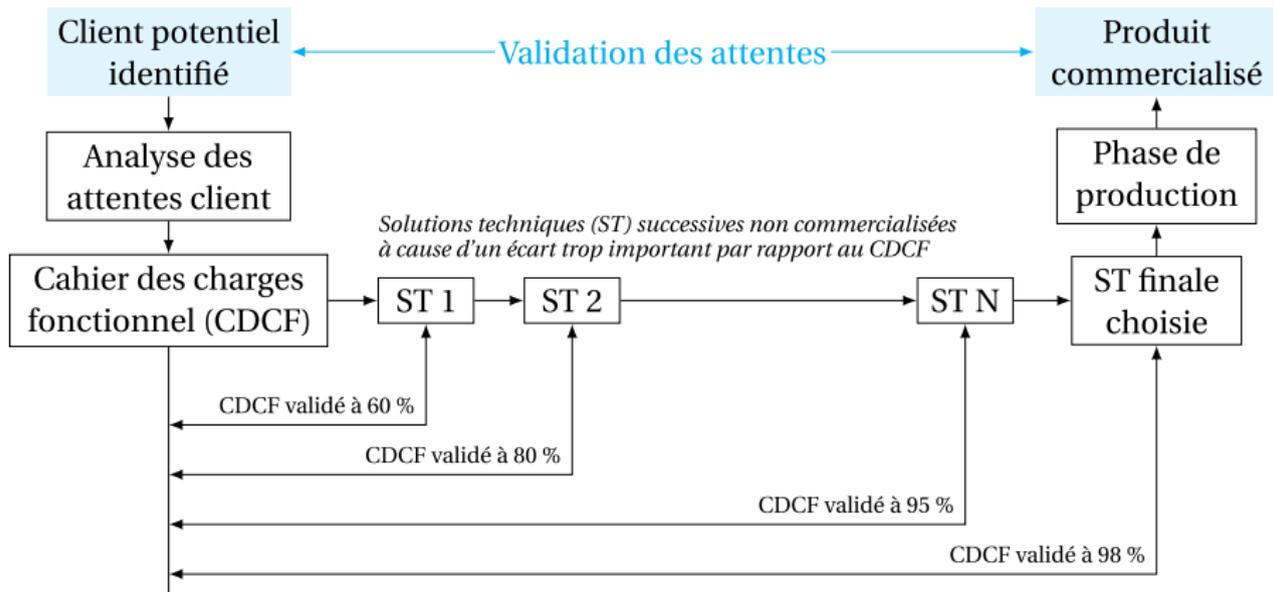
## Pourquoi faire ?

La **satisfaction des attentes du client** ou services attendus par celui-ci constitue la **finalité** du processus de conception et par conséquent du système.

Une fois le système réalisé, le client juge de sa satisfaction des services attendus de manière subjective grâce au ressenti procuré par ses cinq sens.

Une entreprise ne peut pas engager un processus de conception sur des bases subjectives qu'elle ne maîtrise pas pour aboutir à un système qui satisfera de manière très aléatoire le client.

La maîtrise du processus de conception passe par une **description objective du but à atteindre**. Cette description objective se nomme le **Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF)**.



Le cahier des charges fonctionnel est un modèle des attentes du client et constitue un document contractuel entre les deux parties client-entreprise. Il est donc rédigé, souvent par l'entreprise, avec l'accord du client et après une analyse précise de ses attentes.

L'aspect fonctionnel du cahier des charges permet de contraindre le processus de conception en termes de finalités et non pas en termes de solutions. Ceci conduit, en particulier, à produire des systèmes concurrents en termes de services rendus mais dont les solutions techniques sont très différentes.

# Définition et composition

# Définition et composition

## DÉFINITION : Cahier des Charges [AFNOR NF X 59 151]

*Document par lequel le demandeur exprime son besoin (ou celui qu'il est chargé de traduire) en terme de fonctions de services et de contraintes.*

# Définition et composition

## DÉFINITION : Cahier des Charges [AFNOR NF X 59 151]

*Document par lequel le demandeur exprime son besoin (ou celui qu'il est chargé de traduire) en terme de fonctions de services et de contraintes.*

## DÉFINITION : Cahier des Charges [IEEE Std 1220-1994 et INCOSE 1996]

*Document identifiant une performance, une caractéristique physique, ou un niveau de qualité, définissant un produit, ou un procédé, pour lesquels une action sera développée.*

La norme NF X 50-151 propose un guide pour la rédaction d'un Cahier des Charges Fonctionnel (CDCF) en recommandant de le composer en quatre parties principales :

La norme NF X 50-151 propose un guide pour la rédaction d'un Cahier des Charges Fonctionnel (CDCF) en recommandant de le composer en quatre parties principales :

- **Présentation générale du système.** Cette partie très importante est destinée à donner toutes les informations générales utiles concernant le produit : marché, contexte du projet, objectifs, énoncé du besoin, environnement du produit, etc. Il n'y a aucune recommandation sur le volume d'information ou la forme adoptée.

La norme NF X 50-151 propose un guide pour la rédaction d'un Cahier des Charges Fonctionnel (CDCF) en recommandant de le composer en quatre parties principales :

- **Présentation générale du système.** Cette partie très importante est destinée à donner toutes les informations générales utiles concernant le produit : marché, contexte du projet, objectifs, énoncé du besoin, environnement du produit, etc. Il n'y a aucune recommandation sur le volume d'information ou la forme adoptée.
- **Expression fonctionnelle des besoins.** Cette partie fondamentale décrit et définit les différentes **fonctions de service** du produit ainsi que les **contraintes** et les **critères d'appréciation** qui y sont associés.



Ainsi dans le cas du système d'orientation de la fusée Ariane, un tableau des fonctions de services peut être :

Ainsi dans le cas du système d'orientation de la fusée Ariane, un tableau des fonctions de services peut être :

FS 1	orienter la tuyère par rapport au corps central
FS 2	permettre au corps central de suivre la trajectoire
FS 3	être relié au corps central
FS 4	maintenir en position la tuyère
FS 5	être relié au poste de pilotage
FS 6	être adapté au milieu environnant
FS 7	être fourni en énergie

## DÉFINITION : Fonction de service

*Action demandée à un produit (ou réalisée par lui) afin de satisfaire une partie du besoin d'un utilisateur donné. (Une fonction est formulée par un verbe à l'infinitif suivi d'un complément)*

## DÉFINITION : Fonction de service

*Action demandée à un produit (ou réalisée par lui) afin de satisfaire une partie du besoin d'un utilisateur donné. (Une fonction est formulée par un verbe à l'infinitif suivi d'un complément)*

Il doit aussi apparaître, associées à ces critères, des spécifications permettant de fixer le **niveau d'exigence requis**, correspondant le plus souvent à une grandeur mesurable.

## DÉFINITION : Fonction de service

*Action demandée à un produit (ou réalisée par lui) afin de satisfaire une partie du besoin d'un utilisateur donné. (Une fonction est formulée par un verbe à l'infinitif suivi d'un complément)*

Il doit aussi apparaître, associées à ces critères, des spécifications permettant de fixer le **niveau d'exigence requis**, correspondant le plus souvent à une grandeur mesurable.

Dans la mesure du possible, il est conseillé d'ajouter une indication de la **flexibilité** pour les niveaux d'exigence, soit sous une forme symbolique à niveaux (0 : impératif; 1 : peu négociable, 2 : négociable, 3 : très négociable), soit sous une forme numérique ou explicite, avec des limites : les flexibilités permettent à l'ingénieur de créer un système moins contraint, donc moins cher.



Les informations sont le plus souvent réunies sous la forme d'un tableau:

FONCTIONS DE SERVICE	CRITÈRES	NIVEAUX	FLEXIBILITÉS
FS1 : Orienter la tuyère par rapport au corps central	Précision	Écart nul pour les réponses impulsionnelle et indicielle	0
	Débattement angulaire	$\pm 60^\circ$	$\pm 3^\circ$
	Vitesse de déplacement	$t_{5\%} \leq 0.15 \text{ s}$	1
	Sensibilité aux résonances	fréquences propres $< 20 \text{ Hz}$	2
	Stabilité	Marge de gain $\geq 6 \text{ dB}$ Marge de phase $\geq 45^\circ$	0 1

Les informations sont le plus souvent réunies sous la forme d'un tableau:

FONCTIONS DE SERVICE	CRITÈRES	NIVEAUX	FLEXIBILITÉS
FS1 : Orienter la tuyère par rapport au corps central	Précision	Écart nul pour les réponses impulsionnelle et indicielle	0
	Débattement angulaire	$\pm 60^\circ$	$\pm 3^\circ$
	Vitesse de déplacement	$t_{5\%} \leq 0.15 \text{ s}$	1
	Sensibilité aux résonances	fréquences propres $< 20 \text{ Hz}$	2
	Stabilité	Marge de gain $\geq 6 \text{ dB}$ Marge de phase $\geq 45^\circ$	0 1

Les critères indiquent sur quelle(s) donnée(s) physique(s) agir pour réaliser la fonction. À une fonction de service particulière peuvent être associés plusieurs critères, chacun étant accompagné d'un niveau qui indique la plage de valeur associée à la grandeur du critère avec une indication claire des unités.

- **Appel à des variantes.**

Demande et fixe des limites à l'étude d'autres propositions ou d'autres solutions possibles pour réaliser le produit.

- **Cadre de réponse.**

Destiné à simplifier et à codifier la façon de répondre (présentations, descriptions, ...) pour faciliter les dépouillements et donc l'analyse des différentes idées.

- **Appel à des variantes.**

Demande et fixe des limites à l'étude d'autres propositions ou d'autres solutions possibles pour réaliser le produit.

- **Cadre de réponse.**

Destiné à simplifier et à codifier la façon de répondre (présentations, descriptions, ...) pour faciliter les dépouillements et donc l'analyse des différentes idées.

Les deux dernières parties sont optionnelles.

# Nécessité de caractériser le besoin client

La partie **Expression fonctionnelle des besoins** est capitale pour la satisfaction du client.

# Nécessité de caractériser le besoin client

La partie **Expression fonctionnelle des besoins** est capitale pour la satisfaction du client.

**EXEMPLE :** Un constructeur automobile souhaite introduire sur le marché deux véhicules : un véhicule de type **cabriolet sportif individuel**

# Nécessité de caractériser le besoin client

La partie **Expression fonctionnelle des besoins** est capitale pour la satisfaction du client.

**EXEMPLE :** Un constructeur automobile souhaite introduire sur le marché deux véhicules : un véhicule de type **cabriolet sportif individuel** (concurrence : BMW Z4, Audi TT, Peugeot RCZ ou Porsche Boxter)

# Nécessité de caractériser le besoin client

La partie **Expression fonctionnelle des besoins** est capitale pour la satisfaction du client.

**EXEMPLE :** Un constructeur automobile souhaite introduire sur le marché deux véhicules : un véhicule de type **cabriolet sportif individuel** (concurrence : BMW Z4, Audi TT, Peugeot RCZ ou Porsche Boxter) et un véhicule de type **berline monospace familiale**

# Nécessité de caractériser le besoin client

La partie **Expression fonctionnelle des besoins** est capitale pour la satisfaction du client.

**EXEMPLE :** Un constructeur automobile souhaite introduire sur le marché deux véhicules : un véhicule de type **cabriolet sportif individuel** (concurrence : BMW Z4, Audi TT, Peugeot RCZ ou Porsche Boxter) et un véhicule de type **berline monospace familiale** (concurrence : Citroën Picasso, Renault Scenic ou Volkswagen Touran).

Pour développer un tel produit technique, le premier réflexe est souvent de considérer que le besoin du client acheteur d'un véhicule automobile est de **se déplacer, effectuer des trajets courts ou longs** (déplacement journalier du domicile au travail ou départ en vacances),  
...

Pour développer un tel produit technique, le premier réflexe est souvent de considérer que le besoin du client acheteur d'un véhicule automobile est de **se déplacer, effectuer des trajets courts ou longs** (déplacement journalier du domicile au travail ou départ en vacances), ...

Ces formulations classiques étant valables pour n'importe quel véhicule et ne précisant pas suffisamment la typologie du véhicule, elles n'indiquent rien sur ce qui poussera le client à entrer chez un concessionnaire et acheter un de ces véhicules particuliers.

Critères	Cabriolet sportif	Berline Monospace
----------	-------------------	-------------------

Critères	Cabriolet sportif	Berline Monospace
Descripteurs	Luxe et image sociale	Confort et praticité

Critères	Cabriolet sportif	Berline Monospace
Descripteurs	Luxe et image sociale	Confort et praticité
Passagers	2 à 4 personnes	5 à 7 personnes

Critères	Cabriolet sportif	Berline Monospace
Descripteurs	Luxe et image sociale	Confort et praticité
Passagers	2 à 4 personnes	5 à 7 personnes
Coffre	Critère non significatif	$\geq 210$ litres

Critères	Cabriolet sportif	Berline Monospace
Descripteurs	Luxe et image sociale	Confort et praticité
Passagers	2 à 4 personnes	5 à 7 personnes
Coffre	Critère non significatif	$\geq 210$ litres
Trajets type annuels	Péri-urbains < 30 000 km	Inter-urbains > 80 000 km

Critères	Cabriolet sportif	Berline Monospace
Descripteurs	Luxe et image sociale	Confort et praticité
Passagers	2 à 4 personnes	5 à 7 personnes
Coffre	Critère non significatif	$\geq 210$ litres
Trajets type annuels	Péri-urbains $< 30\,000$ km	Inter-urbains $> 80\,000$ km
Puissance	$\geq 180$ cv	$\geq 120$ cv

Critères	Cabriolet sportif	Berline Monospace
Descripteurs	Luxe et image sociale	Confort et praticité
Passagers	2 à 4 personnes	5 à 7 personnes
Coffre	Critère non significatif	$\geq 210$ litres
Trajets type annuels	Péri-urbains < 30 000 km	Inter-urbains > 80 000 km
Puissance	$\geq 180$ cv	$\geq 120$ cv
Motorisation	Essence uniquement	Essence ou diesel

Critères	Cabriolet sportif	Berline Monospace
Descripteurs	Luxe et image sociale	Confort et praticité
Passagers	2 à 4 personnes	5 à 7 personnes
Coffre	Critère non significatif	$\geq 210$ litres
Trajets type annuels	Péri-urbains < 30 000 km	Inter-urbains > 80 000 km
Puissance	$\geq 180$ cv	$\geq 120$ cv
Motorisation	Essence uniquement	Essence ou diesel
Bruit	moteur Rauque et typé sport	Minimal et doux

Critères	Cabriolet sportif	Berline Monospace
Descripteurs	Luxe et image sociale	Confort et praticité
Passagers	2 à 4 personnes	5 à 7 personnes
Coffre	Critère non significatif	$\geq 210$ litres
Trajets type annuels	Péri-urbains $< 30\,000$ km	Inter-urbains $> 80\,000$ km
Puissance	$\geq 180$ cv	$\geq 120$ cv
Motorisation	Essence uniquement	Essence ou diesel
Bruit	moteur Rauque et typé sport	Minimal et doux
Niveau bruit	à 50m $70\text{ dB} < \text{Bruit} < 80\text{ dB}$	Quasi inaudible

Critères	Cabriolet sportif	Berline Monospace
Descripteurs	Luxe et image sociale	Confort et praticité
Passagers	2 à 4 personnes	5 à 7 personnes
Coffre	Critère non significatif	$\geq 210$ litres
Trajets type annuels	Péri-urbains $< 30\,000$ km	Inter-urbains $> 80\,000$ km
Puissance	$\geq 180$ cv	$\geq 120$ cv
Motorisation	Essence uniquement	Essence ou diesel
Bruit	moteur Rauque et typé sport	Minimal et doux
Niveau bruit	à 50m $70$ dB $<$ Bruit $< 80$ dB	Quasi inaudible
Consommation	Non significatif	$\leq 6$ l / 100 km

Critères	Cabriolet sportif	Berline Monospace
Descripteurs	Luxe et image sociale	Confort et praticité
Passagers	2 à 4 personnes	5 à 7 personnes
Coffre	Critère non significatif	$\geq 210$ litres
Trajets type annuels	Péri-urbains $< 30\ 000$ km	Inter-urbains $> 80\ 000$ km
Puissance	$\geq 180$ cv	$\geq 120$ cv
Motorisation	Essence uniquement	Essence ou diesel
Bruit	moteur Rauque et typé sport	Minimal et doux
Niveau bruit	à 50m $70\text{ dB} < \text{Bruit} < 80\text{ dB}$	Quasi inaudible
Consommation	Non significatif	$\leq 6\text{ l} / 100\text{ km}$
Vitesse maximale	$\geq 220\text{ km/h}$	$\geq 150\text{ km}$

Critères	Cabriolet sportif	Berline Monospace
Descripteurs	Luxe et image sociale	Confort et praticité
Passagers	2 à 4 personnes	5 à 7 personnes
Coffre	Critère non significatif	$\geq 210$ litres
Trajets type annuels	Péri-urbains $< 30\,000$ km	Inter-urbains $> 80\,000$ km
Puissance	$\geq 180$ cv	$\geq 120$ cv
Motorisation	Essence uniquement	Essence ou diesel
Bruit	moteur Rauque et typé sport	Minimal et doux
Niveau bruit	à 50m $70$ dB $<$ Bruit $< 80$ dB	Quasi inaudible
Consommation	Non significatif	$\leq 6$ l / 100 km
Vitesse maximale	$\geq 220$ km/h	$\geq 150$ km
0 - 100 km/h	$\leq 8$ s	$\leq 18$ s

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Industries & Entreprises
- 3 Industrie 4.0
- 4 Cahier des Charges Fonctionnelles (CdCF)
- 5 Ingénierie Système**
  - Pourquoi l'Ingénierie Système ?
  - Définition
  - Processus de conception
  - La modélisation
- 6 SysML

# Pourquoi l'Ingénierie Système?

Face à la complexification de notre environnement, et en regard des objectifs nouveaux que l'on cherche à atteindre, les systèmes à faire fonctionner, comme les organisations pour les réaliser et les exploiter, deviennent plus complexes.

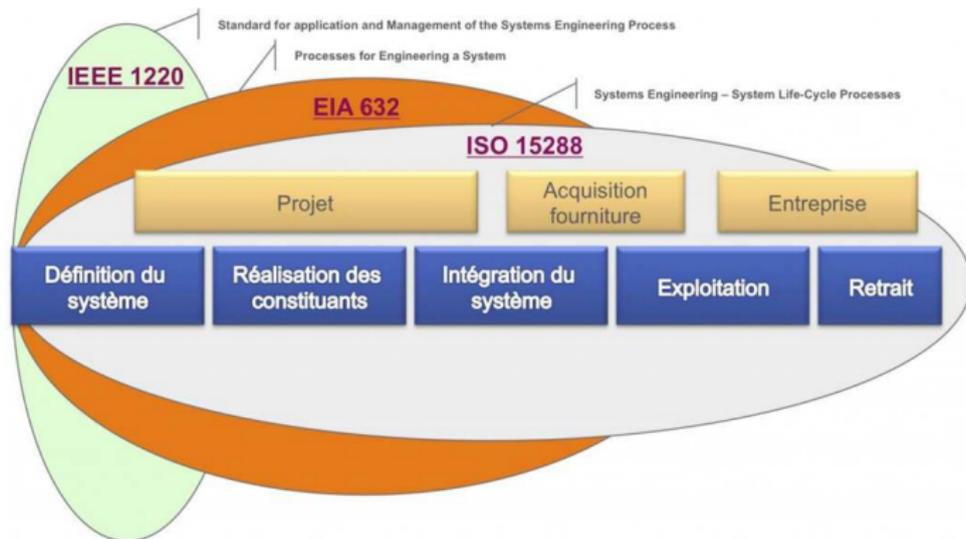
# Pourquoi l'Ingénierie Système ?

Face à la complexification de notre environnement, et en regard des objectifs nouveaux que l'on cherche à atteindre, les systèmes à faire fonctionner, comme les organisations pour les réaliser et les exploiter, deviennent plus complexes.

De plus, des contraintes de tous ordres à prendre en compte s'accroissent. La maîtrise des systèmes apparaît donc de plus en plus comme un enjeu majeur, tant pour les organismes que pour les nations, dans leurs interactions ou coopérations.

Cette approche, très ancienne dans sa démarche, est devenue nécessaire avec l'accroissement de la complexité des systèmes. Elle a été formalisée de manière rigoureuse à partir de 2001 par les normes IEEE <sup>a</sup> 1220, EIA <sup>b</sup> 632 et ISO <sup>c</sup> 15288.

Cette approche, très ancienne dans sa démarche, est devenue nécessaire avec l'accroissement de la complexité des systèmes. Elle a été formalisée de manière rigoureuse à partir de 2001 par les normes IEEE<sup>a</sup> 1220, EIA<sup>b</sup> 632 et ISO<sup>c</sup> 15288.



- Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Energy Information Administration
- International Organization for Standardization

# Définition

L'ingénierie système (IS) est une démarche méthodologique pour maîtriser la conception des systèmes et produits complexes. On peut aussi la définir ainsi :

# Définition

L'ingénierie système (IS) est une démarche méthodologique pour maîtriser la conception des systèmes et produits complexes. On peut aussi la définir ainsi :

## DÉFINITION : Ingénierie Système

*Approche interdisciplinaire rassemblant tous les efforts techniques pour faire évoluer et vérifier un ensemble intégré de systèmes, de gens, de produits et de solutions de processus de manière équilibrée au fil du cycle de vie pour satisfaire aux besoins client.*

# Définition

L'ingénierie système (IS) est une démarche méthodologique pour maîtriser la conception des systèmes et produits complexes. On peut aussi la définir ainsi :

## DÉFINITION : Ingénierie Système

*Approche interdisciplinaire rassemblant tous les efforts techniques pour faire évoluer et vérifier un ensemble intégré de systèmes, de gens, de produits et de solutions de processus de manière équilibrée au fil du cycle de vie pour satisfaire aux besoins client.*

Les pratiques de cette démarche sont aujourd'hui répertoriées dans des normes, réalisées à l'aide de méthodes et supportées par des outils.

# Processus de conception

En Ingénierie Système (IS), la définition du système comporte :

# Processus de conception

En Ingénierie Système (IS), la définition du système comporte :

- celle de ses sous-systèmes et constituants (matériels, logiciels, organisations et compétences humaines) et de leurs interfaces, sièges des interactions recherchées.

# Processus de conception

En Ingénierie Système (IS), la définition du système comporte :

- celle de ses sous-systèmes et constituants (matériels, logiciels, organisations et compétences humaines) et de leurs interfaces, sièges des interactions recherchées.
- celles des processus de leurs cycles de vie permettant de les concevoir, produire, vérifier, distribuer, déployer, exploiter, maintenir en condition opérationnelle et retirer du service, et donc des produits contributeurs nécessaires à ces processus.

# Processus de conception

En Ingénierie Système (IS), la définition du système comporte :

- celle de ses sous-systèmes et constituants (matériels, logiciels, organisations et compétences humaines) et de leurs interfaces, sièges des interactions recherchées.
- celles des processus de leurs cycles de vie permettant de les concevoir, produire, vérifier, distribuer, déployer, exploiter, maintenir en condition opérationnelle et retirer du service, et donc des produits contributeurs nécessaires à ces processus.

Cette approche de la définition induit une démarche descendante d'ingénierie s'appuyant sur une décomposition itérative du système en blocs constitutifs. Les constituants sont alors définis avec leurs interfaces ainsi que les produits contributeurs à leur cycle de vie.

L'aspect pluri-technique de tels systèmes implique :

L'aspect pluri-technique de tels systèmes implique :

- la participation de spécialistes de cultures différentes : il faut donc des outils de communications communs. Le langage SysML est un de ses outils (ce n'est pas une méthode).

L'aspect pluri-technique de tels systèmes implique :

- la participation de spécialistes de cultures différentes : il faut donc des outils de communications communs. Le langage SysML est un de ses outils (ce n'est pas une méthode).
- les délais de conception courts nécessitent un travail parallèle des équipes, ce qui rend difficile la mise en place d'une organisation du travail efficace.

L'aspect pluri-technique de tels systèmes implique :

- la participation de spécialistes de cultures différentes : il faut donc des outils de communications communs. Le langage SysML est un de ses outils (ce n'est pas une méthode).
- les délais de conception courts nécessitent un travail parallèle des équipes, ce qui rend difficile la mise en place d'une organisation du travail efficace.
- les inter-relations entre les composants et les performances à atteindre nécessitent une adaptation permanente des paramètres.

## Vers une démarche de projet multi-bouclée

De plus, les échanges avec le client en cours de conception conduisent parfois à modifier le cahier des charges et donc réajuster les solutions techniques en cours d'élaboration.

Ces contraintes propres au contexte de l'ingénierie ont conduit à remettre en cause le schéma de conception linéaire, de l'expression du besoin à la maintenance du produit en situation d'usage, dit en cascade.

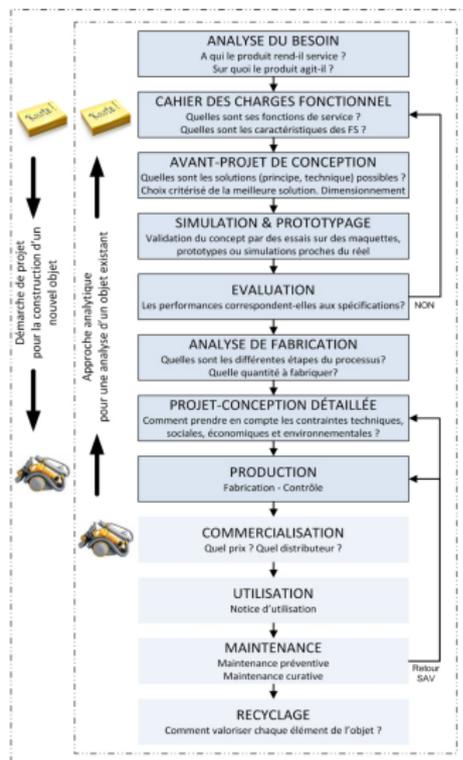
Ce schéma présume qu'une activité de conception ne débute que lorsque la précédente est définitivement terminée, ce qui limite son efficacité.



## Processus de conception en cascade



Processus de conception en cascade



démarche de projet

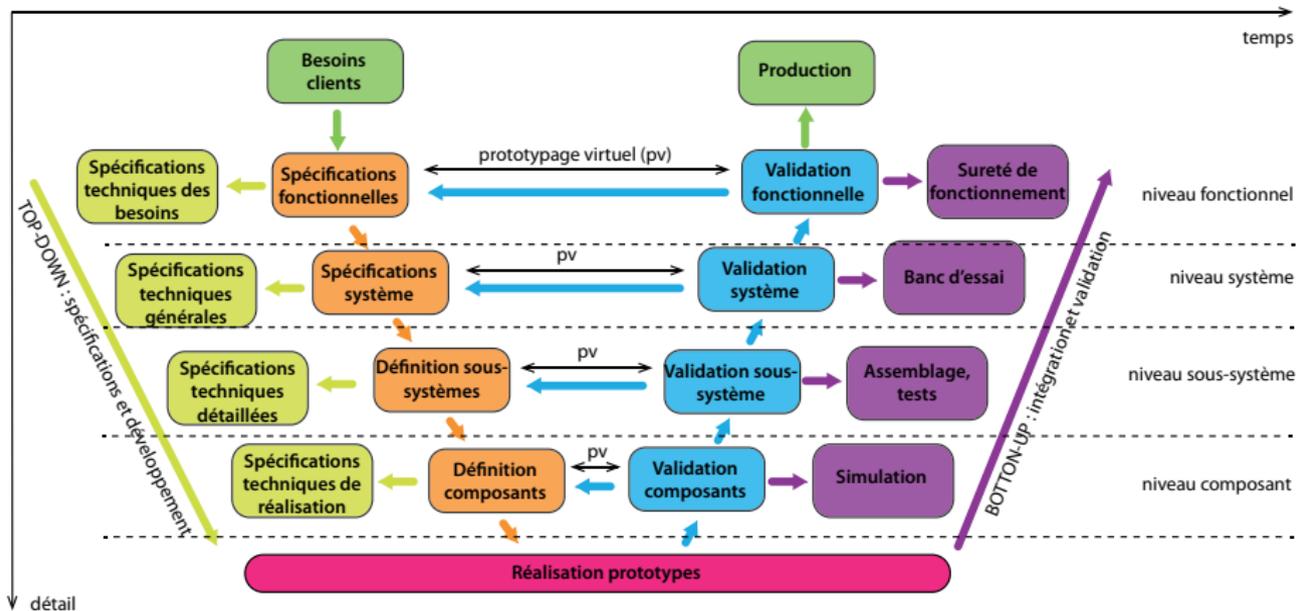
Une méthode classiquement répandue dans le milieu industriel est le **cycle en V**. Le cycle en V décline deux phases dans la conception :

Une méthode classiquement répandue dans le milieu industriel est le **cycle en V**. Le cycle en V décline deux phases dans la conception :

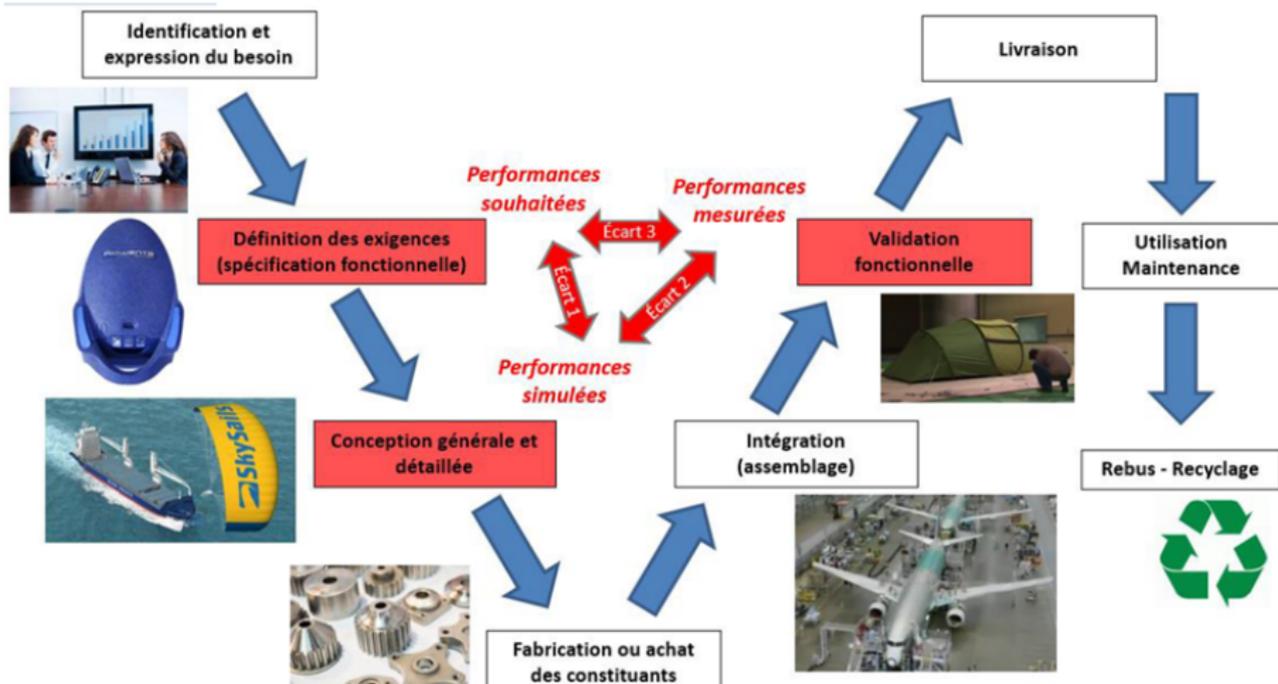
- Dans la **phase descendante (à gauche)**, le problème global est morcelé en sous problèmes et des choix technologiques sont proposés, ce qui aboutit à la définition de chaque composant.

Une méthode classiquement répandue dans le milieu industriel est le **cycle en V**. Le cycle en V décline deux phases dans la conception :

- Dans la **phase descendante (à gauche)**, le problème global est morcelé en sous problèmes et des choix technologiques sont proposés, ce qui aboutit à la définition de chaque composant.
- Dans la **phase ascendante (à droite)**, la solution technique précise est vérifiée à l'aide de calculs numériques ou d'essais expérimentaux, d'abord localement puis au sein d'ensemble plus globaux, jusqu'au produit final.



## Processus de conception en V

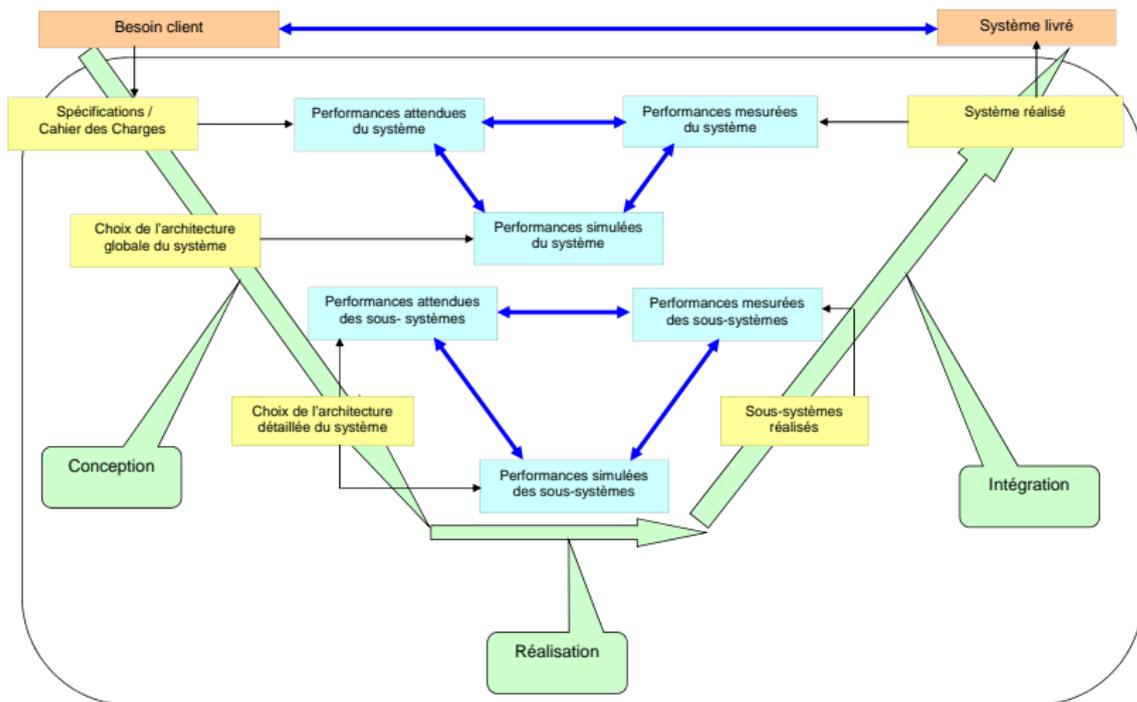


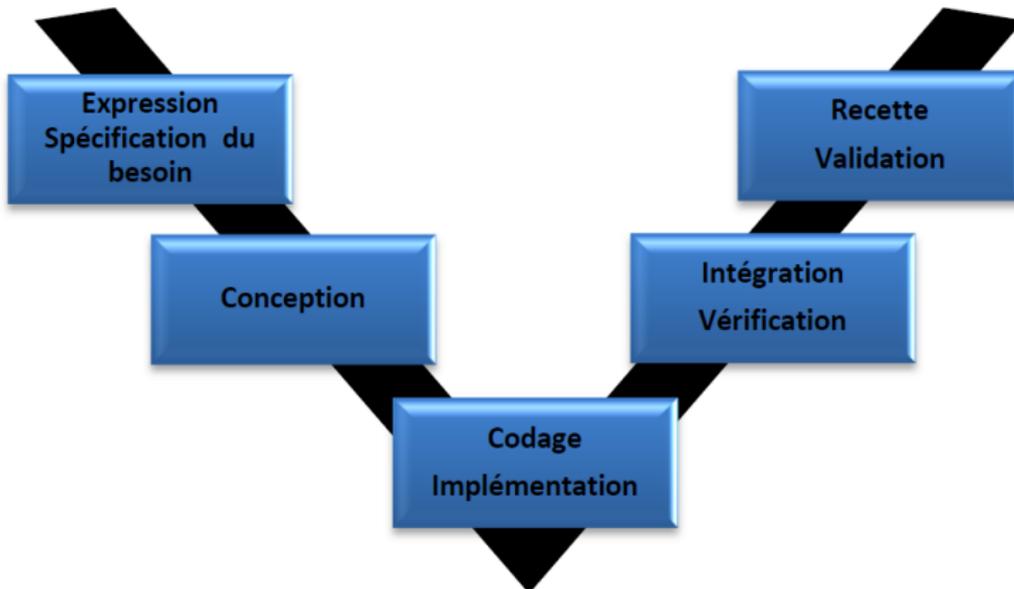
## Processus de conception en V

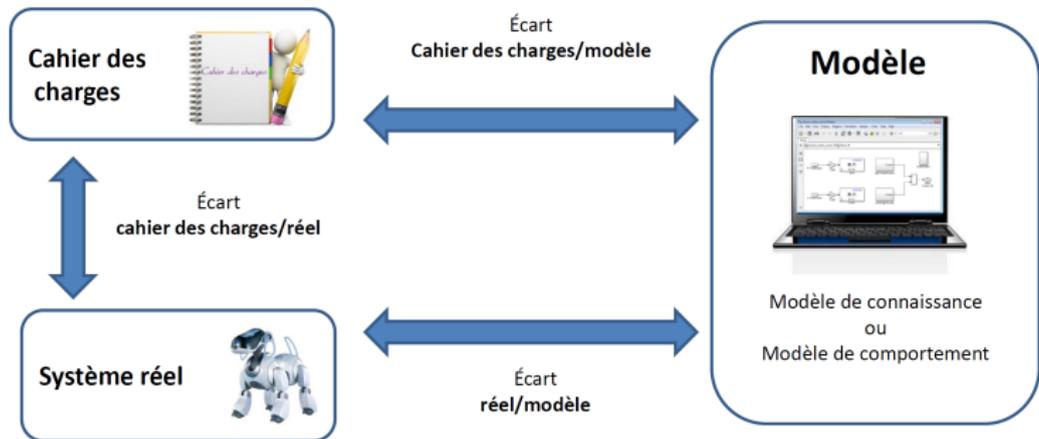
À chaque étape, si les tests de validation sont négatifs, il y a itération, c'est-à-dire modification des paramètres de la solution technique et test à nouveau.

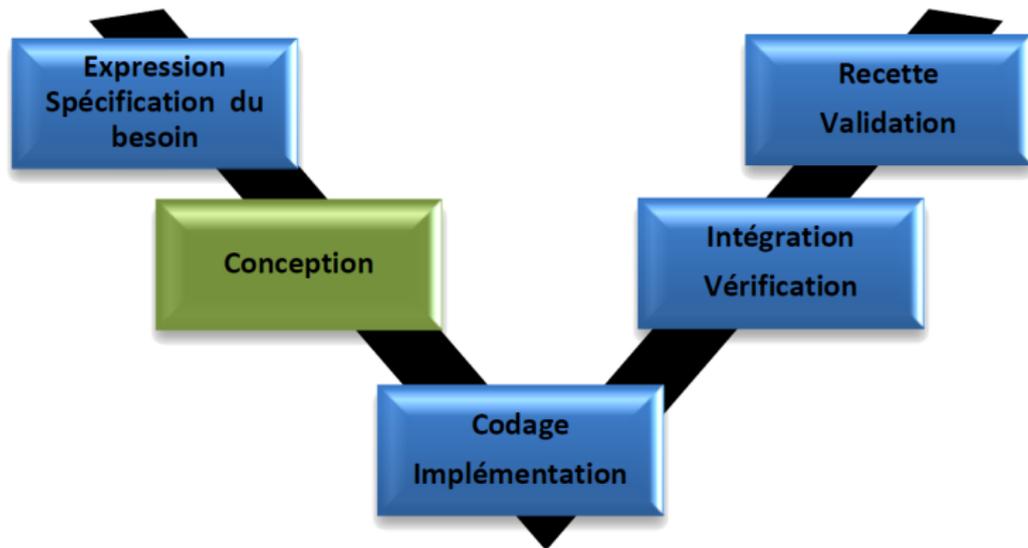
Cette démarche permet de diviser le système complexe en sous-composants, en définissant clairement le périmètre de chaque composant et ses contraintes vis-à-vis de son environnement.

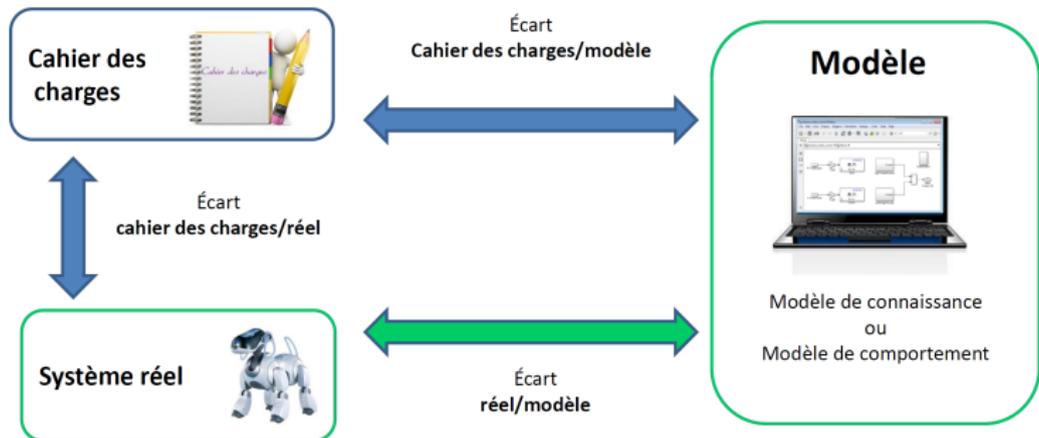
Il est ainsi possible aux équipes de travailler en parallèle au niveau inférieur du  $V$  et assurer la cohérence dans les phases d'intégration des composants car les itérations aux niveaux hauts sont beaucoup plus coûteuses que les itérations aux niveaux bas.

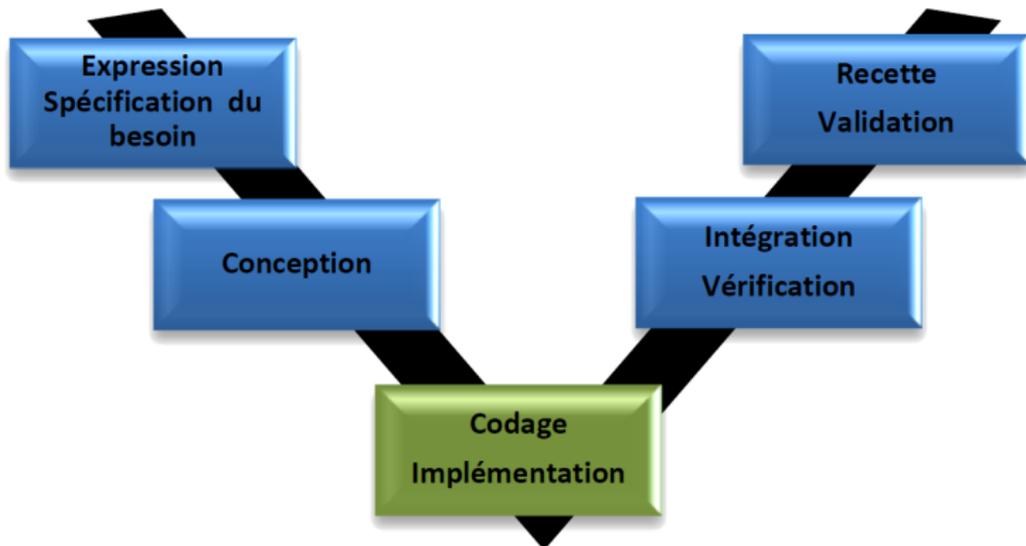


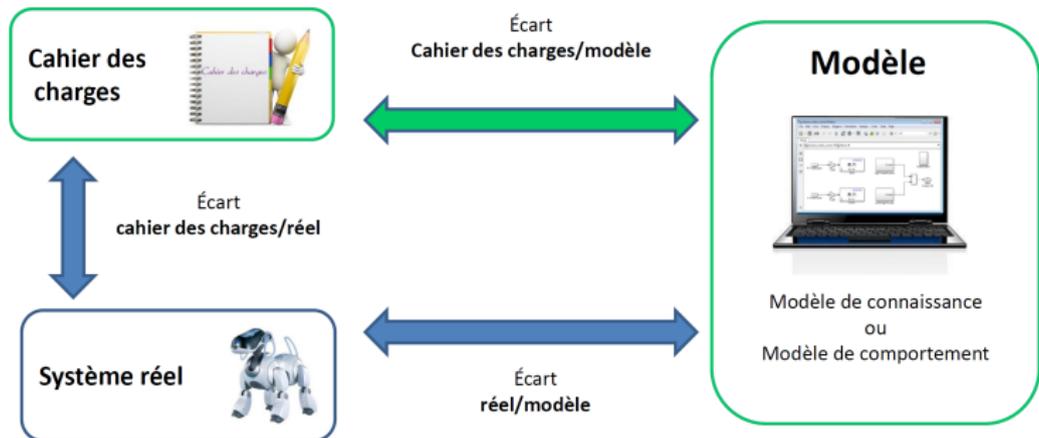


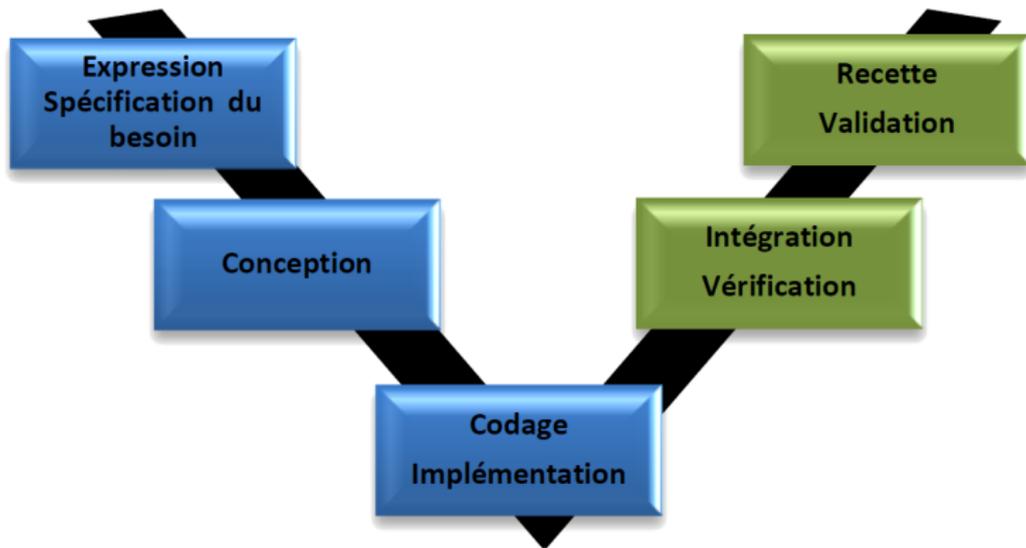


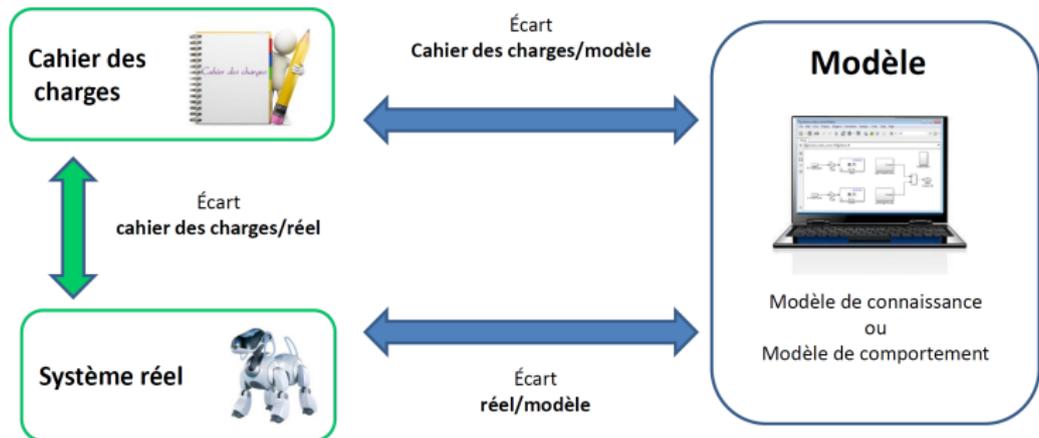












# La modélisation

La transformation d'un besoin émergeant en la définition d'un système lui apportant une solution met en œuvre de multiples activités intellectuelles faisant passer progressivement de concepts abstraits à la définition rigoureuse de produits.

# La modélisation

La transformation d'un besoin émergeant en la définition d'un système lui apportant une solution met en œuvre de multiples activités intellectuelles faisant passer progressivement de concepts abstraits à la définition rigoureuse de produits.

Il est nécessaire de s'appuyer sur des représentations tant du problème que de ses solutions possibles à différents niveaux d'abstraction pour appréhender, conceptualiser, concevoir, estimer, simuler, valider, justifier des choix, communiquer. C'est le rôle de la **modélisation**.

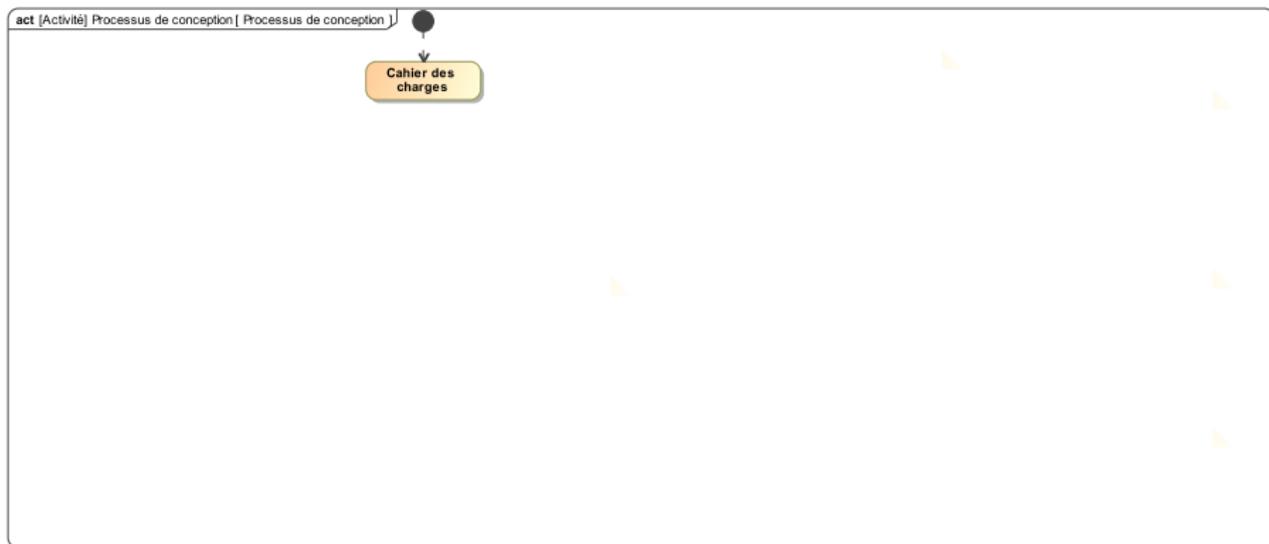
# La modélisation

La transformation d'un besoin émergeant en la définition d'un système lui apportant une solution met en œuvre de multiples activités intellectuelles faisant passer progressivement de concepts abstraits à la définition rigoureuse de produits.

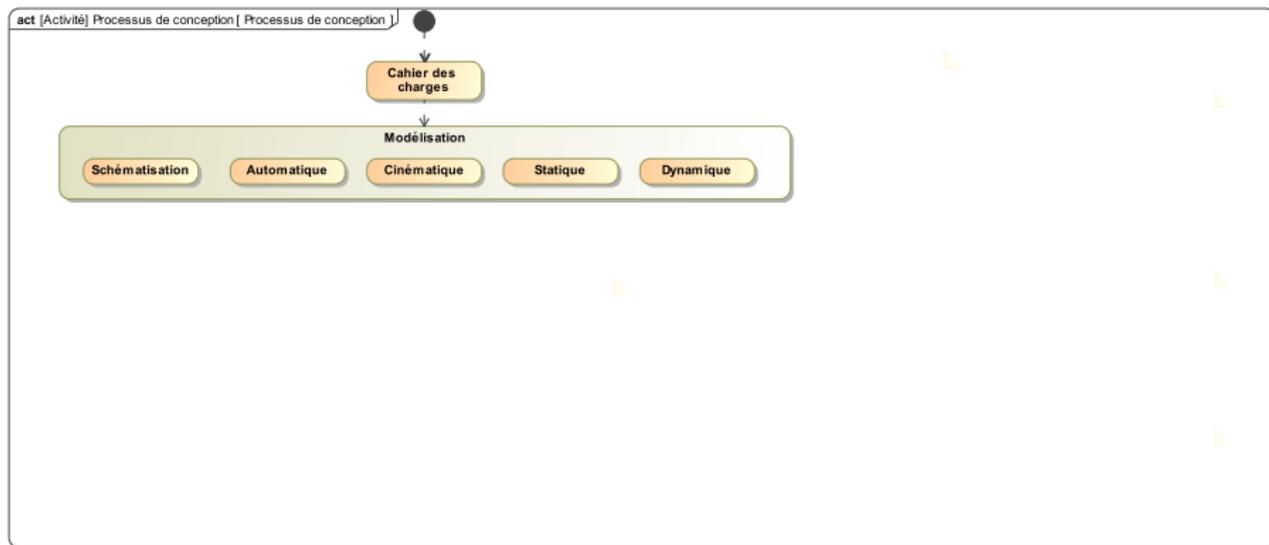
Il est nécessaire de s'appuyer sur des représentations tant du problème que de ses solutions possibles à différents niveaux d'abstraction pour **appréhender, conceptualiser, concevoir, estimer, simuler, valider, justifier des choix, communiquer**. C'est le rôle de la **modélisation**.

Les métiers mis en œuvre en Ingénierie Système, de tous temps, utilisent des modèles allant de représentations des plus concrètes, telles que les plans ou modèles réduits, aux plus abstraites, telles que les systèmes d'équations.

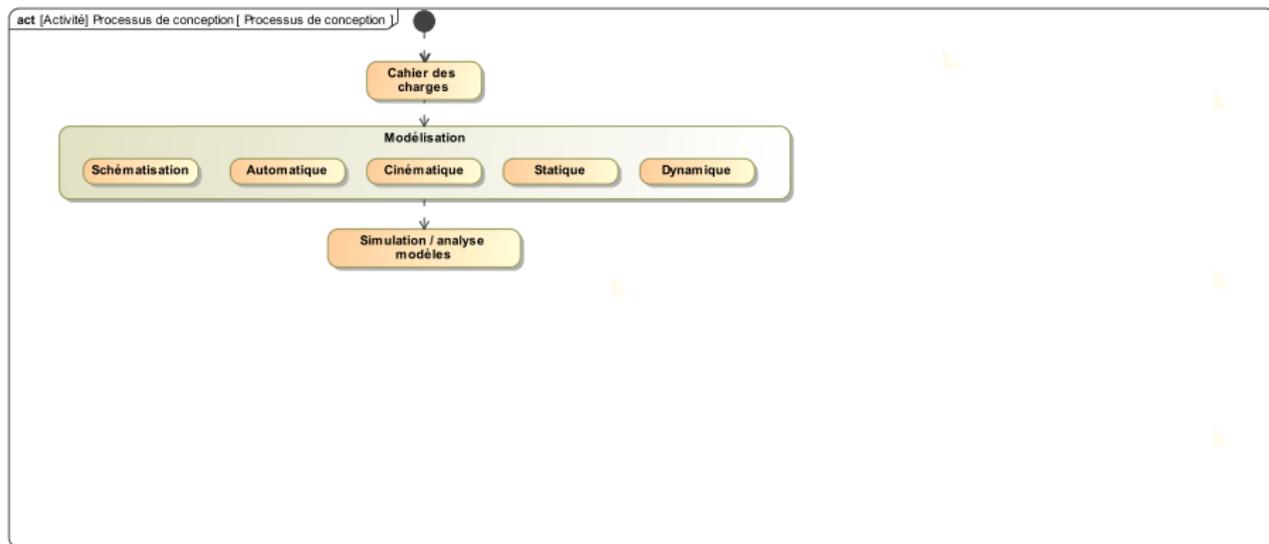
# Processus de conception



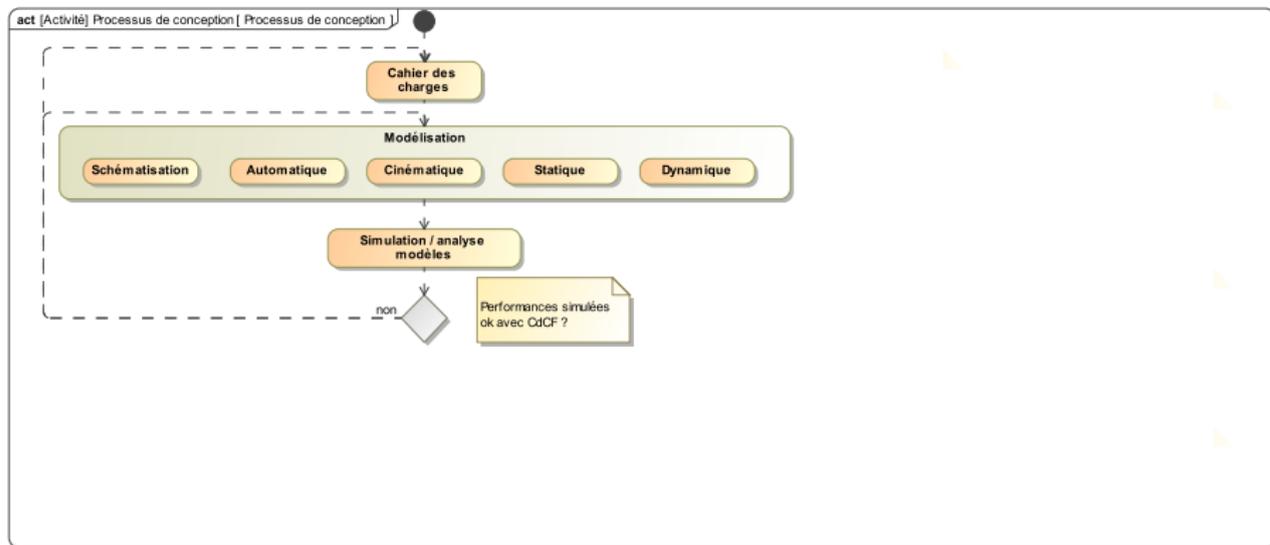
# Processus de conception



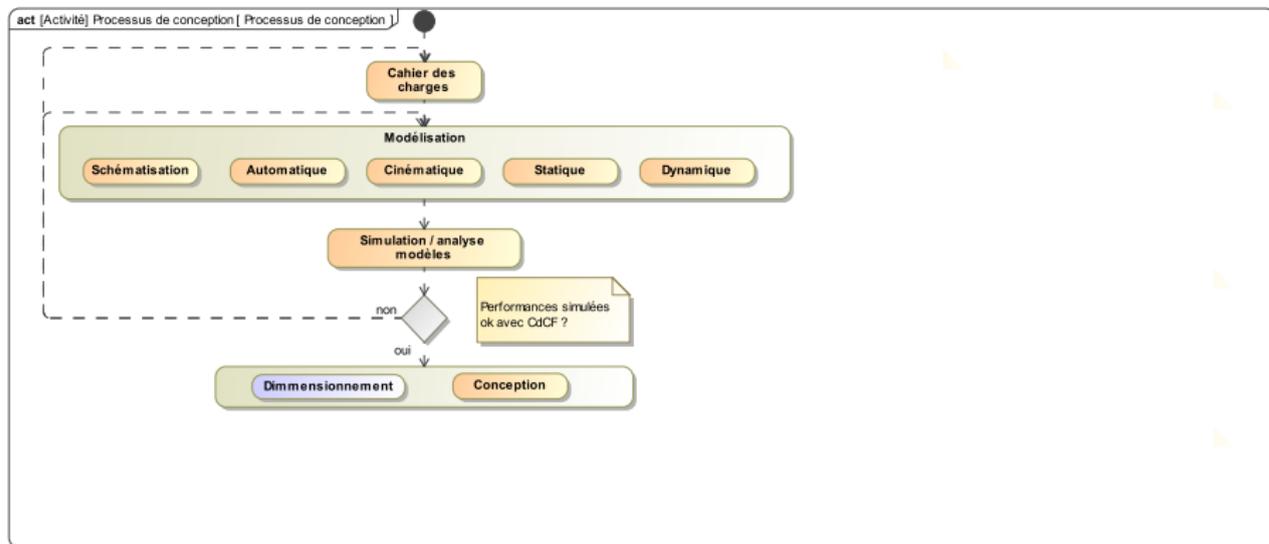
# Processus de conception



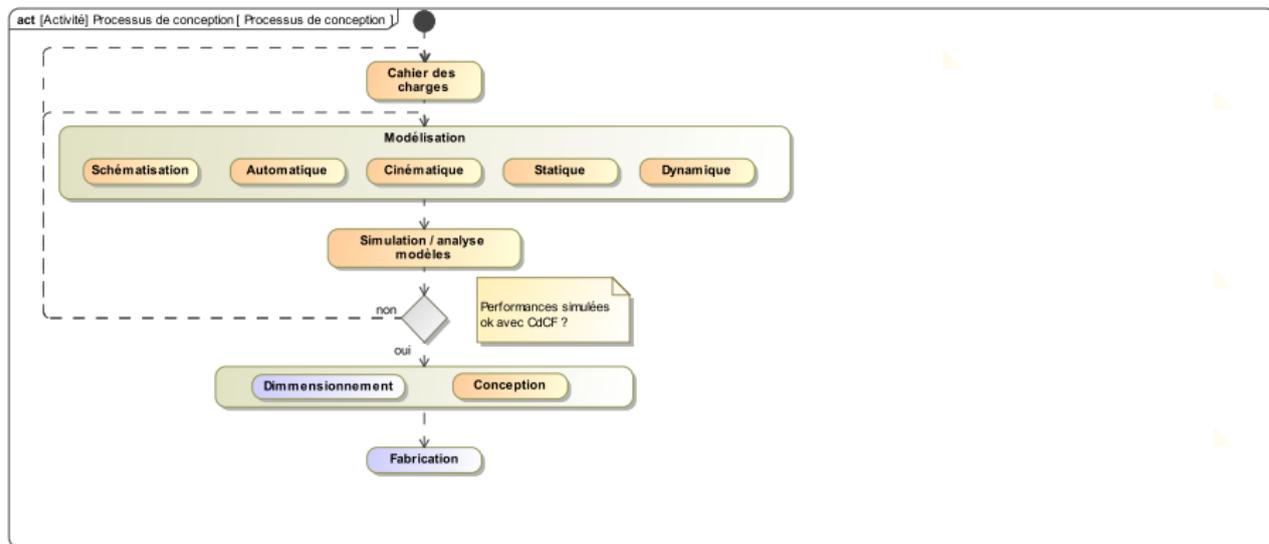
# Processus de conception



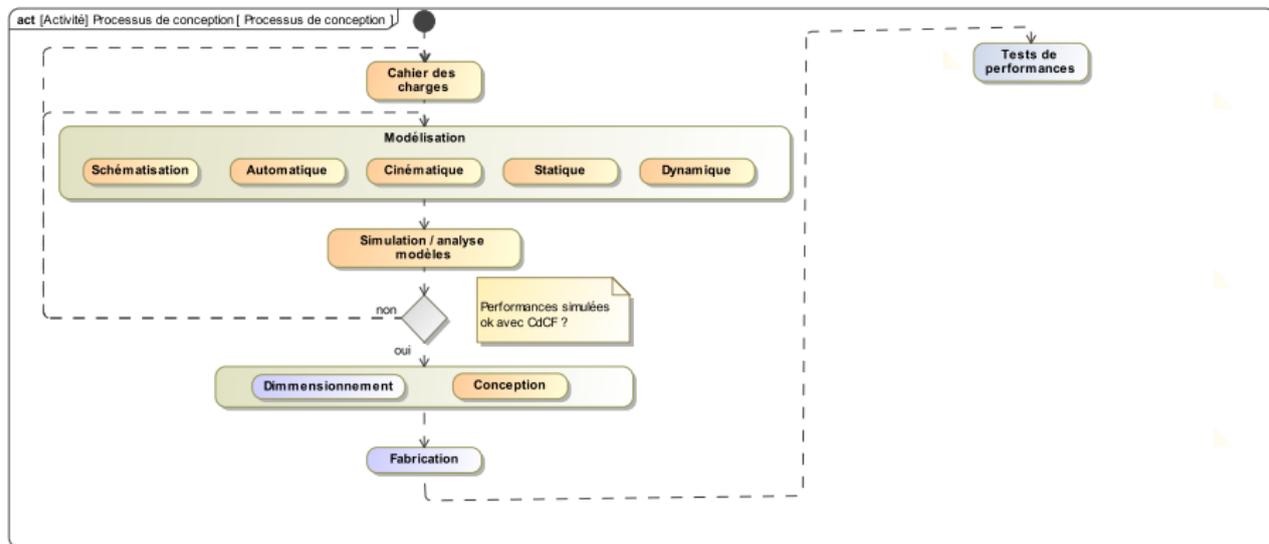
# Processus de conception



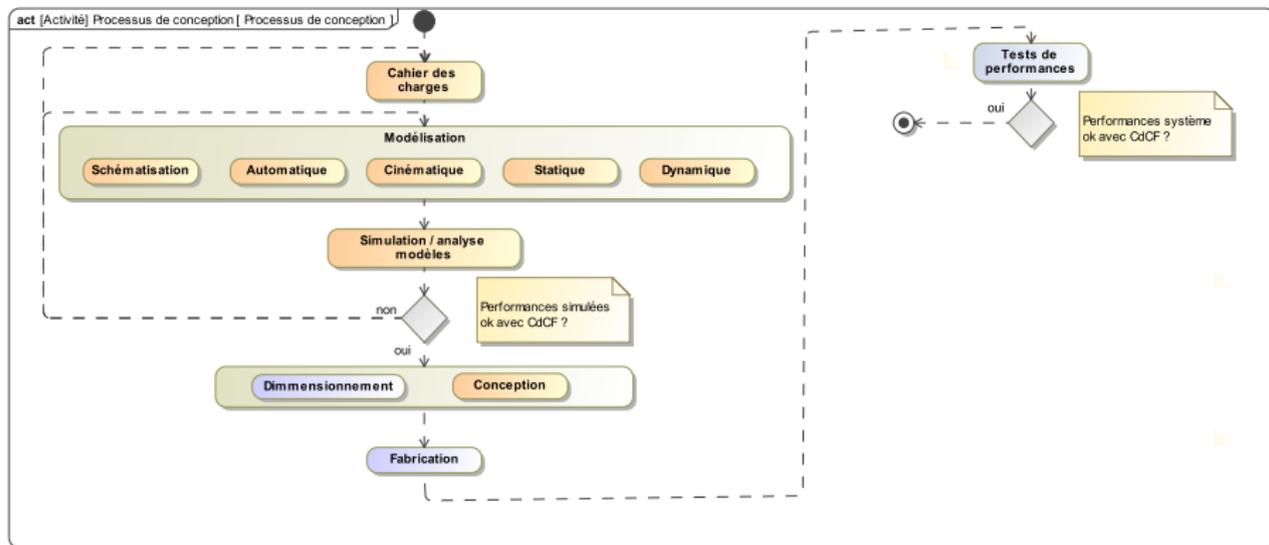
# Processus de conception



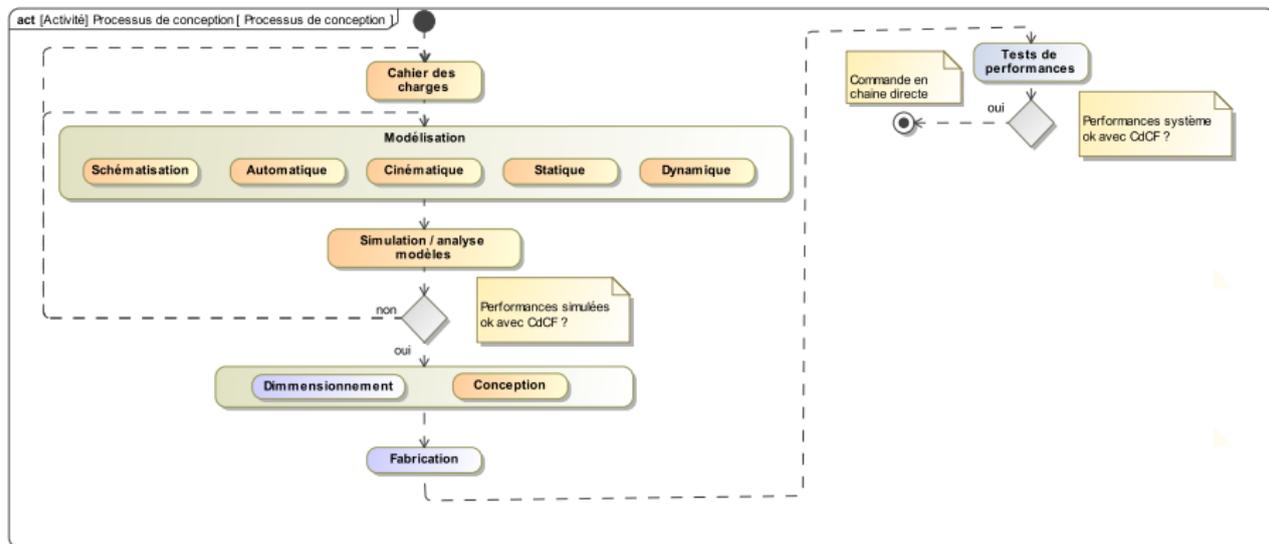
# Processus de conception



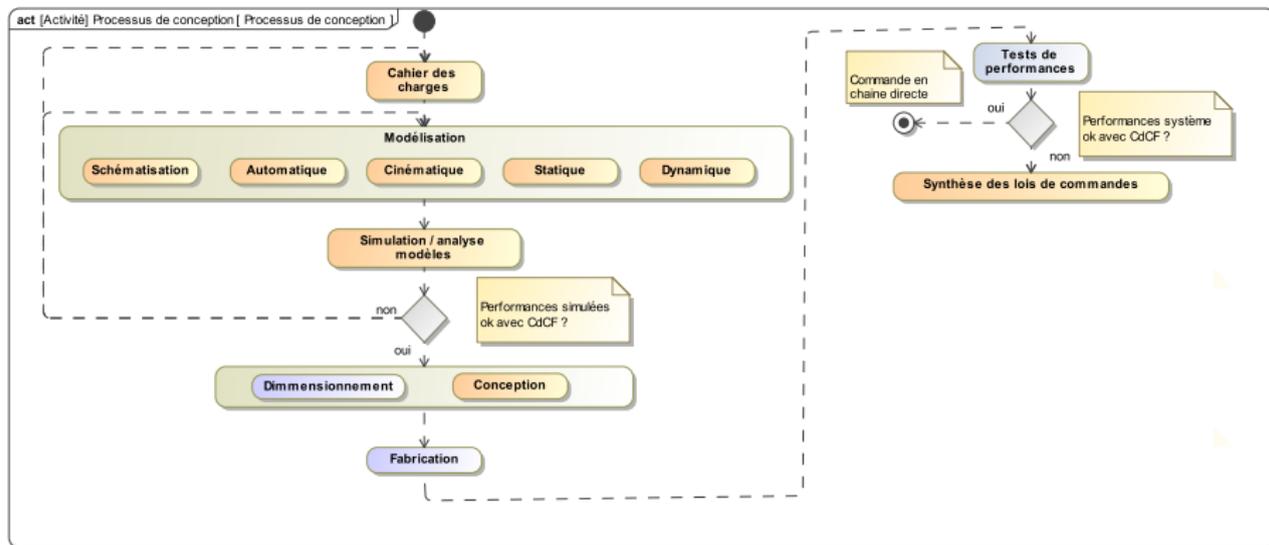
# Processus de conception



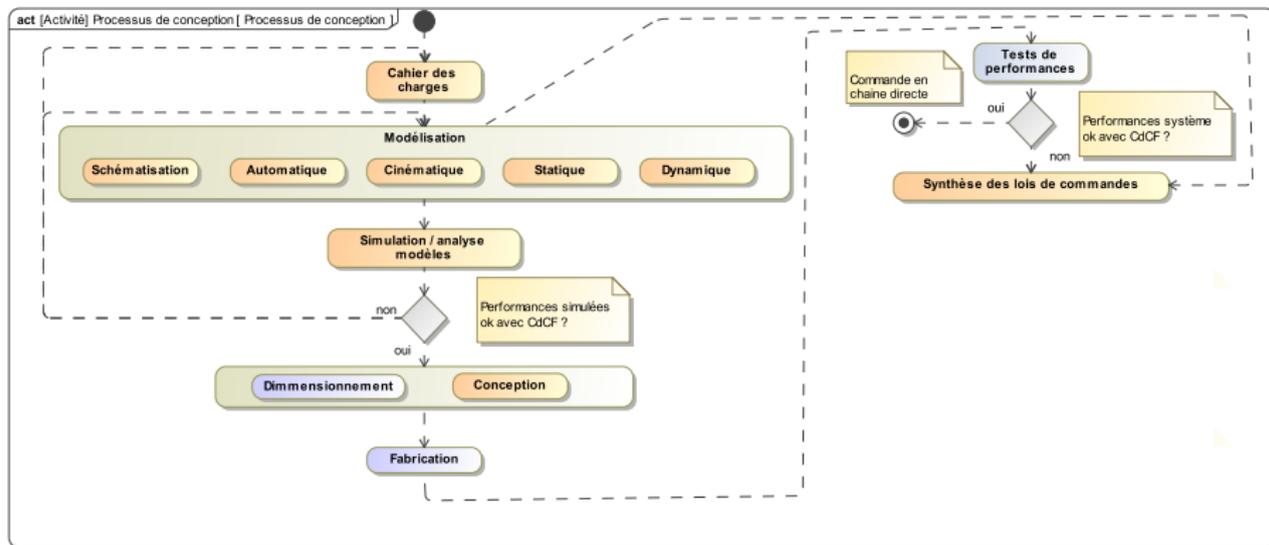
# Processus de conception



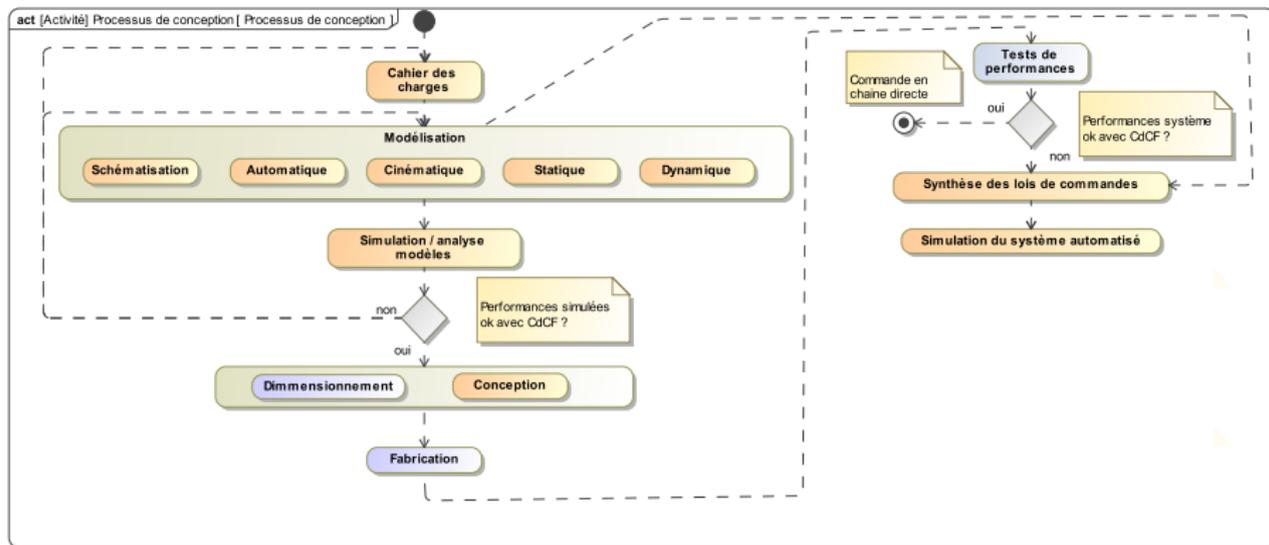
# Processus de conception



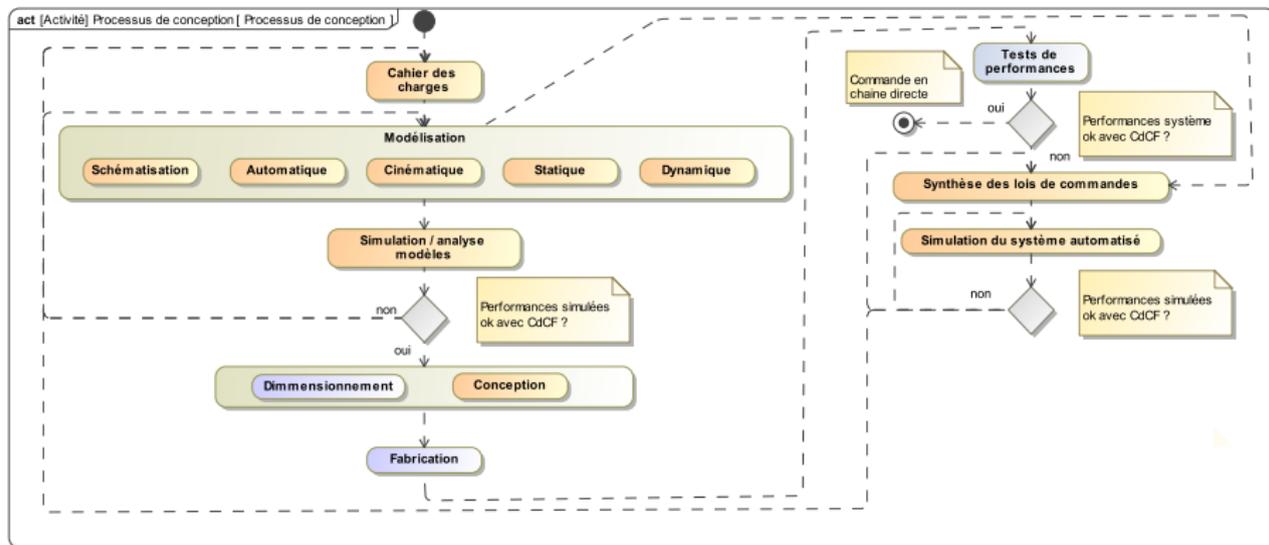
# Processus de conception



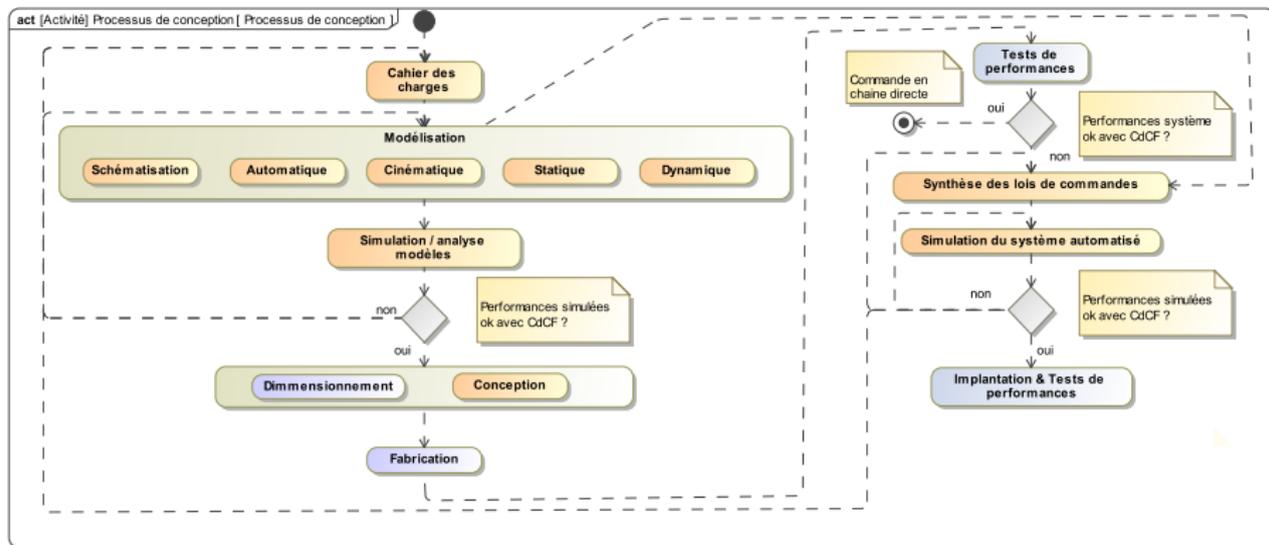
# Processus de conception



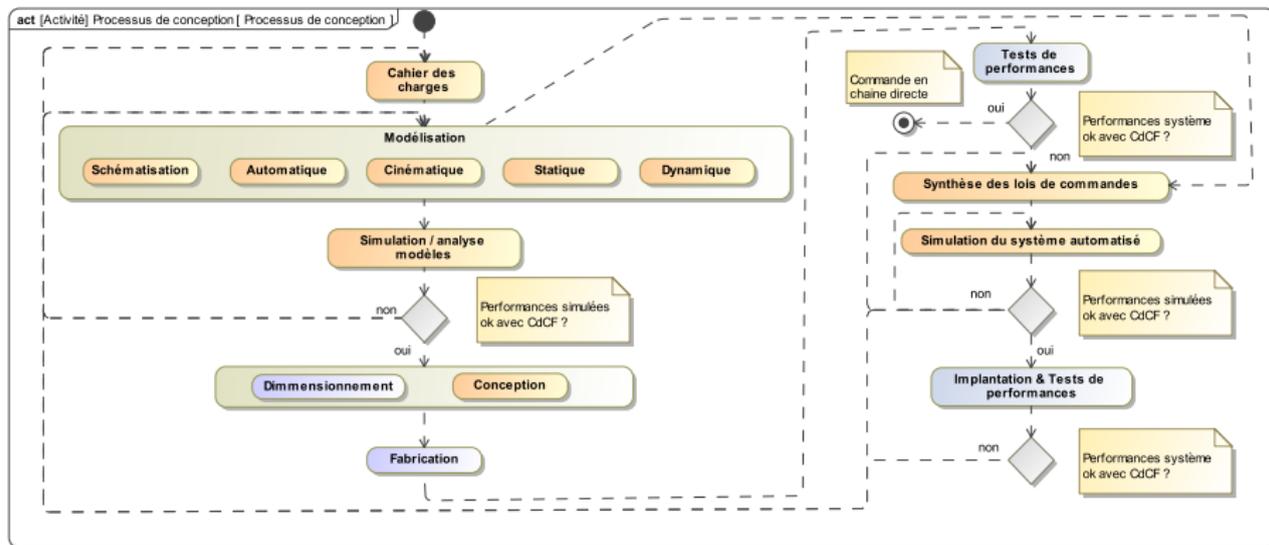
# Processus de conception



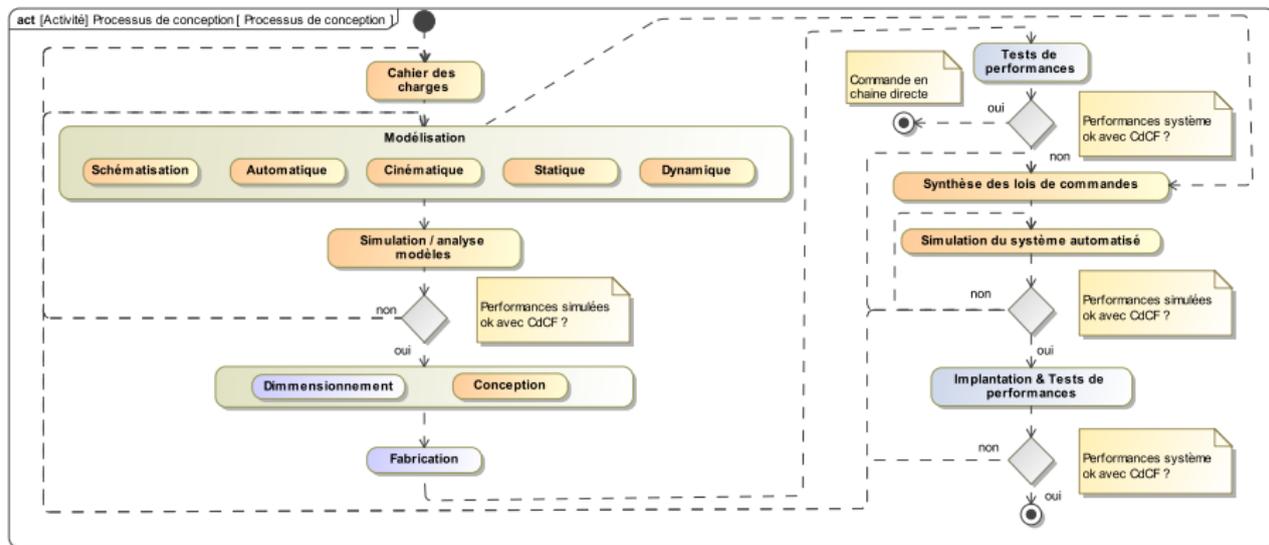
# Processus de conception



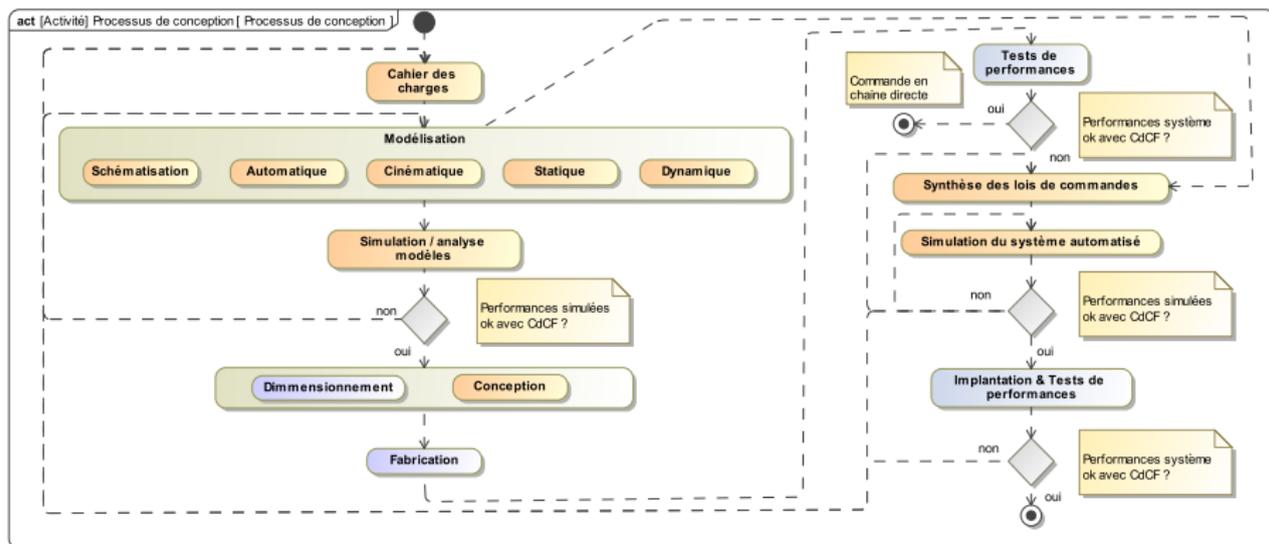
# Processus de conception



# Processus de conception



# Processus de conception



Dans un soucis d'uniformisation des représentations, le langage SysML a été créé.

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Industries & Entreprises
- 3 Industrie 4.0
- 4 Cahier des Charges Fonctionnelles (CdCF)
- 5 Ingénierie Système
- 6 SysML**
  - SysML : Pourquoi ?
  - SysML : Qu'est-ce ?
  - SysML : ses avantages
  - SysML : ses avantages
  - Eléments graphiques des diagrammes

# SysML : Pourquoi ?

Dans un système complexe, les flux de matière, d'énergie ou d'information (MEI) échangés entre les composants, les relations orientées ou non et les bouclages ne permettent pas de décrire un système simplement sous la forme d'un texte ou d'un discours et l'utilisation d'un **support graphique** devient rapidement **indispensable**.

# SysML : Pourquoi ?

Dans un système complexe, les flux de matière, d'énergie ou d'information (MEI) échangés entre les composants, les relations orientées ou non et les bouclages ne permettent pas de décrire un système simplement sous la forme d'un texte ou d'un discours et l'utilisation d'un **support graphique** devient rapidement **indispensable**.

En conséquence, la représentation la mieux adaptée pour décrire un système complexe est nécessairement graphique.

La présence de niveaux hiérarchiques nécessite souvent un assemblage de représentations graphiques organisées par niveaux et par points de vue.

La présence de niveaux hiérarchiques nécessite souvent un assemblage de représentations graphiques organisées par niveaux et par points de vue.

Ainsi, l'analyse fonctionnelle d'un système technique se base traditionnellement sur l'utilisation de différentes méthodes, auxquelles sont associés plusieurs outils adaptés pour les différents secteurs d'activité.

La présence de niveaux hiérarchiques nécessite souvent un assemblage de représentations graphiques organisées par niveaux et par points de vue.

Ainsi, l'analyse fonctionnelle d'un système technique se base traditionnellement sur l'utilisation de différentes méthodes, auxquelles sont associés plusieurs outils adaptés pour les différents secteurs d'activité.

Ces outils, bien que très performants chacun dans leur domaine, sont trop disparates pour donner une vision globale cohérente du système étudié, ce qui rend l'analyse très difficile.

Par ailleurs, leur appropriation par des non-spécialistes est le plus souvent ardue, car nécessitant un socle de connaissances conséquent. L'idée est donc née au début des années 2000 d'**unifier les langages de modélisation**.

Cette réflexion a donné naissance au **langage de modélisation des systèmes SysML<sup>a</sup>** (Systems Modeling Language) qui a une structure standardisée depuis septembre 2007 (version 1.0a, la dernière en date étant la 1.3 de juin 2012).

---

a. Systems Modeling Language

## SysML : Qu'est-ce ?

Basé sur le langage UML<sup>a</sup>, SysML est un langage de modélisation pour l'Ingénierie Système. Il prend en charge la spécification, l'analyse, la conception, la vérification et la validation des systèmes qui comprennent le matériel, les logiciels, les données, le personnel, les procédures et les installations.

## SysML : Qu'est-ce ?

Basé sur le langage UML<sup>a</sup>, SysML est un langage de modélisation pour l'Ingénierie Système. Il prend en charge la spécification, l'analyse, la conception, la vérification et la validation des systèmes qui comprennent le matériel, les logiciels, les données, le personnel, les procédures et les installations.

C'est un langage de modélisation qui fournit :

## SysML : Qu'est-ce ?

Basé sur le langage UML<sup>a</sup>, SysML est un langage de modélisation pour l'Ingénierie Système. Il prend en charge la spécification, l'analyse, la conception, la vérification et la validation des systèmes qui comprennent le matériel, les logiciels, les données, le personnel, les procédures et les installations.

C'est un langage de modélisation qui fournit :

- **une sémantique** : qui donne une signification et une relation entre les signes et leurs référents

## SysML : Qu'est-ce ?

Basé sur le langage UML<sup>a</sup>, SysML est un langage de modélisation pour l'Ingénierie Système. Il prend en charge la spécification, l'analyse, la conception, la vérification et la validation des systèmes qui comprennent le matériel, les logiciels, les données, le personnel, les procédures et les installations.

C'est un langage de modélisation qui fournit :

- **une sémantique** : qui donne une signification et une relation entre les signes et leurs référents
- **une notation** : qui est un ensemble de signes conventionnels qui servent à fixer par écrit leur interprétation.

## SysML : Qu'est-ce ?

Basé sur le langage UML<sup>a</sup>, SysML est un langage de modélisation pour l'Ingénierie Système. Il prend en charge la spécification, l'analyse, la conception, la vérification et la validation des systèmes qui comprennent le matériel, les logiciels, les données, le personnel, les procédures et les installations.

C'est un langage de modélisation qui fournit :

- **une sémantique** : qui donne une signification et une relation entre les signes et leurs référents
- **une notation** : qui est un ensemble de signes conventionnels qui servent à fixer par écrit leur interprétation.

SysML permet d'approcher un modèle par des vues (fenêtre ayant un angle de vision déterminé). Une vue est un élément du modèle. Trois points de vue ont été privilégiés dans le langage SysML.

---

a. Unified Modeling Language



- Un point de vue **comportemental**, auxquels sont associés quatre diagrammes :

- Un point de vue **comportemental**, auxquels sont associés quatre diagrammes :
  - Le diagramme des cas d'utilisation (*Use Case Diagram*, indicateur **uc** ou **ucd**)

- Un point de vue **comportemental**, auxquels sont associés quatre diagrammes :
  - Le diagramme des cas d'utilisation (*Use Case Diagram*, indicateur **uc** ou **ucd**)
  - Le diagramme de séquence (*Sequence Diagram*, indicateur **seq**)

- Un point de vue **comportemental**, auxquels sont associés quatre diagrammes :
  - Le diagramme des cas d'utilisation (*Use Case Diagram*, indicateur **uc** ou **ucd**)
  - Le diagramme de séquence (*Sequence Diagram*, indicateur **seq**)
  - Le diagramme d'états (*State Machine Diagram*, indicateur **stm**)

- Un point de vue **comportemental**, auxquels sont associés quatre diagrammes :
  - Le diagramme des cas d'utilisation (*Use Case Diagram*, indicateur **uc** ou **ucd**)
  - Le diagramme de séquence (*Sequence Diagram*, indicateur **seq**)
  - Le diagramme d'états (*State Machine Diagram*, indicateur **stm**)
  - Le diagramme d'activités (*Activity Diagram*, indicateur **act**)

- Un point de vue **comportemental**, auxquels sont associés quatre diagrammes :
  - Le diagramme des cas d'utilisation (*Use Case Diagram*, indicateur **uc** ou **ucd**)
  - Le diagramme de séquence (*Sequence Diagram*, indicateur **seq**)
  - Le diagramme d'états (*State Machine Diagram*, indicateur **stm**)
  - Le diagramme d'activités (*Activity Diagram*, indicateur **act**)
- Un point de vue **structurel**, auxquels sont associés quatre diagrammes :

- Un point de vue **comportemental**, auxquels sont associés quatre diagrammes :
  - Le diagramme des cas d'utilisation (*Use Case Diagram*, indicateur **uc** ou **ucd**)
  - Le diagramme de séquence (*Sequence Diagram*, indicateur **seq**)
  - Le diagramme d'états (*State Machine Diagram*, indicateur **stm**)
  - Le diagramme d'activités (*Activity Diagram*, indicateur **act**)
- Un point de vue **structurel**, auxquels sont associés quatre diagrammes :
  - Le diagramme de définition de blocs (*Block Definition Diagram*, indicateur **bdd**)

- Un point de vue **comportemental**, auxquels sont associés quatre diagrammes :
  - Le diagramme des cas d'utilisation (*Use Case Diagram*, indicateur **uc** ou **ucd**)
  - Le diagramme de séquence (*Sequence Diagram*, indicateur **seq**)
  - Le diagramme d'états (*State Machine Diagram*, indicateur **stm**)
  - Le diagramme d'activités (*Activity Diagram*, indicateur **act**)
- Un point de vue **structurel**, auxquels sont associés quatre diagrammes :
  - Le diagramme de définition de blocs (*Block Definition Diagram*, indicateur **bdd**)
  - Le diagramme de bloc interne (*Internal Block Diagram*, indicateur **ibd**)

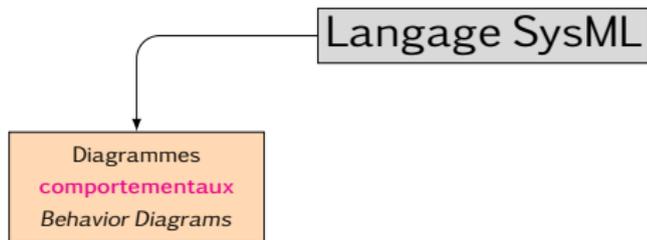
- Un point de vue **comportemental**, auxquels sont associés quatre diagrammes :
  - Le diagramme des cas d'utilisation (*Use Case Diagram*, indicateur **uc** ou **ucd**)
  - Le diagramme de séquence (*Sequence Diagram*, indicateur **seq**)
  - Le diagramme d'états (*State Machine Diagram*, indicateur **stm**)
  - Le diagramme d'activités (*Activity Diagram*, indicateur **act**)
- Un point de vue **structurel**, auxquels sont associés quatre diagrammes :
  - Le diagramme de définition de blocs (*Block Definition Diagram*, indicateur **bdd**)
  - Le diagramme de bloc interne (*Internal Block Diagram*, indicateur **ibd**)
  - Le diagramme paramétrique (*Parametric Diagram*, indicateur **par**)

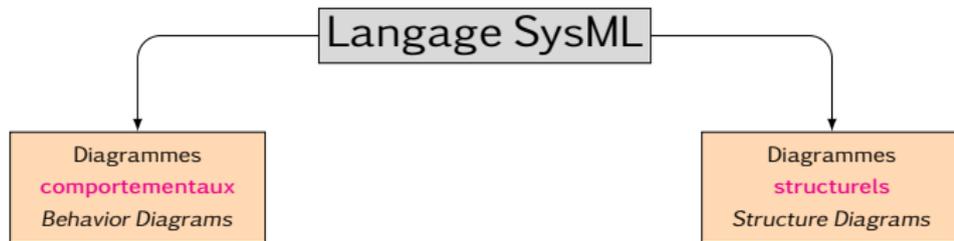
- Un point de vue **comportemental**, auxquels sont associés quatre diagrammes :
  - Le diagramme des cas d'utilisation (*Use Case Diagram*, indicateur **uc** ou **ucd**)
  - Le diagramme de séquence (*Sequence Diagram*, indicateur **seq**)
  - Le diagramme d'états (*State Machine Diagram*, indicateur **stm**)
  - Le diagramme d'activités (*Activity Diagram*, indicateur **act**)
- Un point de vue **structurel**, auxquels sont associés quatre diagrammes :
  - Le diagramme de définition de blocs (*Block Definition Diagram*, indicateur **bdd**)
  - Le diagramme de bloc interne (*Internal Block Diagram*, indicateur **ibd**)
  - Le diagramme paramétrique (*Parametric Diagram*, indicateur **par**)
  - Le diagramme de paquetages (*Package Diagram*, indicateur **pkg**)

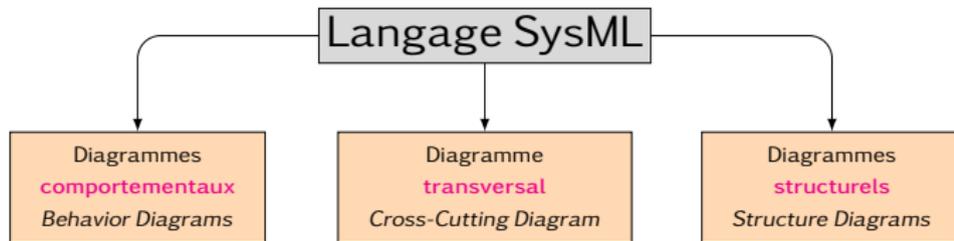
- Un point de vue **comportemental**, auxquels sont associés quatre diagrammes :
  - Le diagramme des cas d'utilisation (*Use Case Diagram*, indicateur **uc** ou **ucd**)
  - Le diagramme de séquence (*Sequence Diagram*, indicateur **seq**)
  - Le diagramme d'états (*State Machine Diagram*, indicateur **stm**)
  - Le diagramme d'activités (*Activity Diagram*, indicateur **act**)
- Un point de vue **structurel**, auxquels sont associés quatre diagrammes :
  - Le diagramme de définition de blocs (*Block Definition Diagram*, indicateur **bdd**)
  - Le diagramme de bloc interne (*Internal Block Diagram*, indicateur **ibd**)
  - Le diagramme paramétrique (*Parametric Diagram*, indicateur **par**)
  - Le diagramme de paquetages (*Package Diagram*, indicateur **pkg**)
- Un point de vue **transversal**, spécifique au langage SysML, a été rajouté : le diagramme d'exigences (*Requirement Diagram*, indicateur **req**)

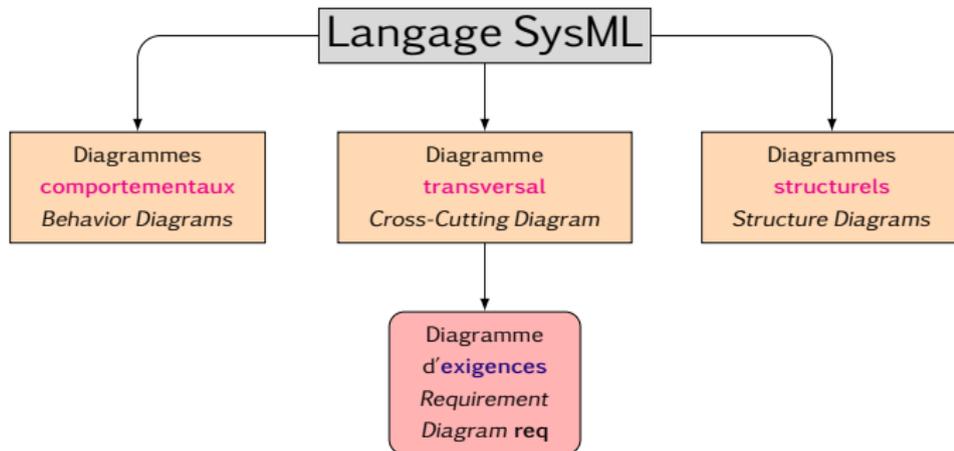


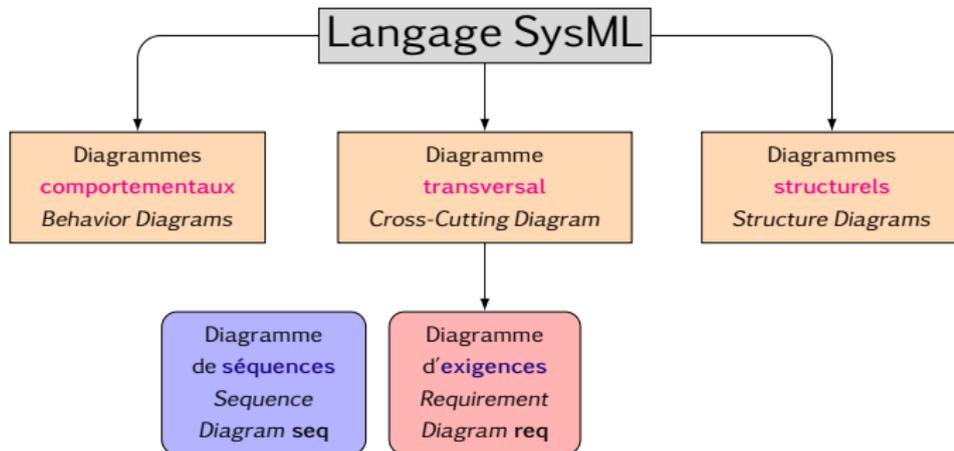
# Langage SysML

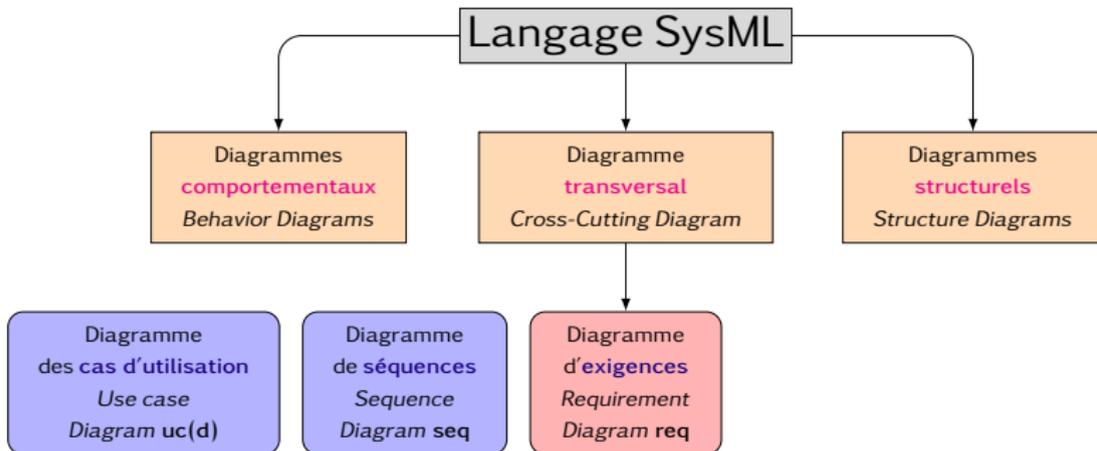


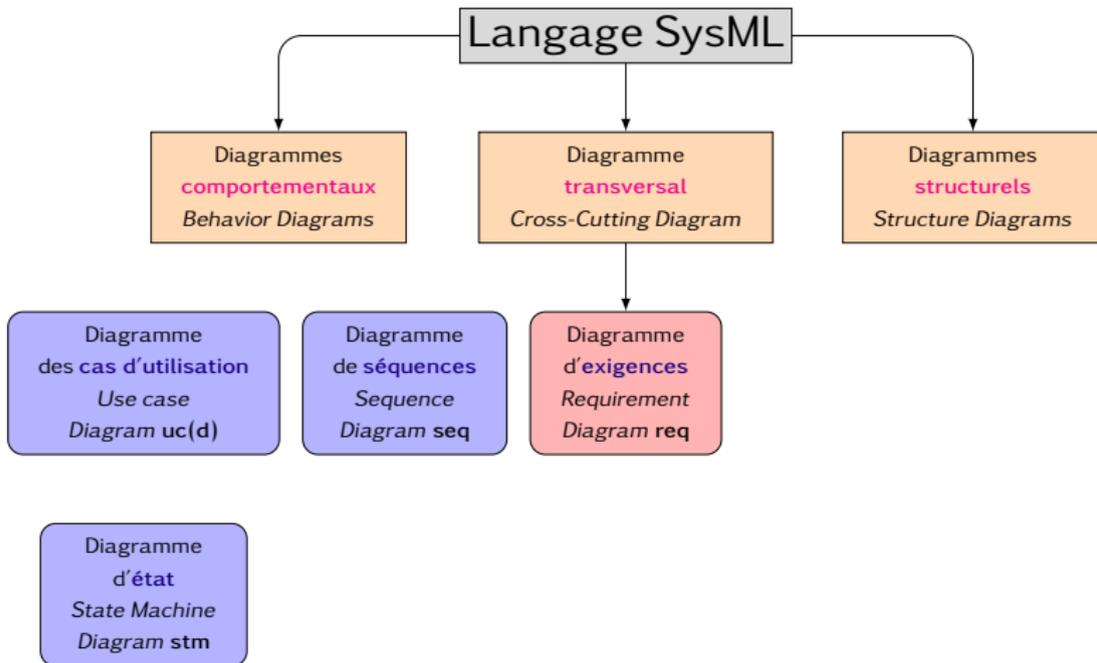


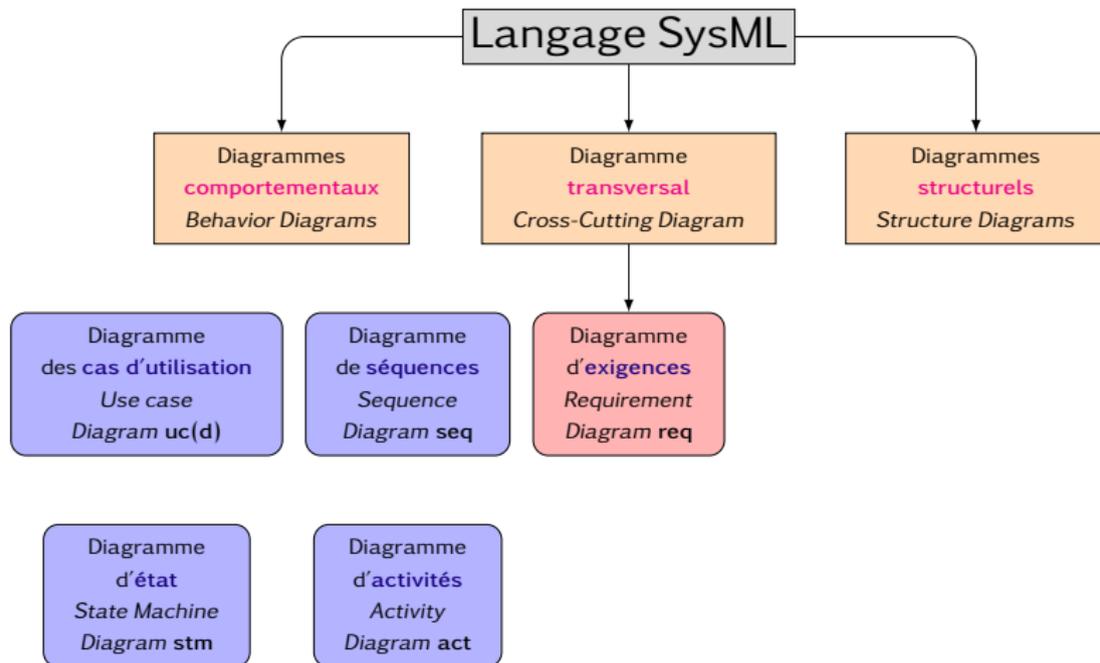


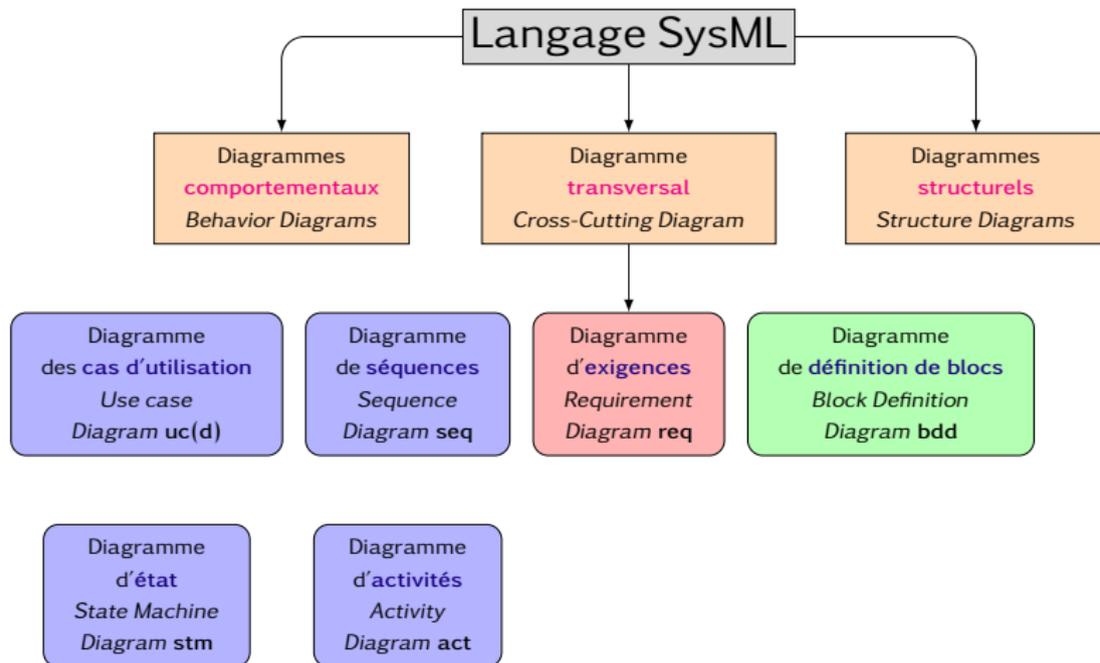


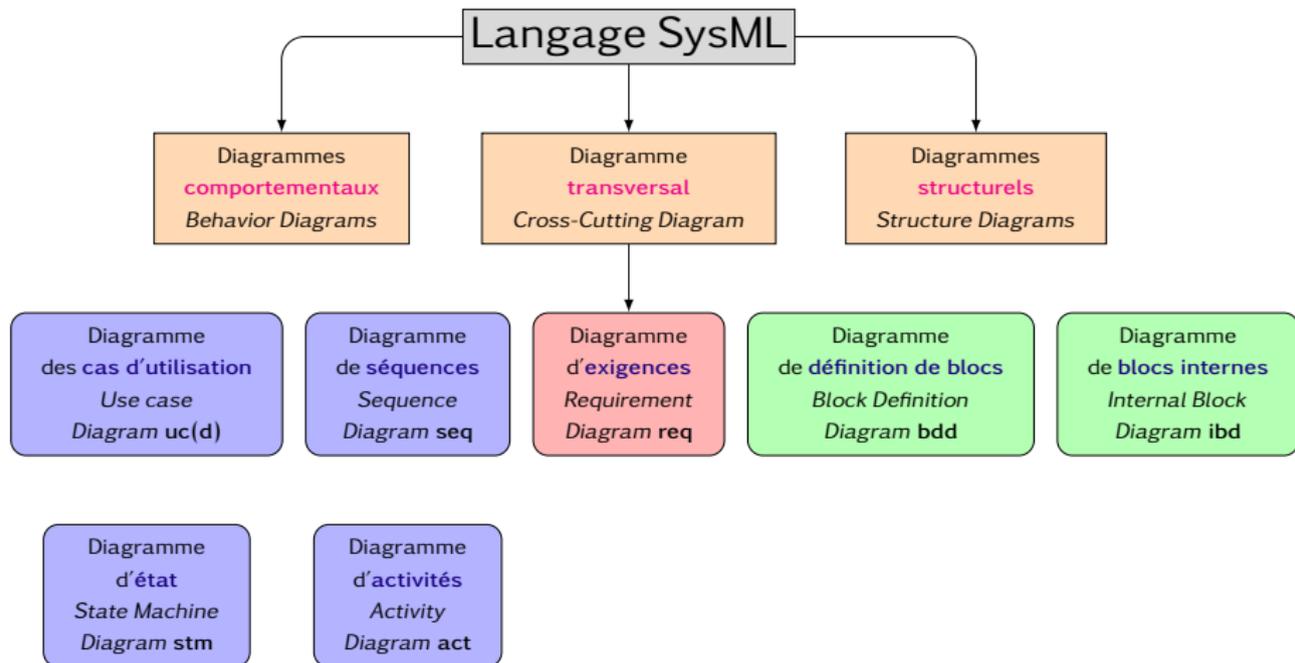


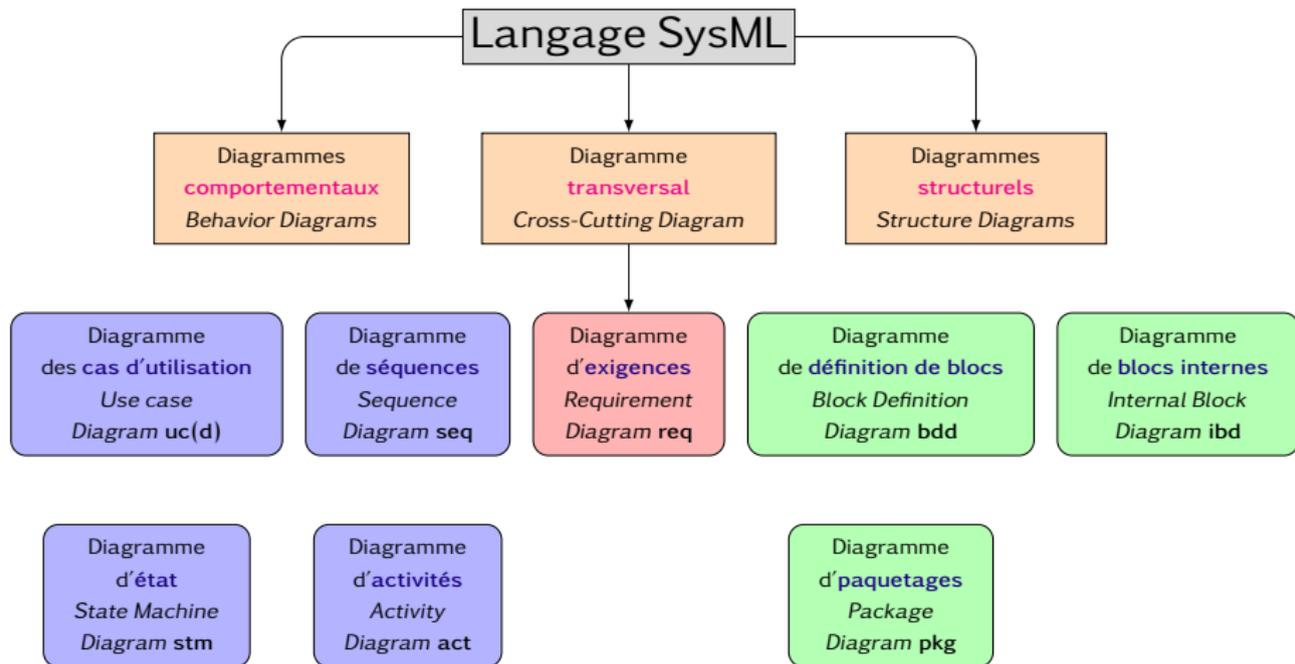


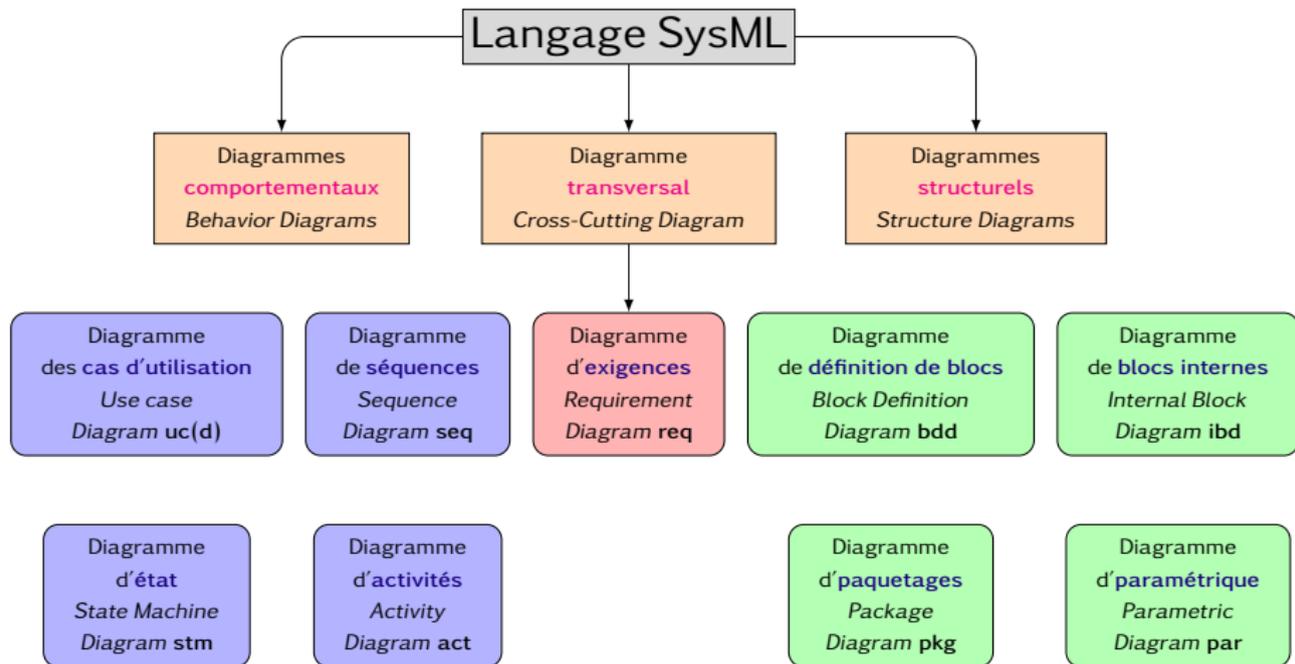


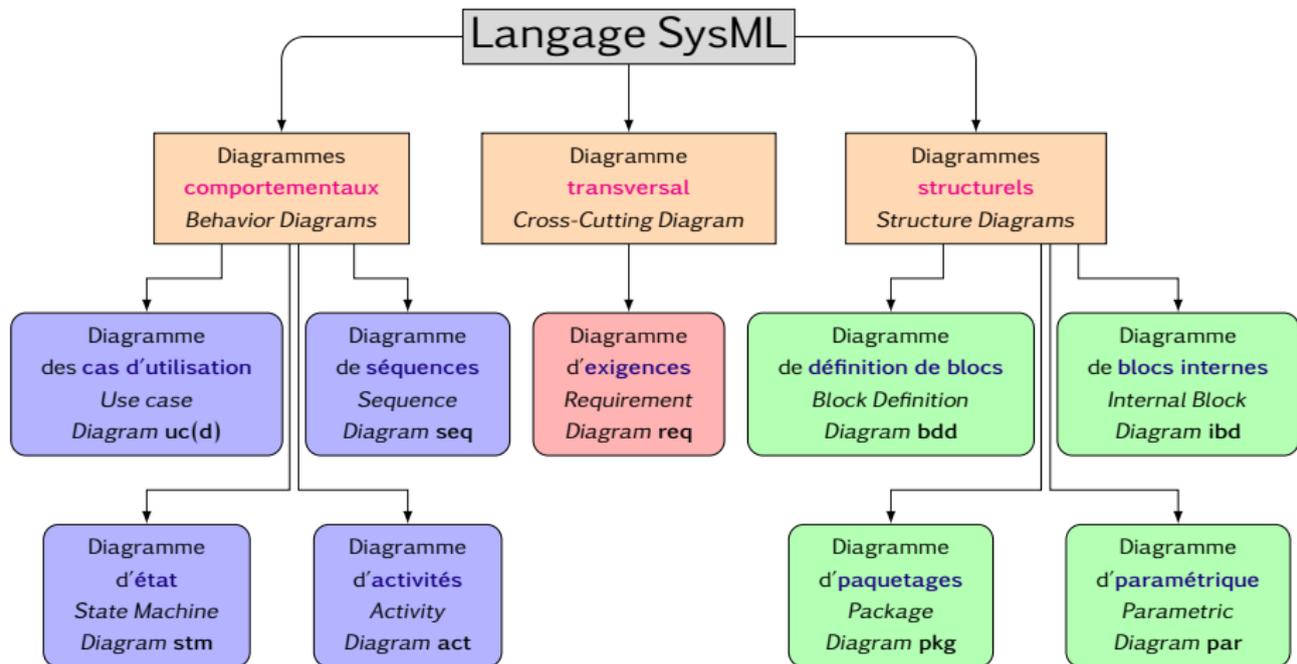


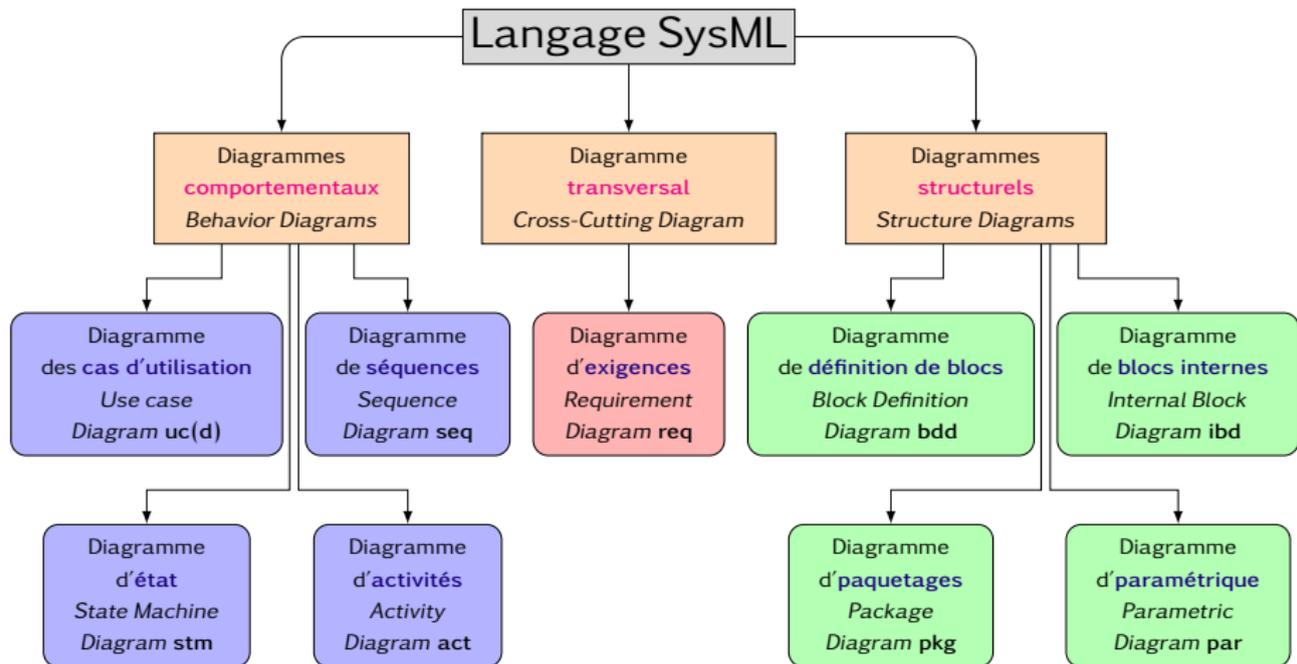












Ce n'est pas une méthode, il n'y a pas obligatoirement d'ordre dans l'établissement des diagrammes. Cependant, il y a tout de même une manière *naturelle* de procéder.

Grâce à la richesse de sa notation, le langage SysML permet :

Grâce à la richesse de sa notation, le langage SysML permet :

- l'expression des **besoins** et des **contraintes** ;

Grâce à la richesse de sa notation, le langage SysML permet :

- l'expression des **besoins** et des **contraintes** ;
- la représentation de l'**organisation structurée** des composants et leur définition précise ;

Grâce à la richesse de sa notation, le langage SysML permet :

- l'expression des **besoins** et des **contraintes** ;
- la représentation de l'**organisation structurée** des composants et leur définition précise ;
- la représentation des **modes de fonctionnement**, des processus internes et externes au système ainsi que les interactions avec son environnement.

Sa structure autorise également des analyses très intéressantes pour les concepteurs telles que :

Sa structure autorise également des analyses très intéressantes pour les concepteurs telles que :

- la facilitation de la **collaboration de tous les spécialistes** des corps de métier concernés, en proposant un ensemble lié d'**outils de représentation universels et expressifs**;

Sa structure autorise également des analyses très intéressantes pour les concepteurs telles que :

- la facilitation de la **collaboration de tous les spécialistes** des corps de métier concernés, en proposant un ensemble lié d'**outils de représentation universels et expressifs**;
- la réalisation de la **mise à jour**, du **stockage** et du **partage** ainsi que l'interprétation des informations issues des analyses des travaux des différents intervenants;

Sa structure autorise également des analyses très intéressantes pour les concepteurs telles que :

- la facilitation de la **collaboration de tous les spécialistes** des corps de métier concernés, en proposant un ensemble lié d'**outils de représentation universels et expressifs** ;
- la réalisation de la **mise à jour**, du **stockage** et du **partage** ainsi que l'interprétation des informations issues des analyses des travaux des différents intervenants ;
- l'**intégration** et la **mise en relation** des différentes composantes techniques, par exemple les liaisons entre un programme informatique et des actionneurs mécaniques ;

Sa structure autorise également des analyses très intéressantes pour les concepteurs telles que :

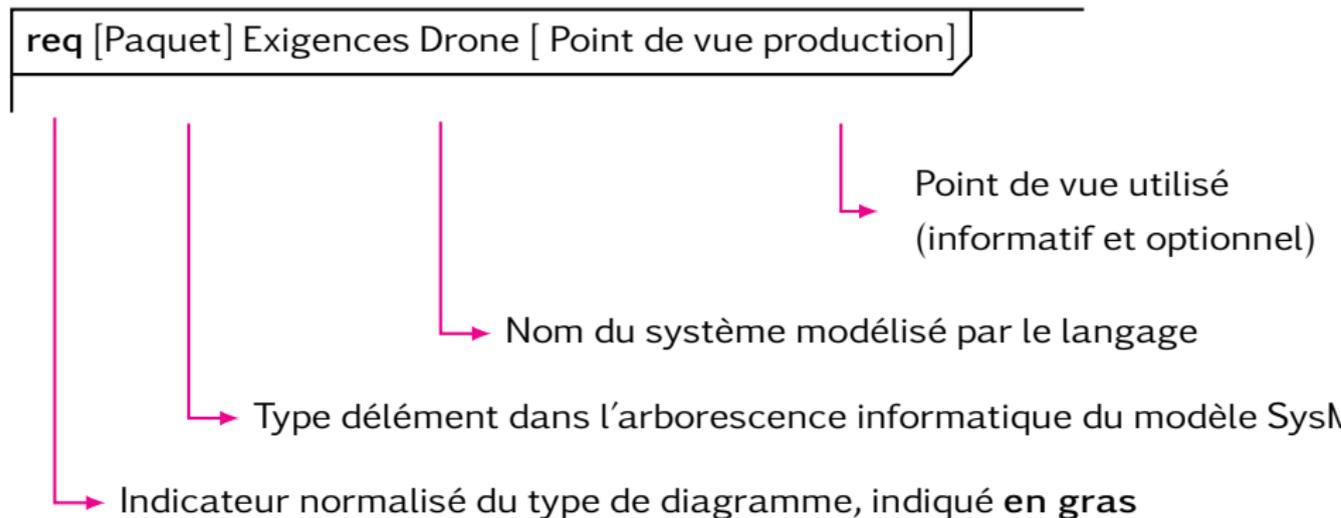
- la facilitation de la **collaboration de tous les spécialistes** des corps de métier concernés, en proposant un ensemble lié d'**outils de représentation universels et expressifs** ;
- la réalisation de la **mise à jour**, du **stockage** et du **partage** ainsi que l'interprétation des informations issues des analyses des travaux des différents intervenants ;
- l'**intégration** et la **mise en relation** des différentes composantes techniques, par exemple les liaisons entre un programme informatique et des actionneurs mécaniques ;
- la modélisation du système à toutes les étapes de son **cycle de développement** et dans sa **phase de vie** en représentant les éléments du modèle selon différents points de vue ;

Sa structure autorise également des analyses très intéressantes pour les concepteurs telles que :

- la facilitation de la **collaboration de tous les spécialistes** des corps de métier concernés, en proposant un ensemble lié d'**outils de représentation universels et expressifs** ;
- la réalisation de la **mise à jour**, du **stockage** et du **partage** ainsi que l'interprétation des informations issues des analyses des travaux des différents intervenants ;
- l'**intégration** et la **mise en relation** des différentes composantes techniques, par exemple les liaisons entre un programme informatique et des actionneurs mécaniques ;
- la modélisation du système à toutes les étapes de son **cycle de développement** et dans sa **phase de vie** en représentant les éléments du modèle selon différents points de vue ;
- la **validation des différentes solutions** par une ou plusieurs simulations basées sur les diagrammes d'états, d'activités et paramétrique présentés dans la suite.

## Cadre du 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.



Le type de diagramme, repéré par son identifiant (**req**, **bdd**, **ibd**, **pkg**, **par**, **uc**, **seq**, **stm**, **act**), est obligatoirement indiqué dans ce cartouche.

L'ajout des autres éléments est optionnel selon la norme mais les logiciels dédiés à la modélisation par ce langage ajoutent par défaut le type d'élément (bloc ou paquet par exemple) et proposent d'indiquer le nom du modèle mis en place et le point de vue utilisé.

## 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 rencontrées entre les formes géométriques dans les diagrammes SysML : le tableau suivant regroupe les liens les plus classiques .

## 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.

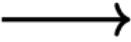
Plusieurs types de relations peuvent être rencontrées entre les formes géométriques dans les diagrammes SysML : le tableau suivant regroupe les liens les plus classiques .

(do NOT stress ! Le tableau n'est pas à savoir par cœur...)

Lien	Signification et commentaires

Lien	Signification et commentaires
	La relation de <b>contenance</b> (aussi appelée inclusion) permet de décomposer une exigence en plusieurs autres plus faciles ensuite à identifier lors de la mise en place du système ou des tests.

Lien	Signification et commentaires
	La relation de <b>contenance</b> (aussi appelée inclusion) 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).

Lien	Signification et commentaires
	<p>La relation de <b>contenance</b> (aussi appelée inclusion) permet de décomposer une exigence en plusieurs autres plus faciles ensuite à identifier lors de la mise en place du système ou des tests.</p>
	<p>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).</p>
	<p>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 :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• du cas d'utilisation global vers un cas d'utilisation partiel inclus avec le mot clé <b>include</b> pour l'<b>inclusion</b> ;</li> <li>• du cas d'utilisation partiel vers le cas d'utilisation global avec le mot clé <b>extend</b> pour l'<b>extension</b> ;</li> <li>• de l'exigence partielle vers l'exigence globale avec le mot clé <b>refine</b> pour l'ajout de précisions, par exemple des données quantitatives, pour le <b>raffinement</b> ;</li> <li>• de l'exigence partielle vers l'exigence globale avec le mot clé <b>deriveReq</b> pour <b>relier de manière dérivée</b> des exigences de niveaux différents, par exemple entre un système et certains de ses sous-systèmes.</li> </ul>

Lien	Signification et commentaires

Lien	Signification et commentaires
	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.

Lien	Signification et commentaires
	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 représenté par une flèche dont le losange plein est du côté du composé (ou système principal), l'autre extrémité du côté du composant.

Lien	Signification et commentaires
	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 représenté 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.

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Industries & Entreprises
- 3 Industrie 4.0
- 4 Cahier des Charges Fonctionnelles (CdCF)
- 5 Ingénierie Système
- 6 SysML
- 7 Analyse et description des systèmes à l'aide de SysML**
  - Support de l'étude : Sys-Reeduc - machine de rééducation
  - Besoin du client - Cahier des Charges
  - Diagramme de définition de blocs (bdd)
  - Notions de classes, instances et parties

# Support de l'étude : Sys-Reeduc - machine de rééducation



Fruit d'un projet régional entre le CReSTIC<sup>a</sup> de Reims et le CRITT-MDTS<sup>b</sup> de Charleville-Mézières, le Sys-Reeduc est un système permettant d'aider à la rééducation des membres inférieurs<sup>c</sup>.

Fruit d'un projet régional entre le CReSTIC<sup>a</sup> de Reims et le CRITT-MDTS<sup>b</sup> de Charleville-Mézières, le Sys-Reeduc est un système permettant d'aider à la rééducation des membres inférieurs<sup>c</sup>.

Le Sys-Reeduc est destiné à aider à la rééducation des membres inférieurs chez les patients ayant été victime d'un accident. Ce système permet une rééducation active, ce qui signifie que l'on cherche à renforcer les muscles et la coordination musculaire. Elle est réalisée en boucle fermée : le patient ne se laisse pas conduire par le système mais résiste au mouvement proposé par la machine.

---

a. Centre de Recherche en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication.

b. Centre Régional d'Innovation et de Transfert de Technologie.

c. merci à Xavier Pessoles pour le support

Les exercices en chaîne fermée permettent au patient de récupérer beaucoup plus rapidement. Le système Sys-Reeduc a l'avantage de proposer des exercices combinant la flexion de la jambe à la rotation du pied de manière à solliciter parfaitement les muscles souhaités.

Dans le cadre du fonctionnement du système, le kinésithérapeute peut aider à la rééducation des membres inférieurs du patient en agissant sur :

- la flexion - extension du genou ;
- la *vrille* de la cheville (rotation interne-externe).

Le système doit aussi permettre la flexion – extension de la cheville et s'adapter à la morphologie des patients. Enfin, pour des raisons de sécurité, le système ne doit pas blesser le patient.

# Besoin du client - Cahier des Charges

## Tableau des fonctions de service

Le système doit répondre (entre autres) aux exigences précisées dans les tableaux suivants : être résumés par les tableaux suivants:

- Tableau des fonctions de service

FS 1	Permettre au kinésithérapeute de rééduquer les membres inférieurs du patient
FS 2	S'adapter à la morphologie des patients
FS 3	Ne pas blesser le patient

# Besoin du client - Cahier des Charges

## Tableau de caractérisation des fonctions de service

Exigences	Critères	Niveaux
Permettre au kinésithérapeute de rééduquer les membres inférieurs du patient	Angle de rotation de la cuisse Effort du patient Écart de position Rapidité	De 0° à 150°  Jusqu'à 20 N. Nul $T_{5\%} < 0,2 \text{ s.}$
S'adapter à la morphologie des patients	Longueur de la cuisse et jambe Écartement du bassin Distance plat du pied – cheville	De 0,6 à 1,2 m.  370 à 600 mm.
Ne pas blesser le patient	Sécurité	Bloquer le fonctionnement en fonction de la taille du patient

## Autre support : Radio-réveil



# Diagramme de définition de blocs (bdd)

**OBJECTIF :** Décrire le système via des blocs (blocks dans le langage SysML) et représenter des éléments matériels (cas le plus fréquent) mais également des entités abstraites (regroupement logique d'éléments) ou des logiciels.

# Diagramme de définition de blocs (bdd)

**OBJECTIF :** Décrire le système via des blocs (blocks dans le langage SysML) et représenter des éléments matériels (cas le plus fréquent) mais également des entités abstraites (regroupement logique d'éléments) ou des logiciels.

Ce diagramme représente les caractéristiques principales de chaque bloc ainsi que les liens entre eux : il permet donc une modélisation de l'architecture du système. Graphiquement, un bloc est représenté par un rectangle avec le stéréotype `block` comprenant un titre et des compartiments étagés regroupant des propriétés particulières.

Les blocs peuvent être caractérisés par des propriétés : il en existe de plusieurs sortes mais les plus significatives sont :

- **La propriété de type value** qui permet d'exprimer une caractéristique quantifiable : pour un moteur par exemple, son couple, sa vitesse de rotation ou sa puissance nominales.

Les blocs peuvent être caractérisés par des propriétés : il en existe de plusieurs sortes mais les plus significatives sont :

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

&lt;&lt; block &gt;&gt;

**Motoréducteur à courant continu***constraints*

$$c_m = k_t \cdot i$$

$$J_{eq} \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = c_m - f \cdot \omega_m$$

$$u = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + k_e \cdot \omega_m$$

*parts*

Moteur CC : Moteur [1]

Réducteur planétaire : Réducteur [1]

*properties*

Couple nominal = 1 Nm

Vitesse nominale = 3000 rpm

*values*

$$f_{eq} = 7.10^{-5} \text{ Nm.s/rad}$$

$$J_{eq} = 6.10^{-6} \text{ Kg.m}^2$$

$$k_e = 0.02 \text{ V.s/rad}$$

$$k_t = 0.02 \text{ Nm/A}$$

$$L = 7.10^{-4} \text{ HR} = 5 \Omega$$

# Sys-Reeduc



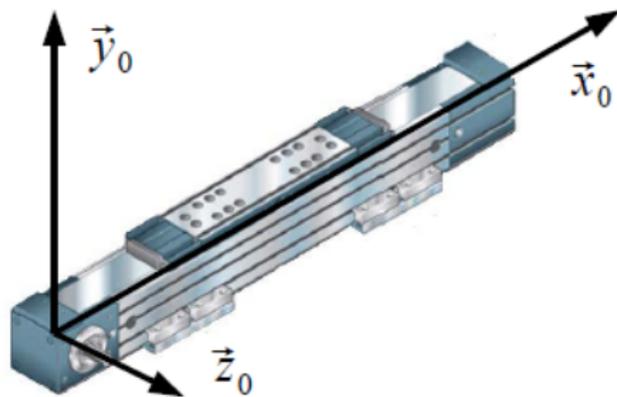
# Sys-Reeduc

Dans le cadre du système, le haut du corps du patient est supposé immobile. 2 chaînes fonctionnelles sont associées aux 2 mouvements réglables par le kinésithérapeute :

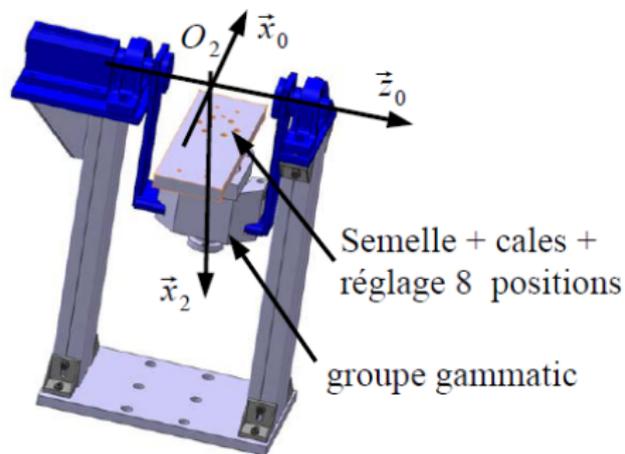
- la première chaîne fonctionnelle permet la flexion du genou, réalisée par la translation du support mobile 1 en utilisant une glissière de type Bosh-Rexroth
- la seconde chaîne fonctionnelle est assurée par le groupe gammatic et permet la rotation interne-externe du pied via le support 3.

Le support 2 permet la flexion de la cheville mais n'est pas motorisé.

# Sys-Reeduc



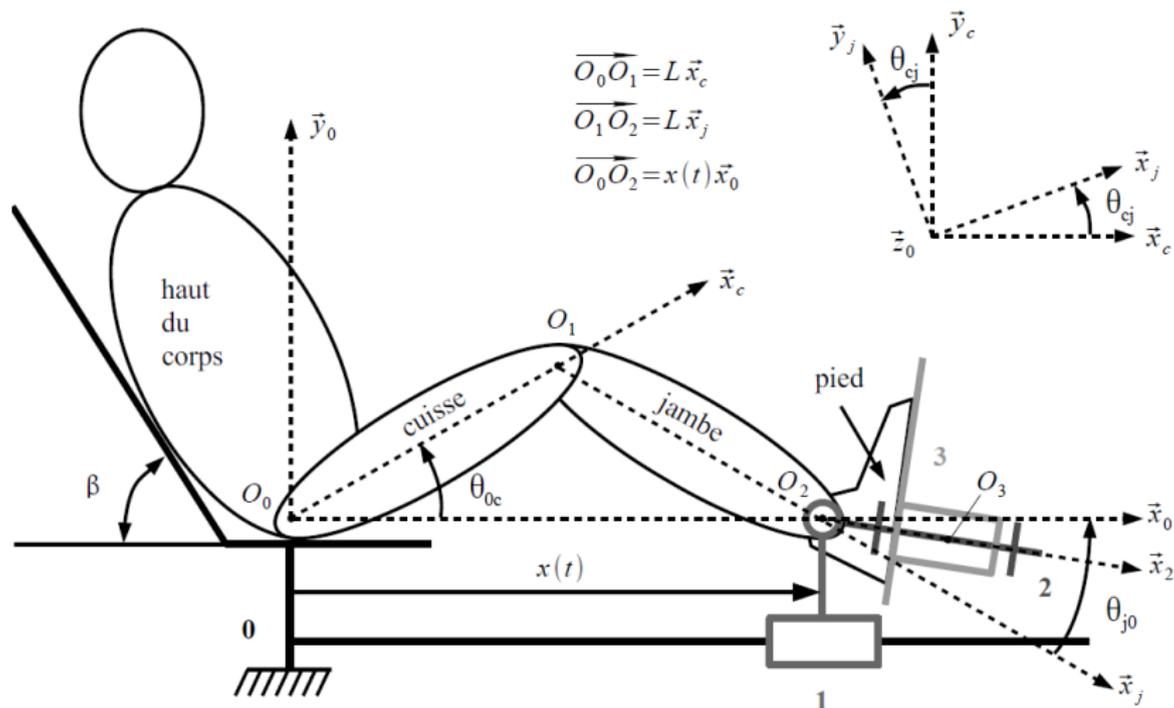
*Composant Bosh-Rexroth*



*Support de pied - Groupe gammatic*

# Sys-Reeduc

## Schéma du Sys-Reeduc



*Liaison glissière entre le bâti 0 et le support 1*

## Sys-Reeduc

La liaison glissière entre le support 1 et le bâti 0 est réalisée par le composant Bosh-Rexroth. Sa course est de 1,3 m.

Cette liaison est associée à un moteur et à un réducteur permettant d'assurer une translation à une vitesse maximale de 2 m/s.

Ces valeurs permettent de travailler avec un profil de rééducation à faible charge ou avec un profil de rééducation sportif.

Un dispositif poulie-courroie permet de transformer la rotation en sortie du réducteur en translation du plateau supérieur. Les deux modules linéaires sont montés sur des rails permettant d'ajuster leur écartement afin d'adapter le système à la morphologie de chaque utilisateur. Sa variation est comprise entre 370 et 600 mm.

La liaison entre les solides 1 et 2 est ajustable en profondeur (par un ensemble de cales) afin de pouvoir aligner positionner la cheville. Elle permet également le réglage de l'inclinaison du pied grâce à une tige de fixation à huit positions comprises entre  $-20^\circ$  et  $50^\circ$ . Enfin, une fixation, qui n'est pas présentée ici, permet de maintenir le pied en contact avec le support mobile.

La liaison entre 2 et 3 (groupe gammatic) est motorisée pour permettre la rotation interne-externe du pied. Ainsi, le pied repose sur une semelle mise en rotation par un moteur-réducteur. Celui-ci permet d'engendrer un couple maximal de 20 N.m pour une vitesse maximale de 10 tour/s.

Les fréquences de rotation des deux motoréducteurs (utilisés pour actionner les liaisons 0 - 1 et 2 -3) sont mesurées à l'aide de codeurs incrémentaux permettant ainsi la mesure du déplacement  $x(t)$  et de l'angle de rotation entre les solides 2 et 3.

Des capteurs de fin de course situés sur les axes permettent d'arrêter l'exercice en cas de problèmes liés à la commande (la position de ces capteurs est réglable pour s'adapter au patient).

Deux capteurs d'efforts tridimensionnels permettent de mesurer les forces et couples appliqués par le patient sur la machine.

Ils permettent :

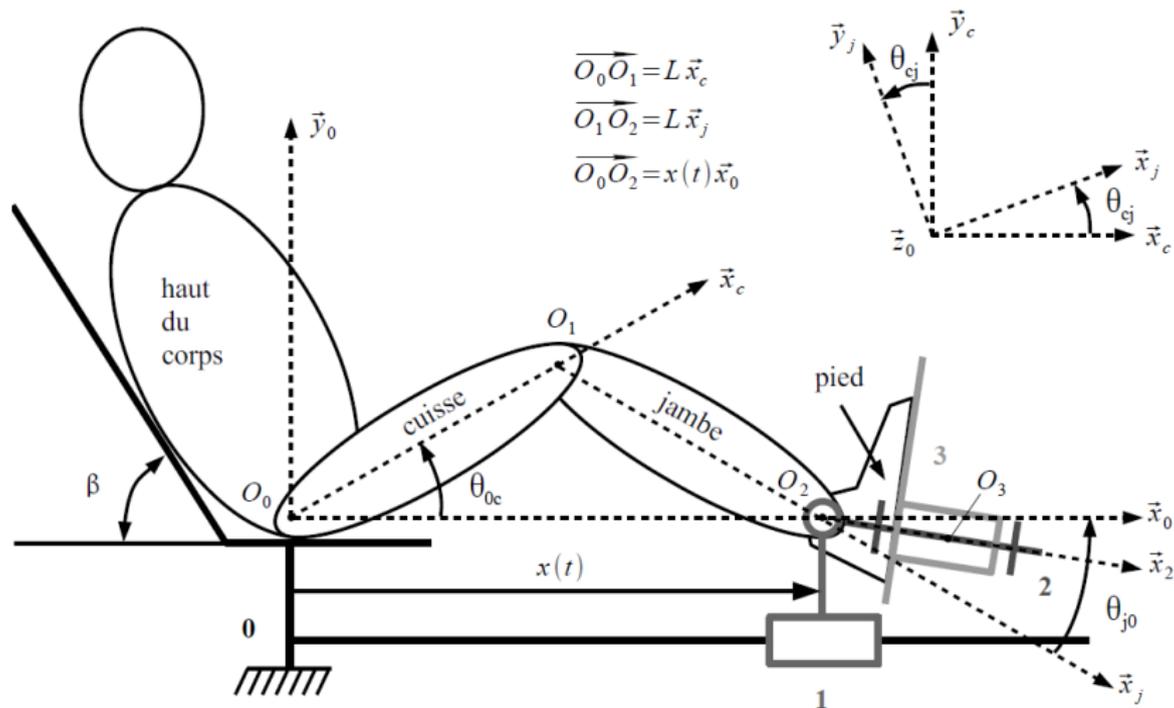
- d'évaluer l'efficacité, la performance et l'amélioration des aptitudes motrices ;
- de mesurer l'effort que le patient oppose au mouvement afin d'imposer un couple adapté sur les axes moteur.

Les moteurs sont alimentés par des variateurs électroniques pilotés par une carte de commande qui génère les lois de commande en fonction du retour des capteurs.

Le kinésithérapeute peut régler le système grâce à une interface homme/machine.

# Sys-Reeduc

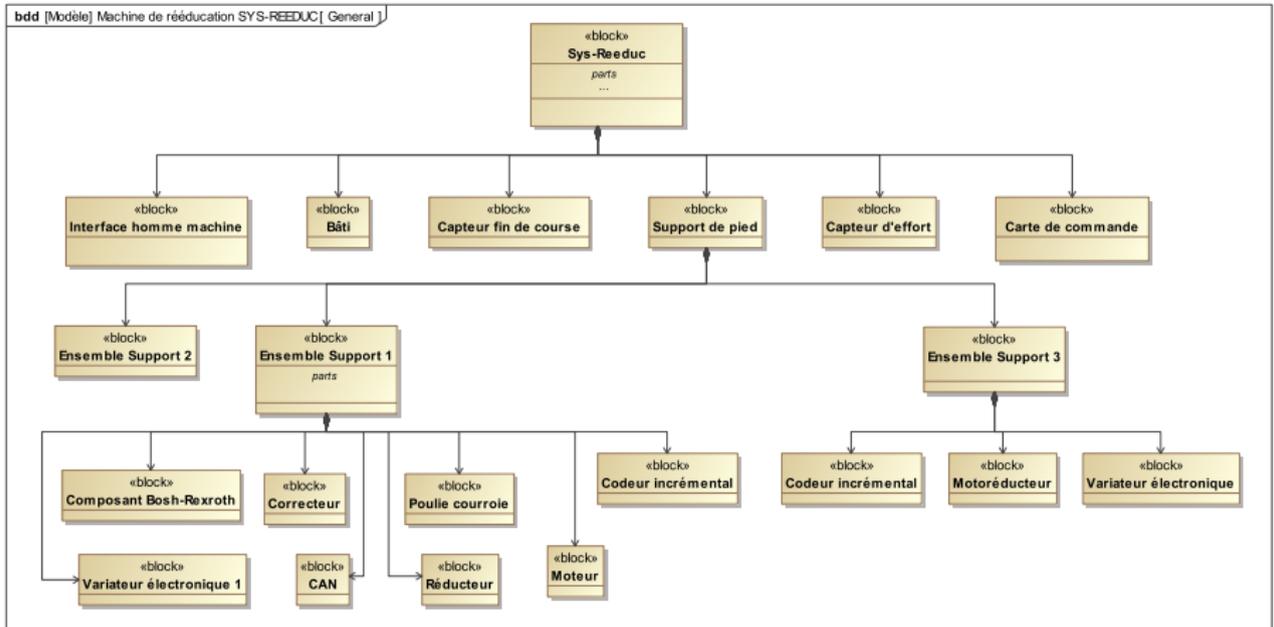
## Schéma du Sys-Reeduc



*Liaison glissière entre le bâti 0 et le support 1*

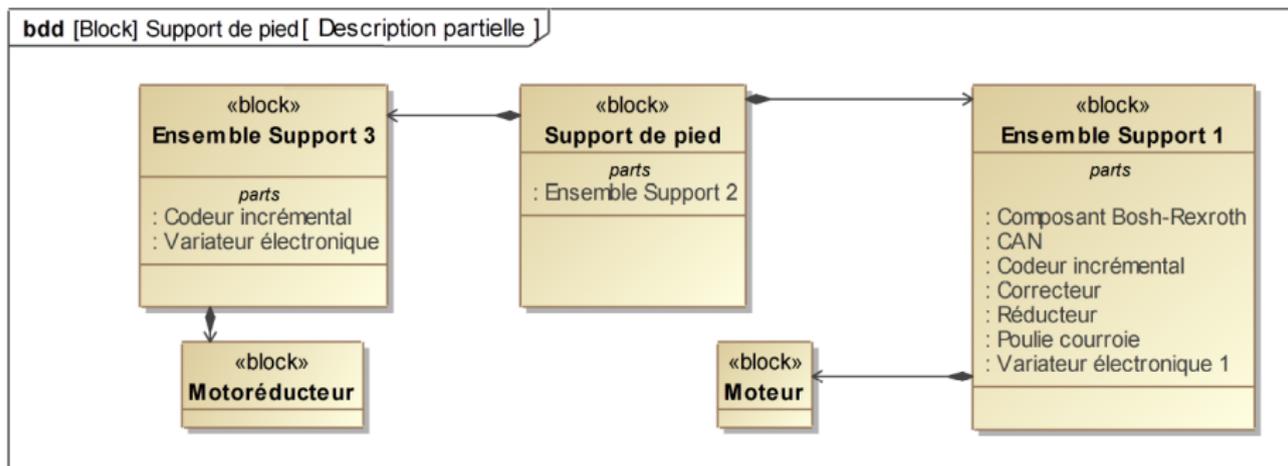
# Sys-Reeduc

## Vision globale



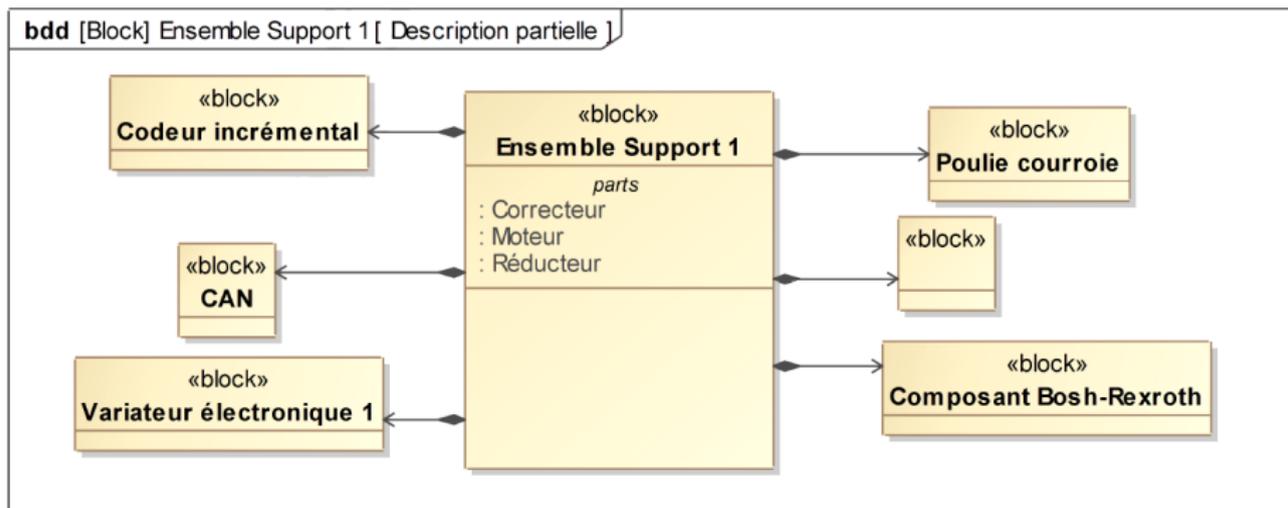
# Sys-Reeduc

## Support de pied



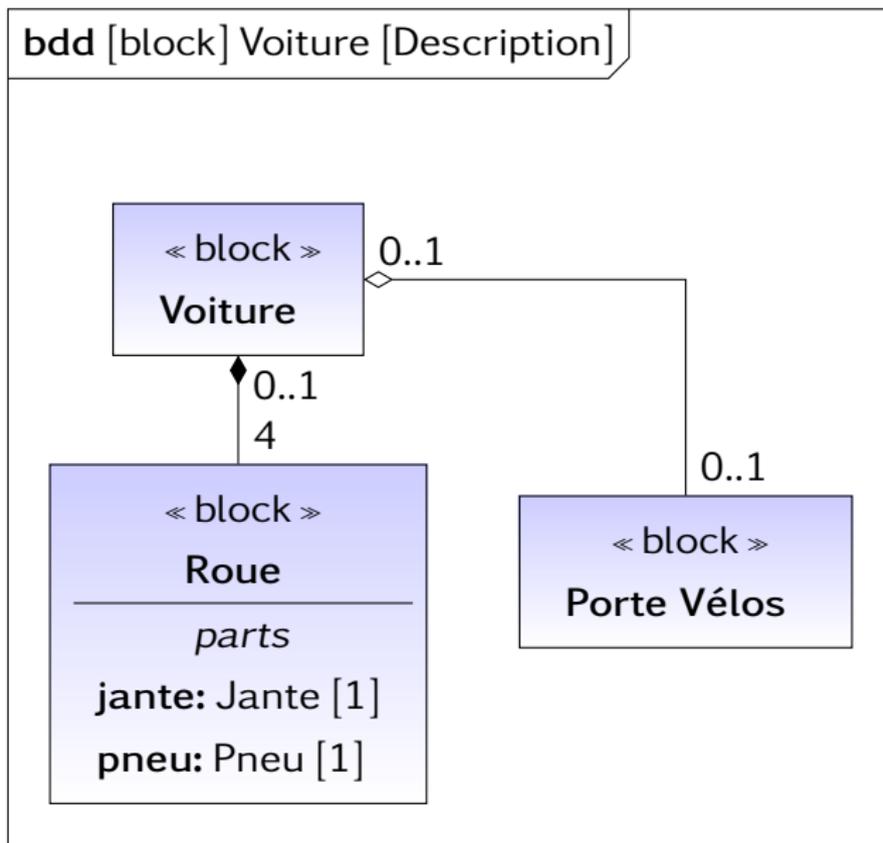
# Sys-Reeduc

## Ensemble support 1



Il est ensuite possible de relier les blocs au moyen de liens dont la sémantique dépend de la nature particulière de la relation.

Sur ces liens, il est possible de **préciser la multiplicité** d'un bloc en plaçant une valeur au bout du lien.



Prenons maintenant l'exemple d'une voiture. Le diagramme ci-contre se lit :

- une voiture est composée de 4 roues obligatoirement (**composition**) et éventuellement d'un porte vélo (**agrégation**)

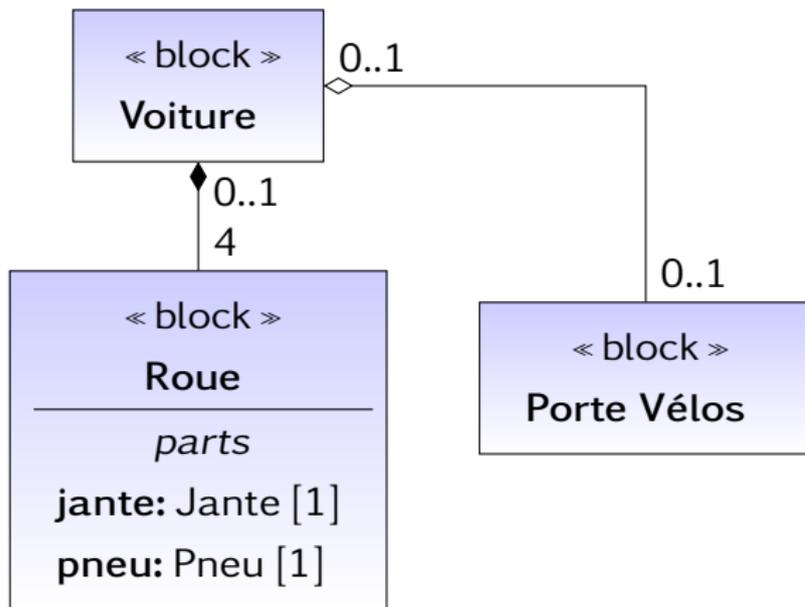
Prenons maintenant l'exemple d'une voiture. Le diagramme ci-contre se lit :

- une voiture est composée de 4 roues obligatoirement (**composition**) et éventuellement d'un porte vélo (**agrégation**)
- une roue est associée à 0 ou 1 voiture.

Prenons maintenant l'exemple d'une voiture. Le diagramme ci-contre se lit :

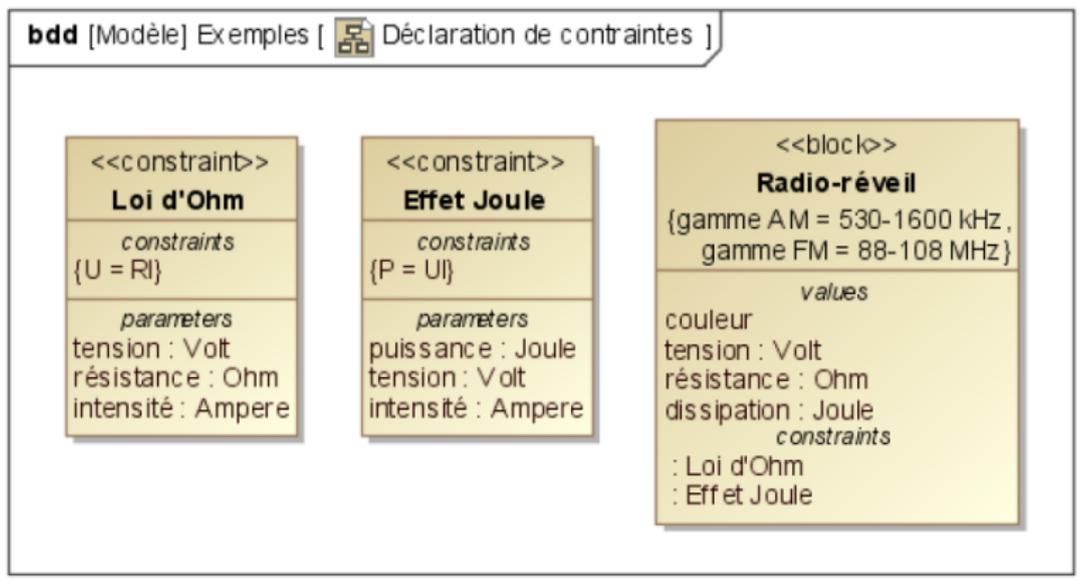
- une voiture est composée de 4 roues obligatoirement (**composition**) et éventuellement d'un porte vélo (**agrégation**)
- une roue est associée à 0 ou 1 voiture.
- un porte vélo est associé à 0 ou 1 voiture.

## bdd [block] Voiture [Description]

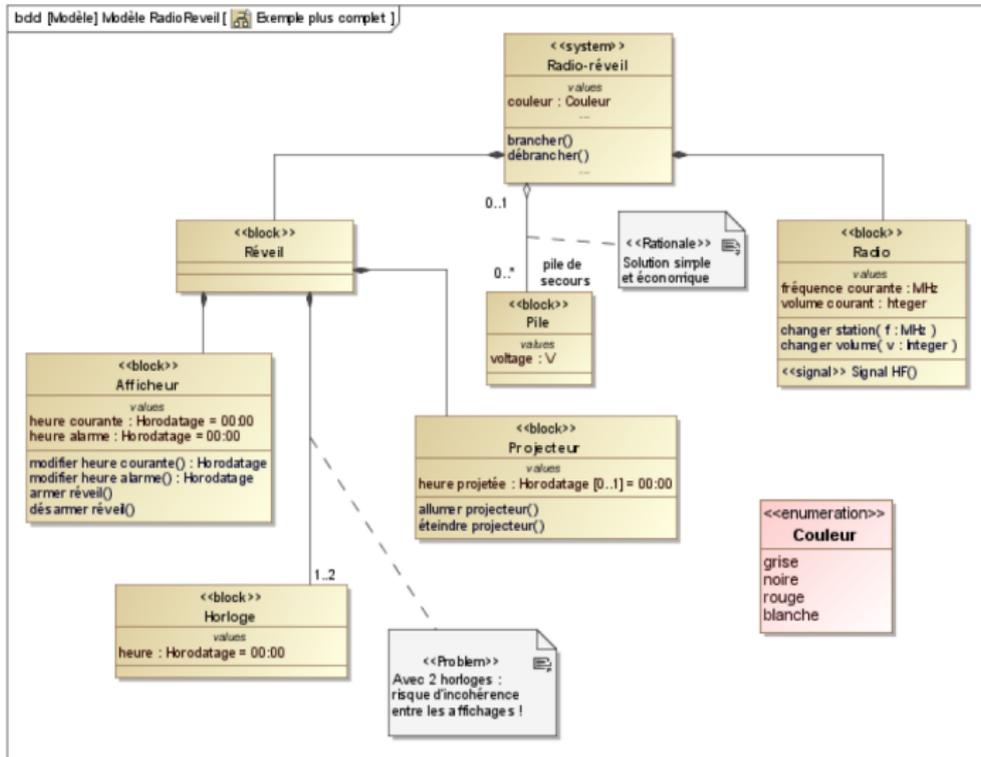


Nous noterons que le bloc `ijRoueiz` s'écrit au singulier, en effet, il s'agit de la classe `ijRoueiz`.

# Cas du radio-réveil



# Cas du radio-réveil



# Notions de classes, instances et parties

## DÉFINITION : Classe

*Entité abstraite ou un concept abstrait qui représente des éléments très variés*

# Notions de classes, instances et parties

## DÉFINITION : Classe

|| *Entité abstraite ou un concept abstrait qui représente des éléments très variés*

## DÉFINITION : Instance

|| *Concrétisation d'une classe*

# Notions de classes, instances et parties

## DÉFINITION : Classe

|| *Entité abstraite ou un concept abstrait qui représente des éléments très variés*

## DÉFINITION : Instance

|| *Concrétisation d'une classe*

Une classe permet donc de décrire un ensemble d'objets (ou instances de classe) ayant des caractéristiques communes. Les objets quant à eux possèdent un état et un comportement.

# Notions de classes, instances et parties

## DÉFINITION : Classe

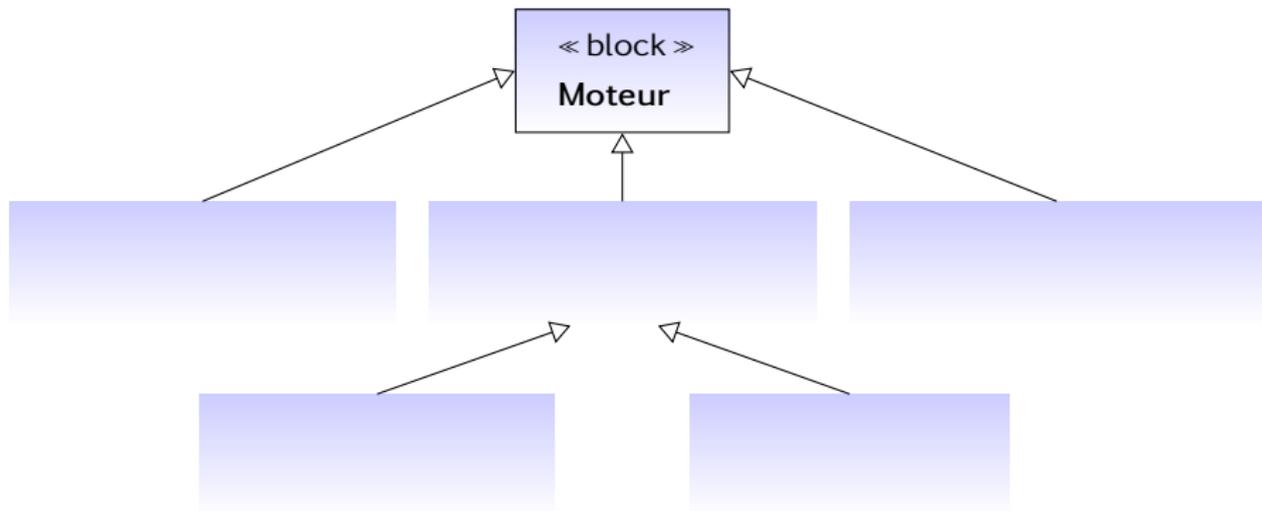
|| *Entité abstraite ou un concept abstrait qui représente des éléments très variés*

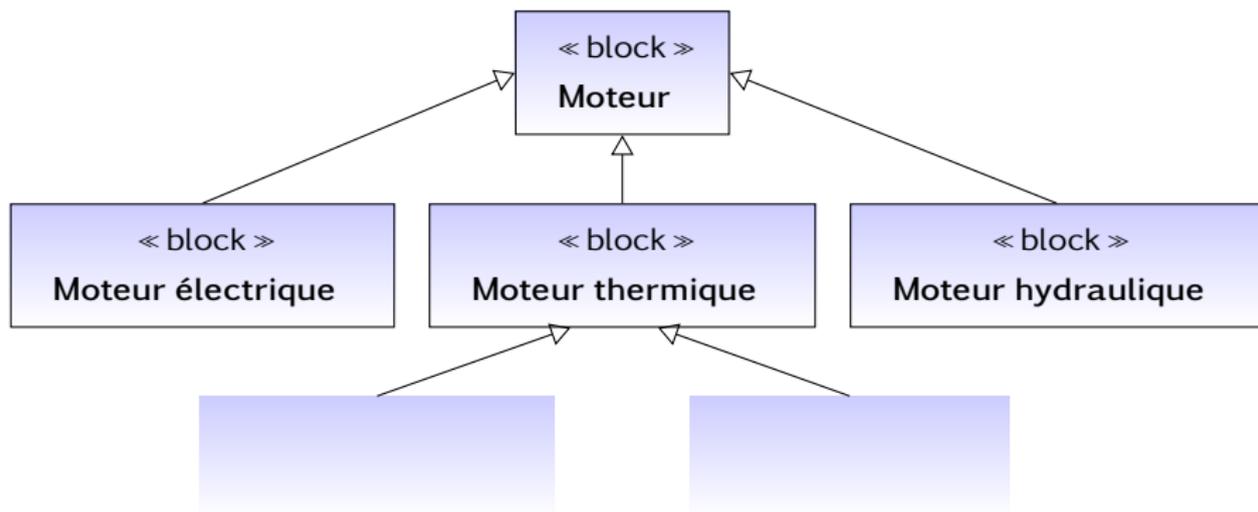
## DÉFINITION : Instance

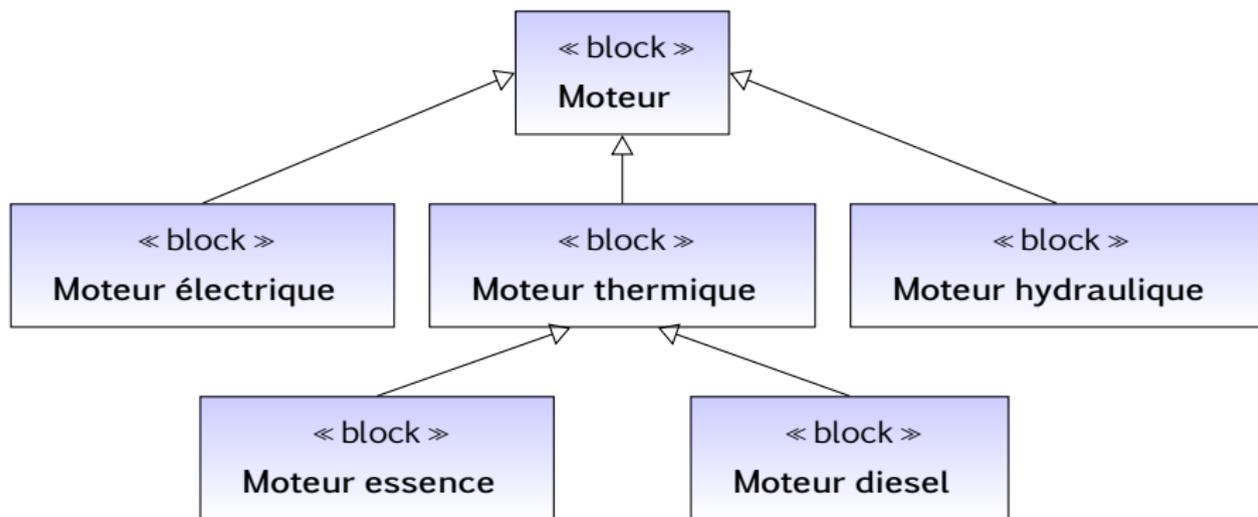
|| *Concrétisation d'une classe*

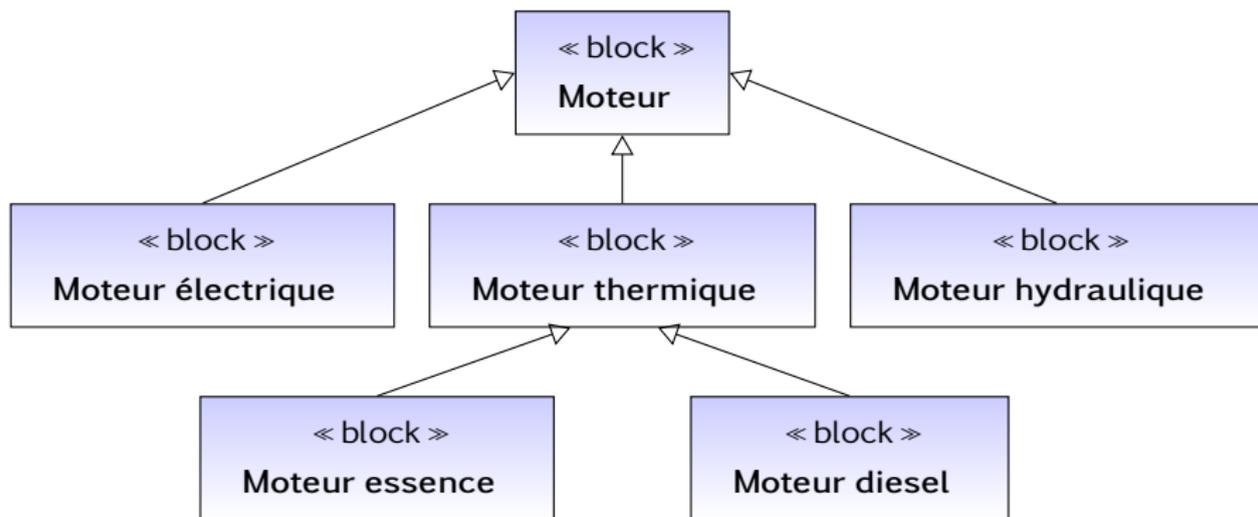
Une classe permet donc de décrire un ensemble d'objets (ou instances de classe) ayant des caractéristiques communes. Les objets quant à eux possèdent un état et un comportement.

Le but est souvent de factoriser des propriétés communes (valeurs, parties, etc.) à plusieurs blocs dans un bloc généralisé. Les blocs spécialisés **héritent** des propriétés du bloc généralisé et peuvent comporter des propriétés spécifiques supplémentaires.









## DÉFINITION : parties

*instances de bloc pouvant être listées dans un compartiment du bloc avec un format bien particulier :*

***nomp******partie*** : *nombloc* [*multiplicité*].

## DÉFINITION : parties

*instances de bloc pouvant être listées dans un compartiment du bloc avec un format bien particulier :*

***nompattie*** : nombloc [*multiplicité*].

Ce format est l'instanciation de la partie. Il est cependant fréquent de ne pas le respecter pour ne garder que le nombloc.

## Diagramme de contexte (pas d'identifiant)

**OBJECTIF :** Préciser, si possible de manière exhaustive, les acteurs et éléments environnants au système étudié. Il permet également de faire apparaître les différents acteurs ou éléments intervenant dans une exigence.

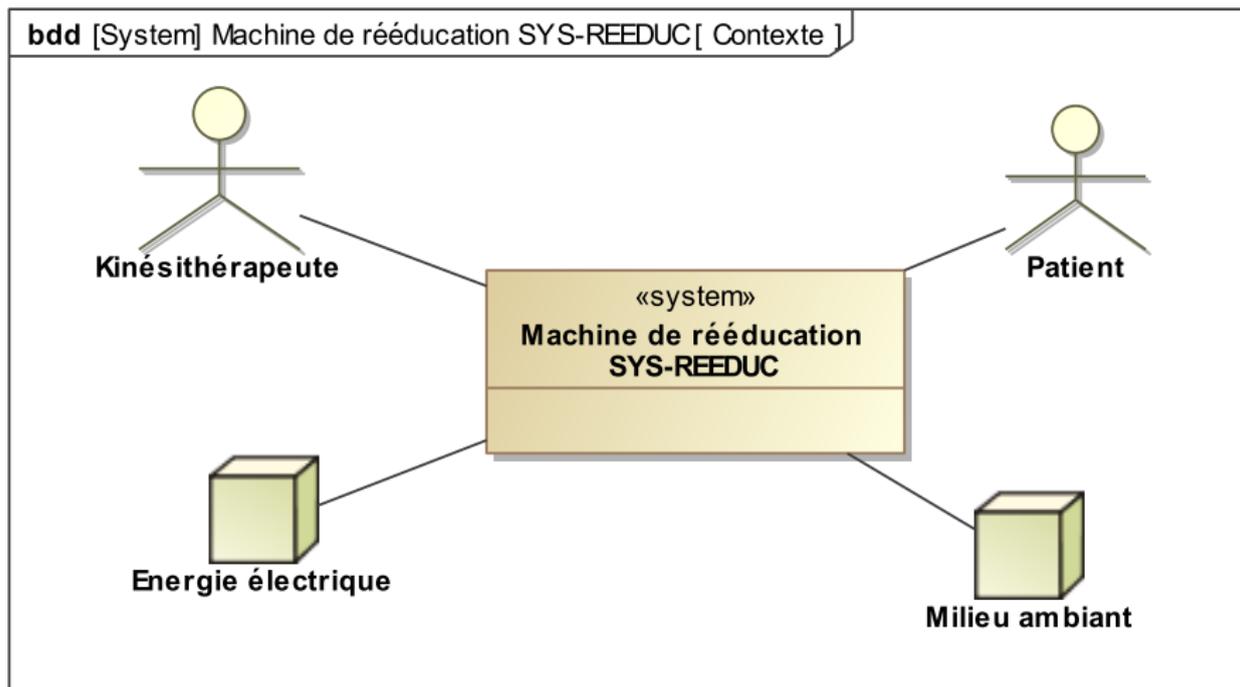
## Diagramme de contexte (pas d'identifiant)

**OBJECTIF :** Préciser, si possible de manière exhaustive, les acteurs et éléments environnants au système étudié. Il permet également de faire apparaître les différents acteurs ou éléments intervenant dans une exigence.

Le diagramme de contexte est une extension non normalisée du langage SysML qui permet de définir les frontières de l'étude et la phase du cycle de vie dans laquelle on situe l'étude (il s'agit généralement de la phase d'utilisation normale du système).

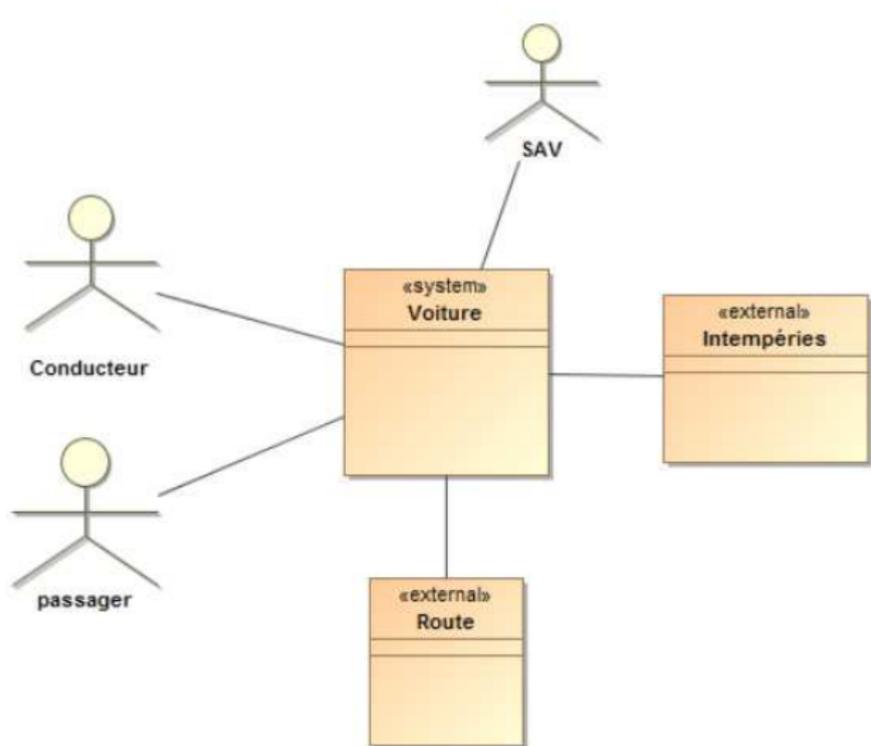
De par sa position d'extension, il n'y a absolument aucune recommandation spécifique sur la manière dont ce diagramme sera établi : classiquement, on utilise un diagramme de définition de blocs.

# Diagramme de contexte Sys-Reeduc



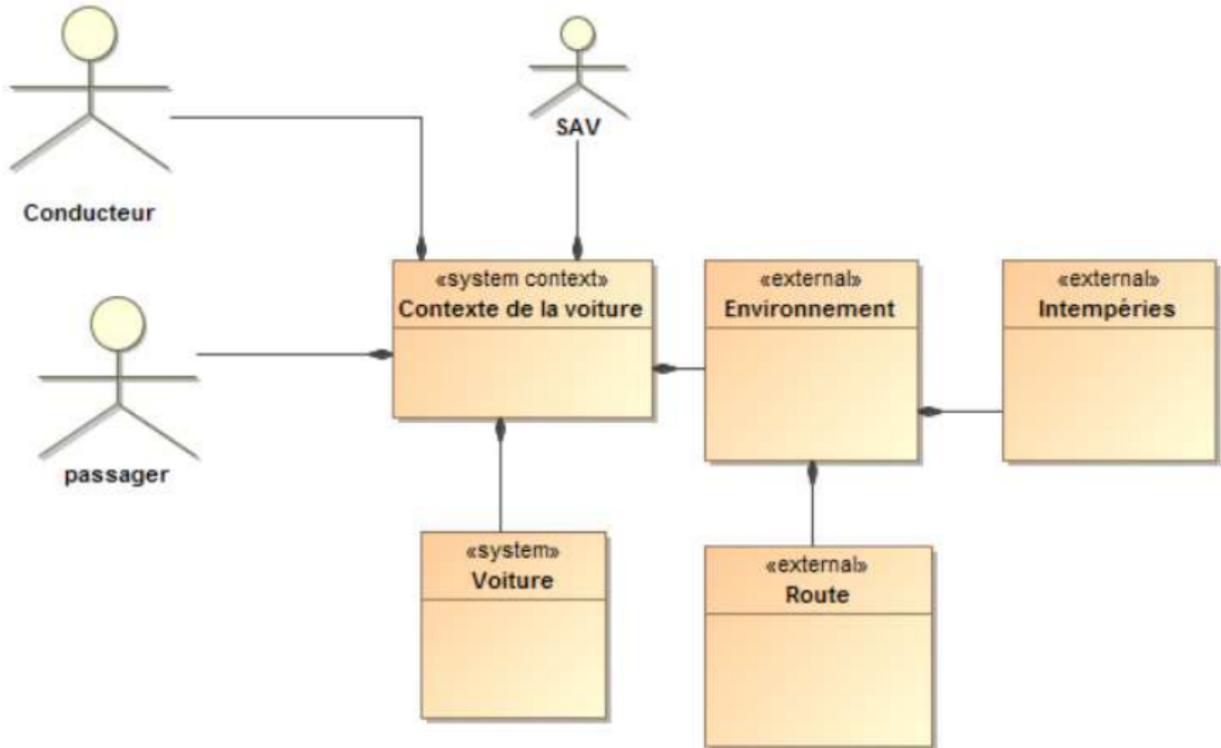
# Diagramme de contexte

## Représentation 1



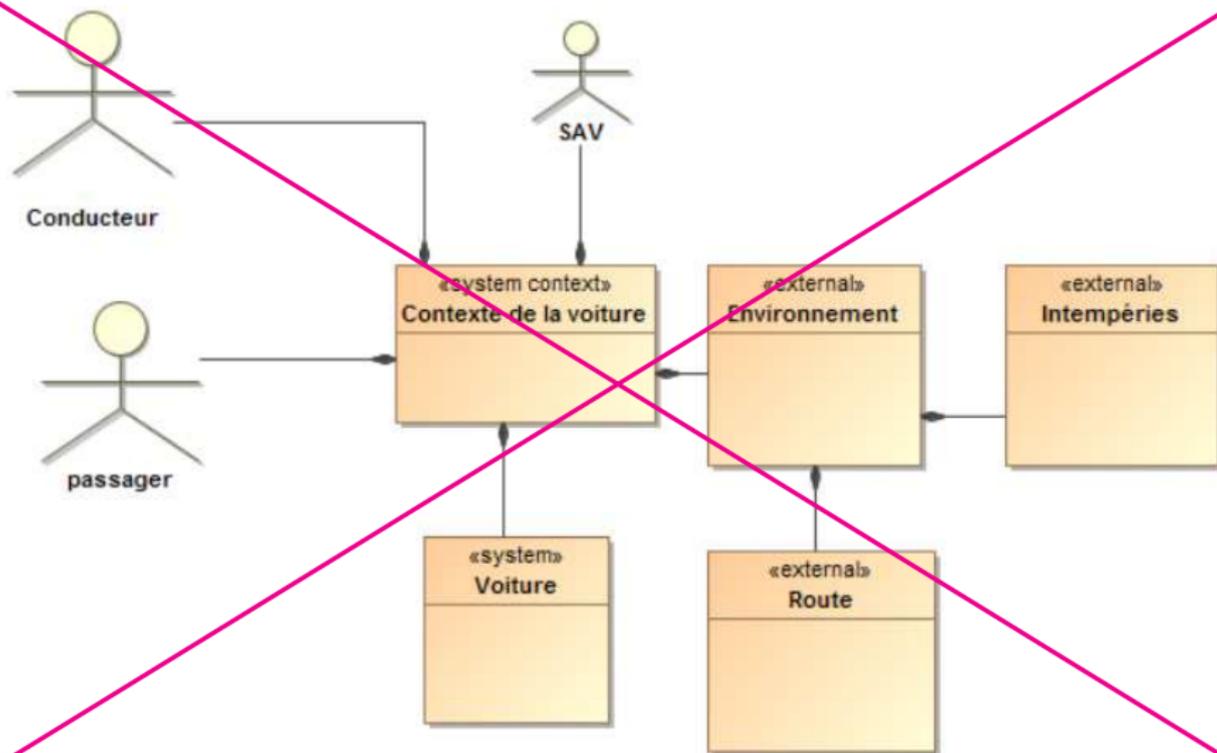
# Diagramme de contexte

## Représentation 2



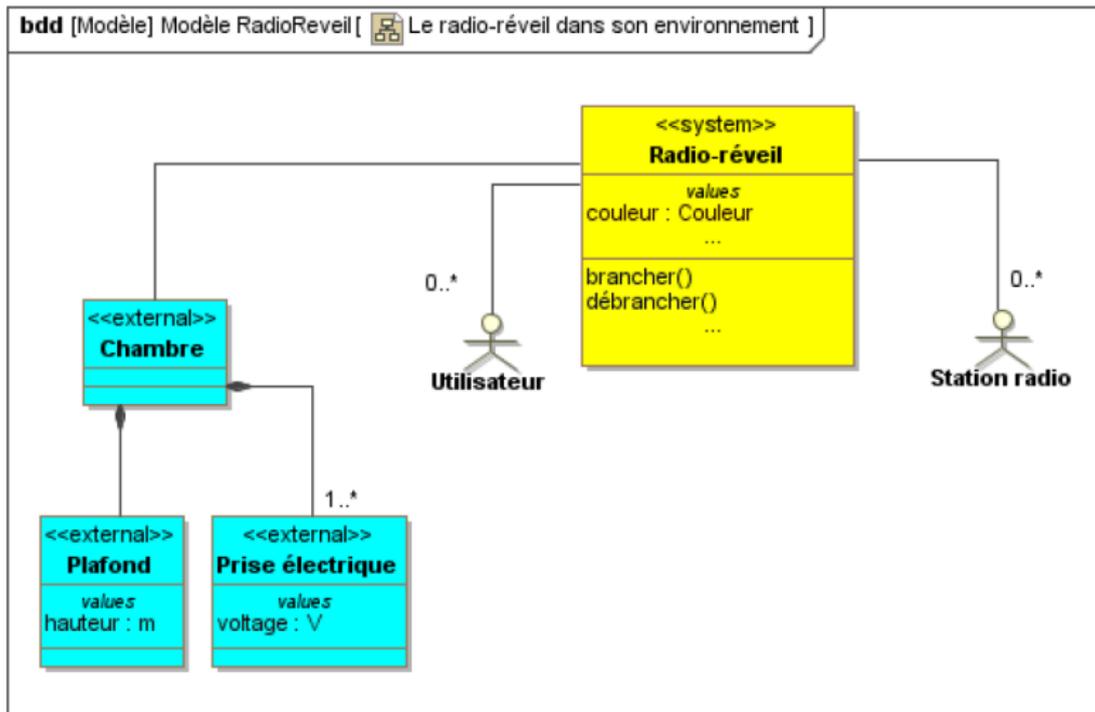
# Diagramme de contexte

## Représentation 2



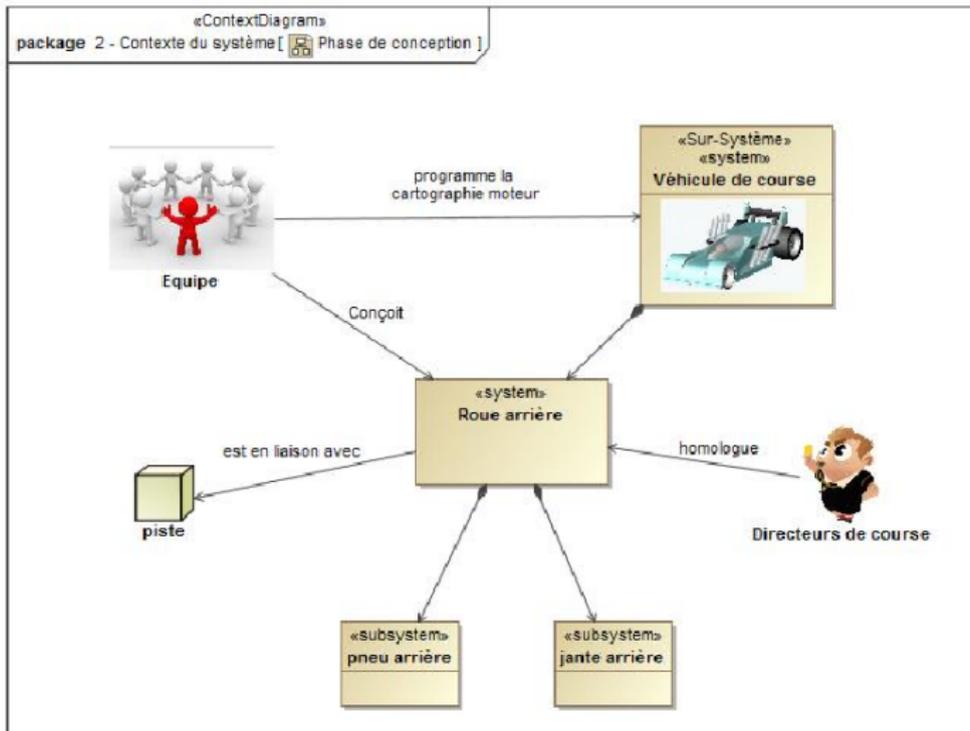
# Diagramme de contexte

## Radio réveil



# Diagramme de contexte

## Roue arrière d'un véhicule de course



# Diagramme des cas d'utilisation (uc)

**OBJECTIF :** Montrer les fonctionnalités offertes par un système en identifiant les services qu'il rend.

## DÉFINITION : Acteur

|| *Humain ou un autre système interagissant directement avec le système.*

Un acteur participe à au moins un cas d'utilisation. On distingue deux types d'acteurs :

# Diagramme des cas d'utilisation (uc)

**OBJECTIF :** Montrer les fonctionnalités offertes par un système en identifiant les services qu'il rend.

## DÉFINITION : Acteur

|| *Humain ou un autre système interagissant directement avec le système.*

Un acteur participe à au moins un cas d'utilisation. On distingue deux types d'acteurs :

- l'acteur principal : il est associé à la fonctionnalité principale du système qui justifie son existence, qui répond au besoin.

# Diagramme des cas d'utilisation (uc)

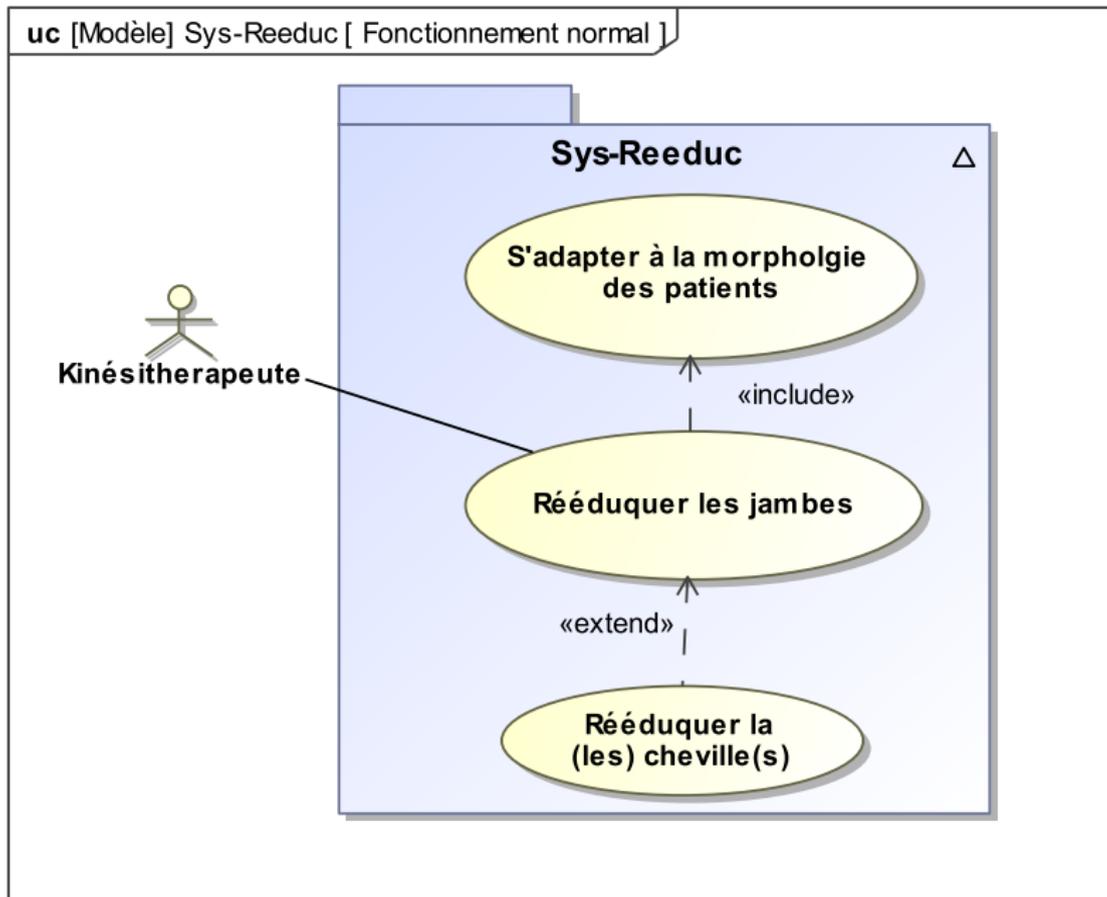
**OBJECTIF :** Montrer les fonctionnalités offertes par un système en identifiant les services qu'il rend.

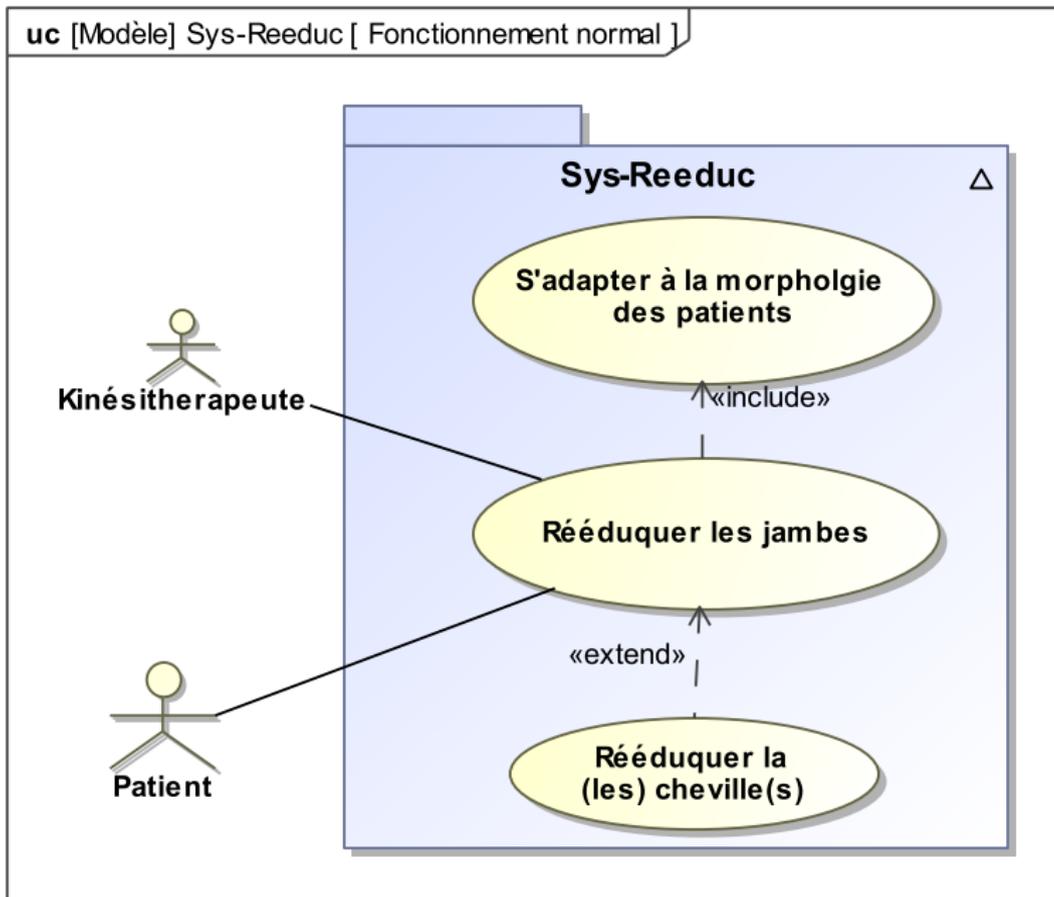
## DÉFINITION : Acteur

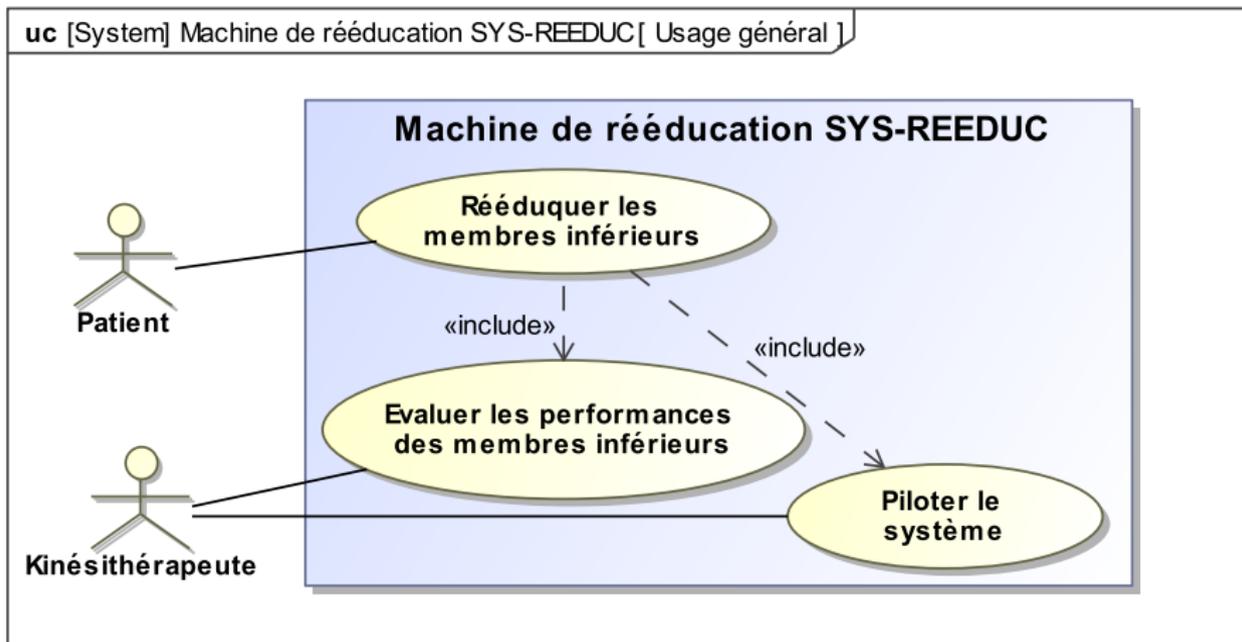
|| *Humain ou un autre système interagissant directement avec le système.*

Un acteur participe à au moins un cas d'utilisation. On distingue deux types d'acteurs :

- l'acteur principal : il est associé à la fonctionnalité principale du système qui justifie son existence, qui répond au besoin.
- l'acteur secondaire : il est associé à des fonctionnalités complémentaires.







Dans la pratique, les **acteurs principaux** sont placés sur la **gauche** du diagramme et les **acteurs secondaires** sur la **droite**.

Les fonctionnalités d'un système correspondent à des cas d'utilisation, c'est-à-dire à des services rendus par le système. Il n'apparaîtra donc pas ce qui ne peut être fait par des acteurs extérieurs.

Dans la pratique, les **acteurs principaux** sont placés sur la **gauche** du diagramme et les **acteurs secondaires** sur la **droite**.

Les fonctionnalités d'un système correspondent à des cas d'utilisation, c'est-à-dire à des services rendus par le système. Il n'apparaîtra donc pas ce qui ne peut être fait par des acteurs extérieurs.

Ainsi, par exemple, le lavage, la recharge, le recyclage, la réparation, etc. ne doivent pas apparaître si le système n'a pas été développé expressément pour cela.

Dans la pratique, les **acteurs principaux** sont placés sur la **gauche** du diagramme et les **acteurs secondaires** sur la **droite**.

Les fonctionnalités d'un système correspondent à des cas d'utilisation, c'est-à-dire à des services rendus par le système. Il n'apparaîtra donc pas ce qui ne peut être fait par des acteurs extérieurs.

Ainsi, par exemple, le lavage, la recharge, le recyclage, la réparation, etc. ne doivent pas apparaître si le système n'a pas été développé expressément pour cela.

### DÉFINITION : Frontière d'un système

*Représentée par un cadre. Le nom du système figure à l'intérieur du cadre, en haut. Les acteurs sont à l'extérieur et les cas d'utilisation à l'intérieur.*

Pour affiner le diagramme de cas d'utilisation, SysML définit trois types de relations standardisées entre cas d'utilisation :

- une relation d'**inclusion**, formalisée par le mot-clé **include**  
    « include »  
    ----->: le cas d'utilisation de base en incorpore explicitement un autre, de façon obligatoire.

Pour affiner le diagramme de cas d'utilisation, SysML définit trois types de relations standardisées entre cas d'utilisation :

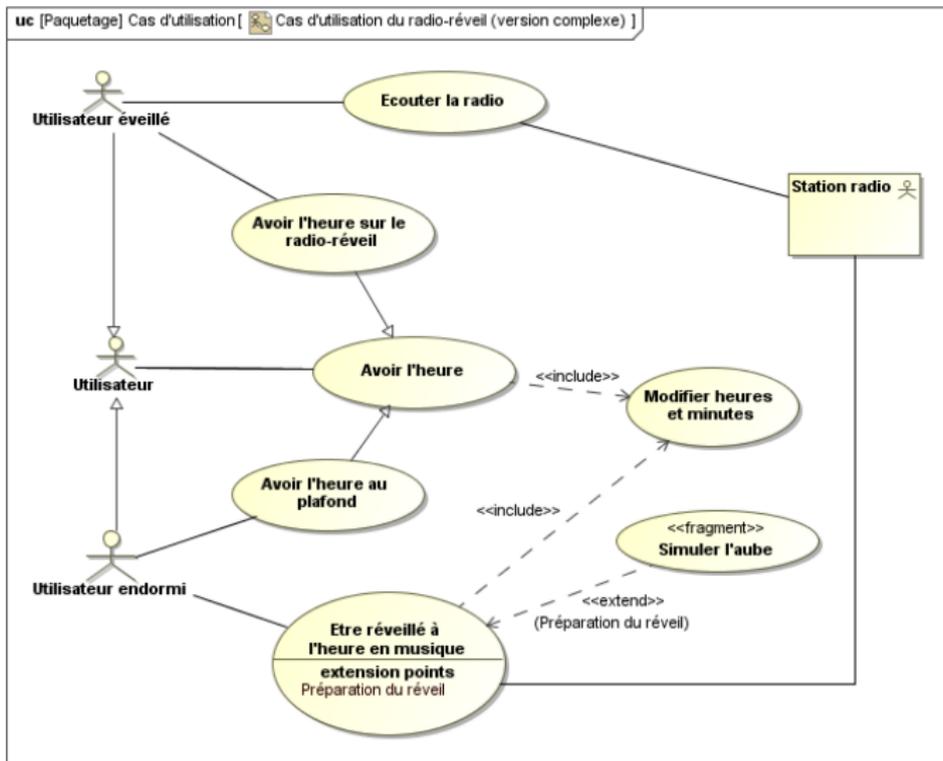
- une relation d'**inclusion**, formalisée par le mot-clé **include**  
« include »  
----->: le cas d'utilisation de base en incorpore explicitement un autre, de façon obligatoire.
- une relation d'**extension**, formalisée par le mot-clé **extend**  
« extend »  
----->: le cas d'utilisation de base en incorpore implicitement un autre, de façon optionnelle, à un endroit spécifié indirectement dans celui qui procède à l'extension (appelé extension point).

Pour affiner le diagramme de cas d'utilisation, SysML définit trois types de relations standardisées entre cas d'utilisation :

- une relation d'**inclusion**, formalisée par le mot-clé **include**  
« include »  
----->: le cas d'utilisation de base en incorpore explicitement un autre, de façon obligatoire.
- une relation d'**extension**, formalisée par le mot-clé **extend**  
« extend »  
----->: le cas d'utilisation de base en incorpore implicitement un autre, de façon optionnelle, à un endroit spécifié indirectement dans celui qui procède à l'extension (appelé extension point).
- une relation de **généralisation/spécialisation** \_\_\_\_\_>: les cas d'utilisation descendants héritent la description de leur parent commun. Chacun d'entre eux peut néanmoins comprendre des interactions spécifiques supplémentaires.

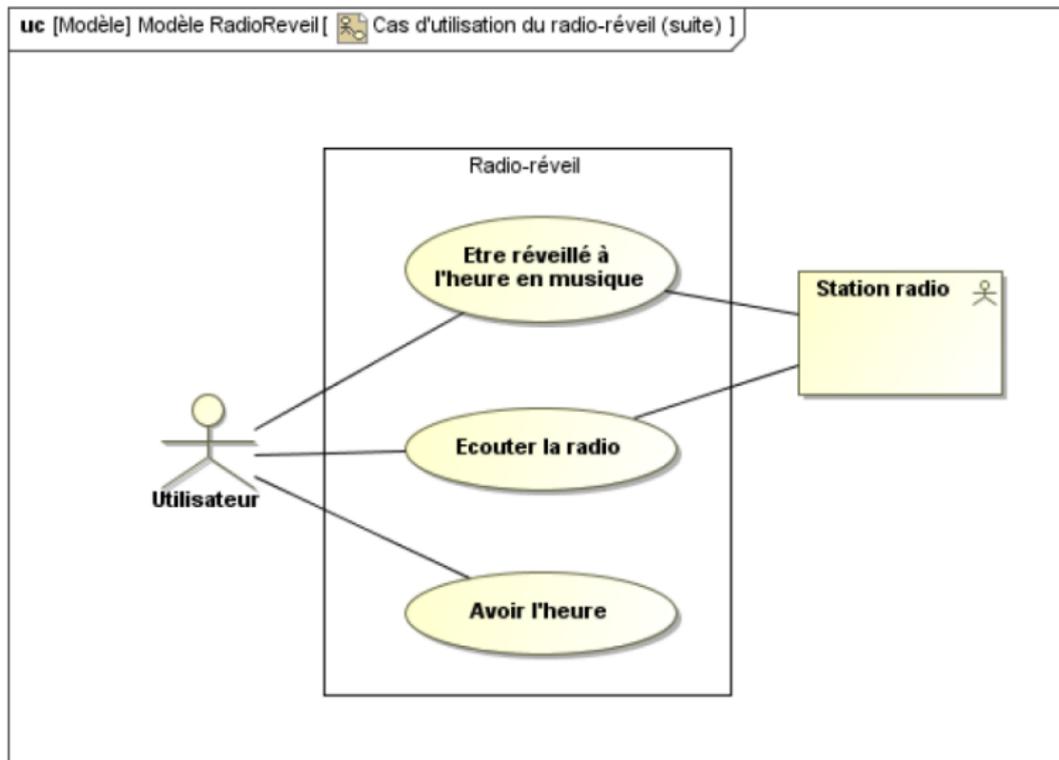
# diagramme de cas d'utilisation (uc) Radio-réveil

Trop chargé

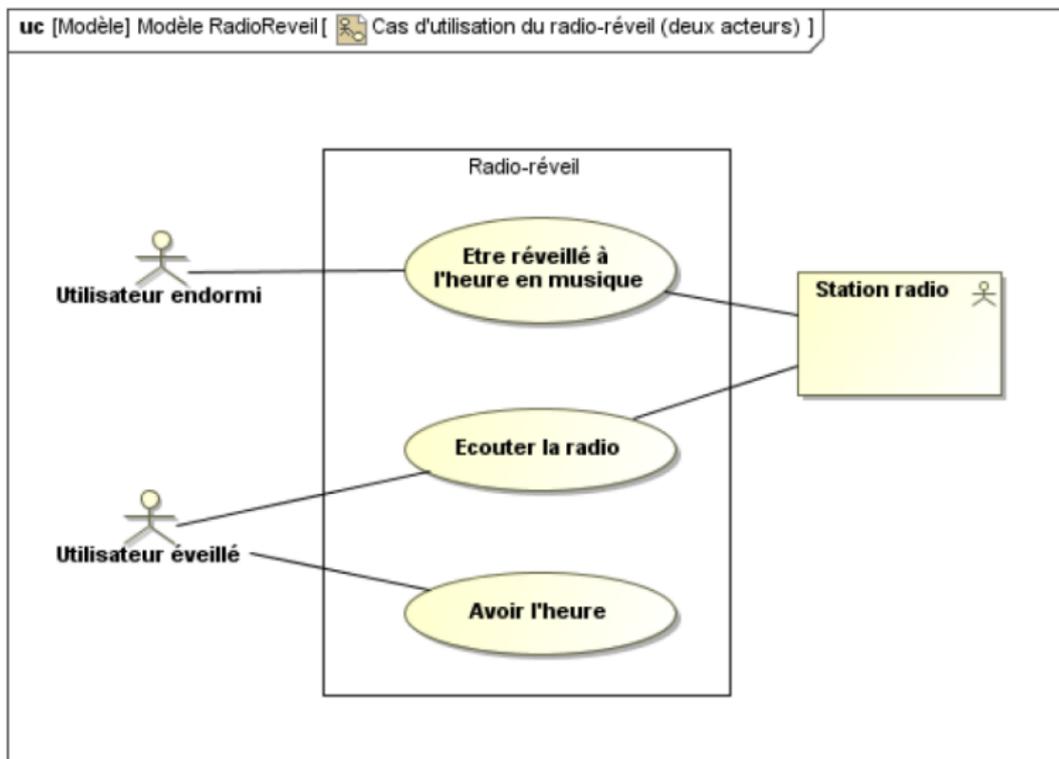


# diagramme de cas d'utilisation (uc) Radio-réveil

Un pour chaque cas utilisation



# diagramme de cas d'utilisation (uc) Radio-réveil



# Diagramme des exigences (req)

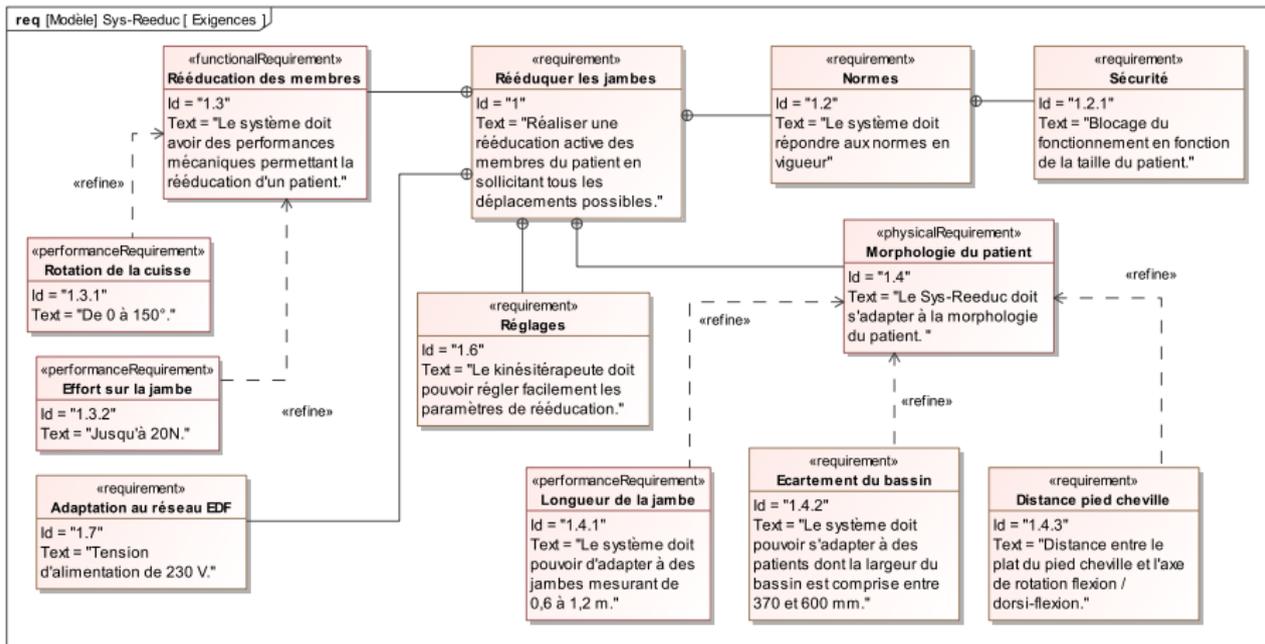
**OBJECTIF :** Modéliser les exigences devant être vérifiées par le système en liant les solutions mises en œuvre sur le système avec les besoins définis dans le cahier des charges. Ce diagramme traduit, par des fonctionnalités ou des contraintes, ce qui doit être satisfait par le système.

# Diagramme des exigences (req)

**OBJECTIF :** Modéliser les exigences devant être vérifiées par le système en liant les solutions mises en œuvre sur le système avec les besoins définis dans le cahier des charges. Ce diagramme traduit, par des fonctionnalités ou des contraintes, ce qui doit être satisfait par le système.

De nombreux domaines peuvent être couverts, les plus classiques étant les exigences environnementales, économiques, fonctionnelles ou techniques.

# Diagramme d'exigences



Les éléments graphiques utilisés dans ce diagramme sont principalement des rectangles avec un titre représentant les exigences, un identifiant sous forme de numéro et une description textuelle libre mais concise.

Il est possible, mais non obligatoire, de relier les exigences entre elles par des liens. Distinguons alors :

Les éléments graphiques utilisés dans ce diagramme sont principalement des rectangles avec un titre représentant les exigences, un identifiant sous forme de numéro et une description textuelle libre mais concise.

Il est possible, mais non obligatoire, de relier les exigences entre elles par des liens. Distinguons alors :

- **la contenance** -----⊕: Permet de **décomposer** une exigence composite en plusieurs exigences unitaires, plus faciles ensuite à tracer vis-à-vis du système.

Les éléments graphiques utilisés dans ce diagramme sont principalement des rectangles avec un titre représentant les exigences, un identifiant sous forme de numéro et une description textuelle libre mais concise.

Il est possible, mais non obligatoire, de relier les exigences entre elles par des liens. Distinguons alors :

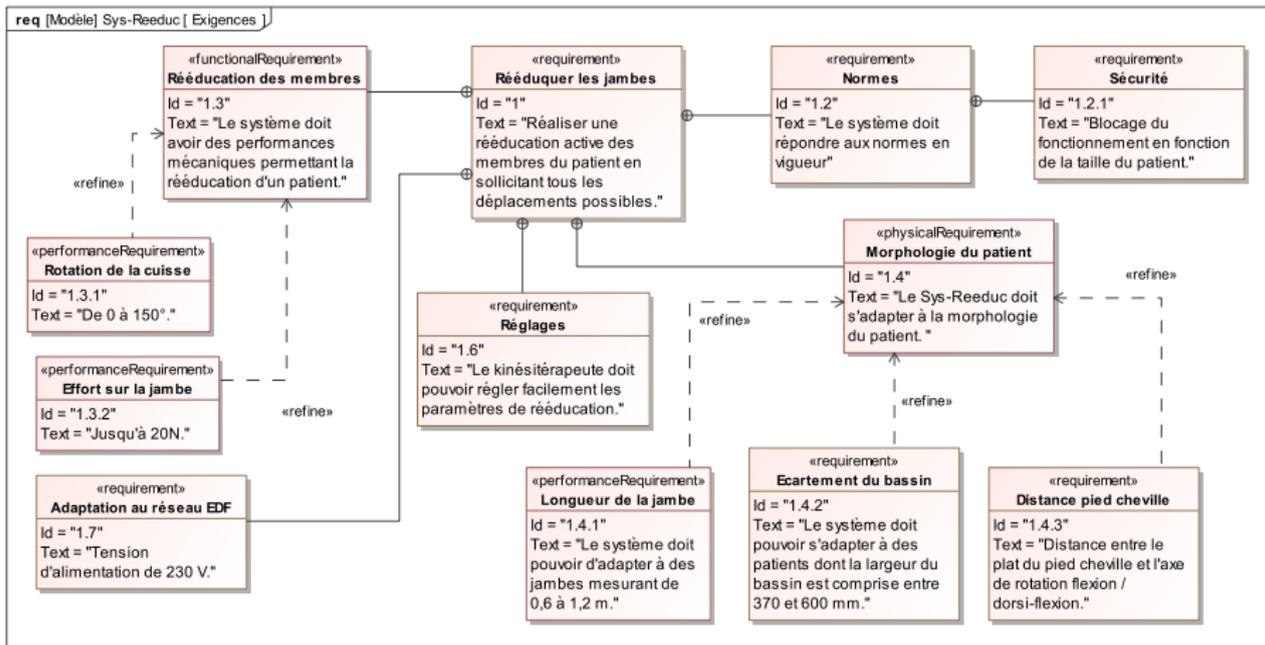
- **la contenance** -----⊕: Permet de **décomposer** une exigence composite en plusieurs exigences unitaires, plus faciles ensuite à tracer vis-à-vis du système.
- **le raffinement** -----« refine »: Permet d'**ajouter de la précision**, par exemple des données quantitatives.

Les éléments graphiques utilisés dans ce diagramme sont principalement des rectangles avec un titre représentant les exigences, un identifiant sous forme de numéro et une description textuelle libre mais concise.

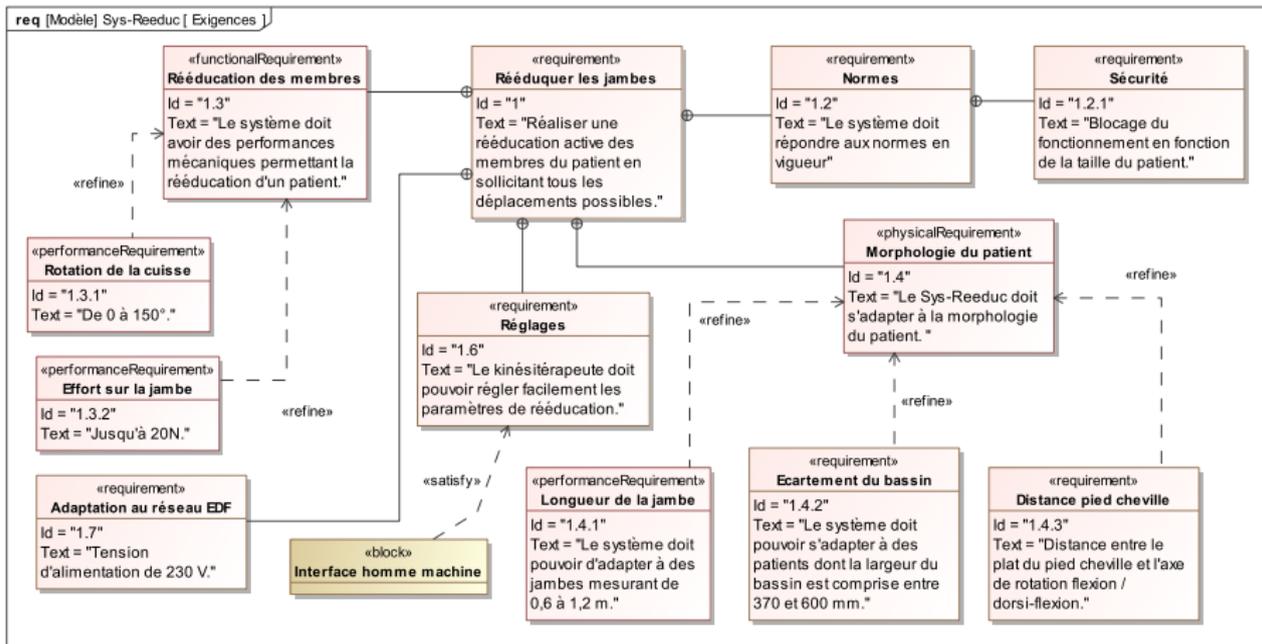
Il est possible, mais non obligatoire, de relier les exigences entre elles par des liens. Distinguons alors :

- **la contenance**  : Permet de **décomposer** une exigence composite en plusieurs exigences unitaires, plus faciles ensuite à tracer vis-à-vis du système.
- **le raffinement**  : Permet d'**ajouter de la précision**, par exemple des données quantitatives.
- **la dérivation**  : Consiste à relier des exigences de **niveaux différents**, par exemple des exigences système à des exigences de niveau sous-système. C'est un lien logique d'implication.

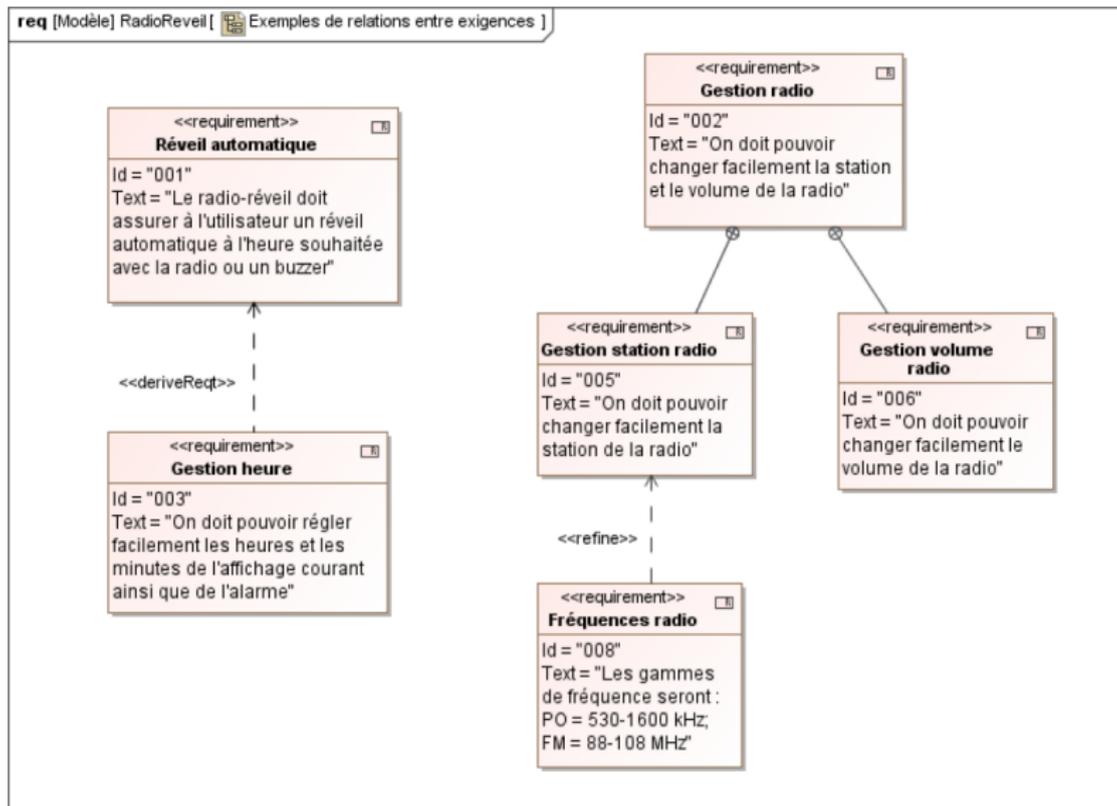
# Diagramme d'exigences



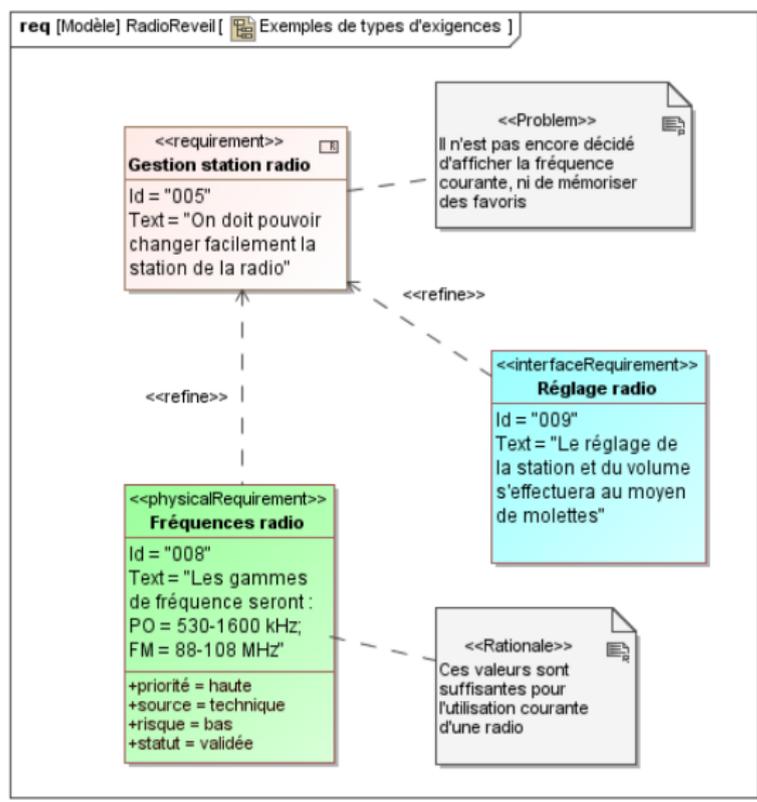
# Diagramme d'exigences



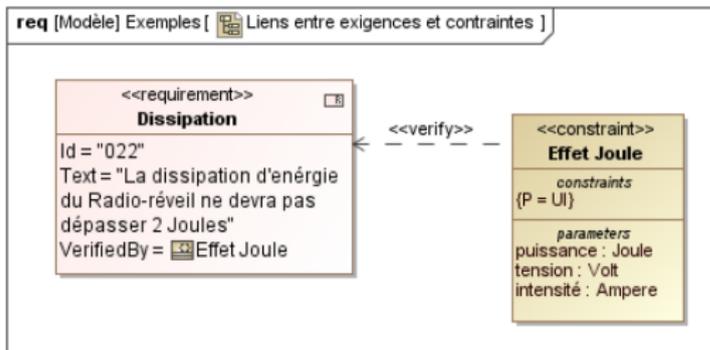
# diagramme d'exigence (req) Radio-réveil



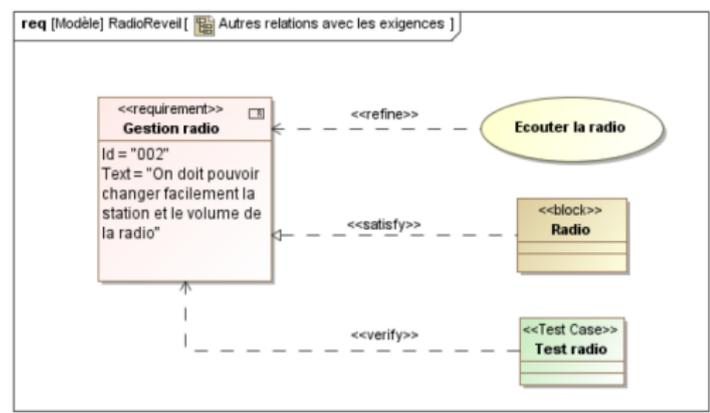
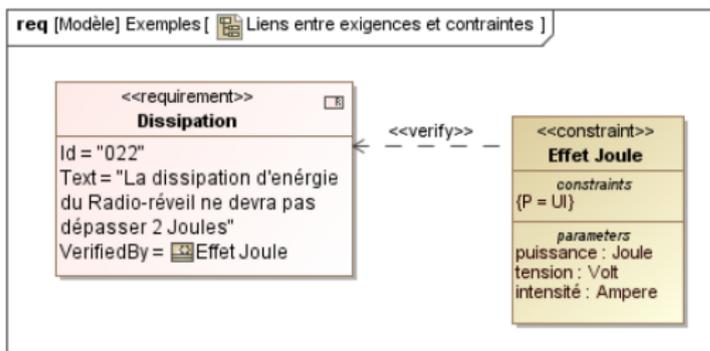
# diagramme d'exigence (req) Radio-réveil



# diagramme d'exigence (req) Radio-réveil



# diagramme d'exigence (req) Radio-réveil



# Diagramme de blocs internes (ibd)

**OBJECTIF :** introduire la notion fondamentale de **port** qui correspond à un point d'interaction avec l'extérieur du bloc.

Le diagramme de blocs internes est rattaché à un bloc issu du diagramme de définition de blocs, le cadre du diagramme représentant la frontière d'un bloc.

Les connecteurs (traits) entre les ports indiquent soit les associations soit les flux de **matière**, d'**énergie** et d'**information (MEI)** entre les différents blocs.

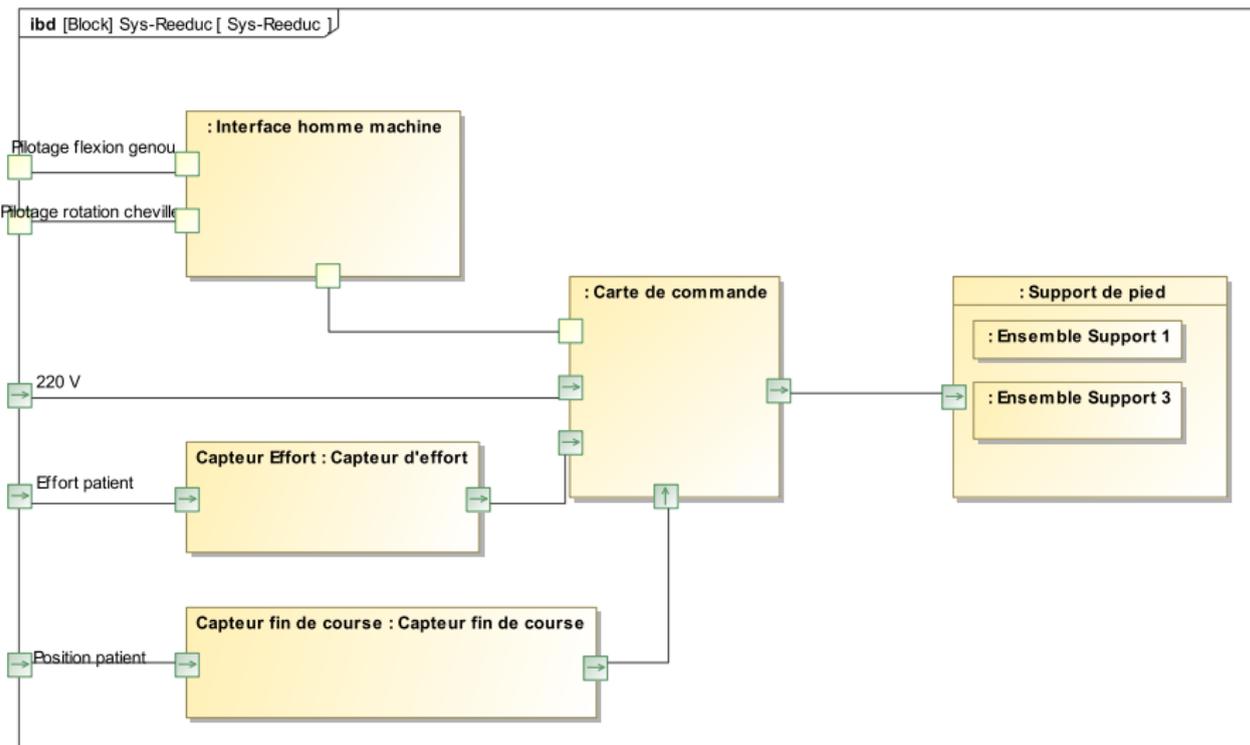
La représentation graphique des ports est un carré placé sur le contour du bloc :

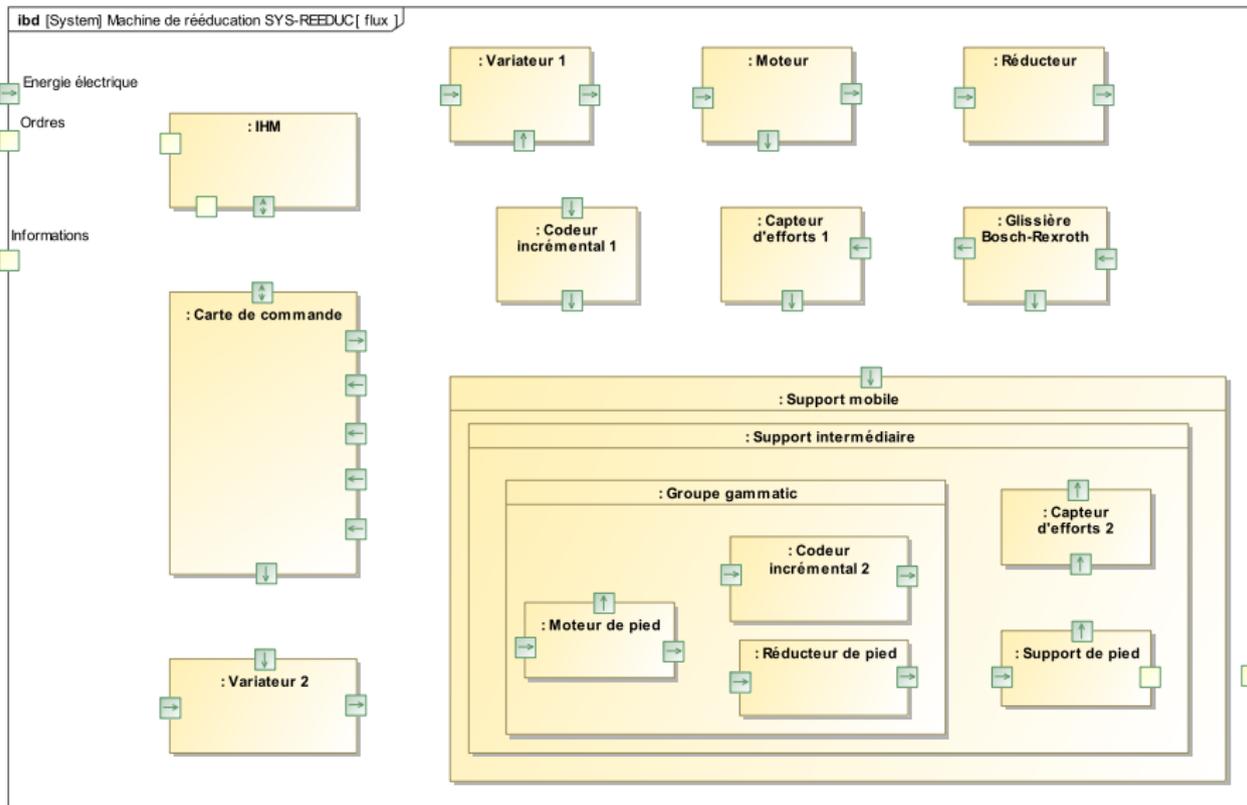
- **Les ports de flux** indiquent les échanges de matière, d'énergie et d'information (MEI) entre blocs : ce type de port contient une flèche dont le sens (entrante, sortante ou bidirectionnelle) indique celui du flux.

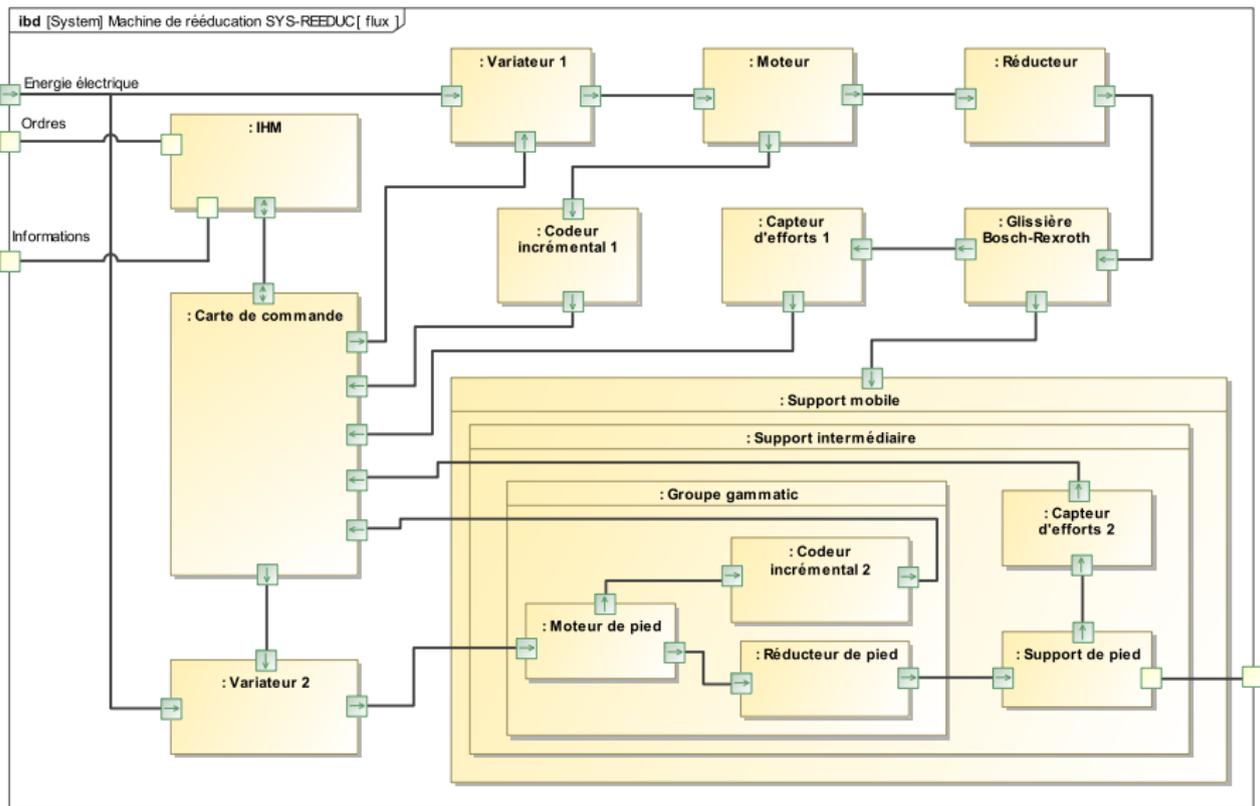
La représentation graphique des ports est un carré placé sur le contour du bloc :

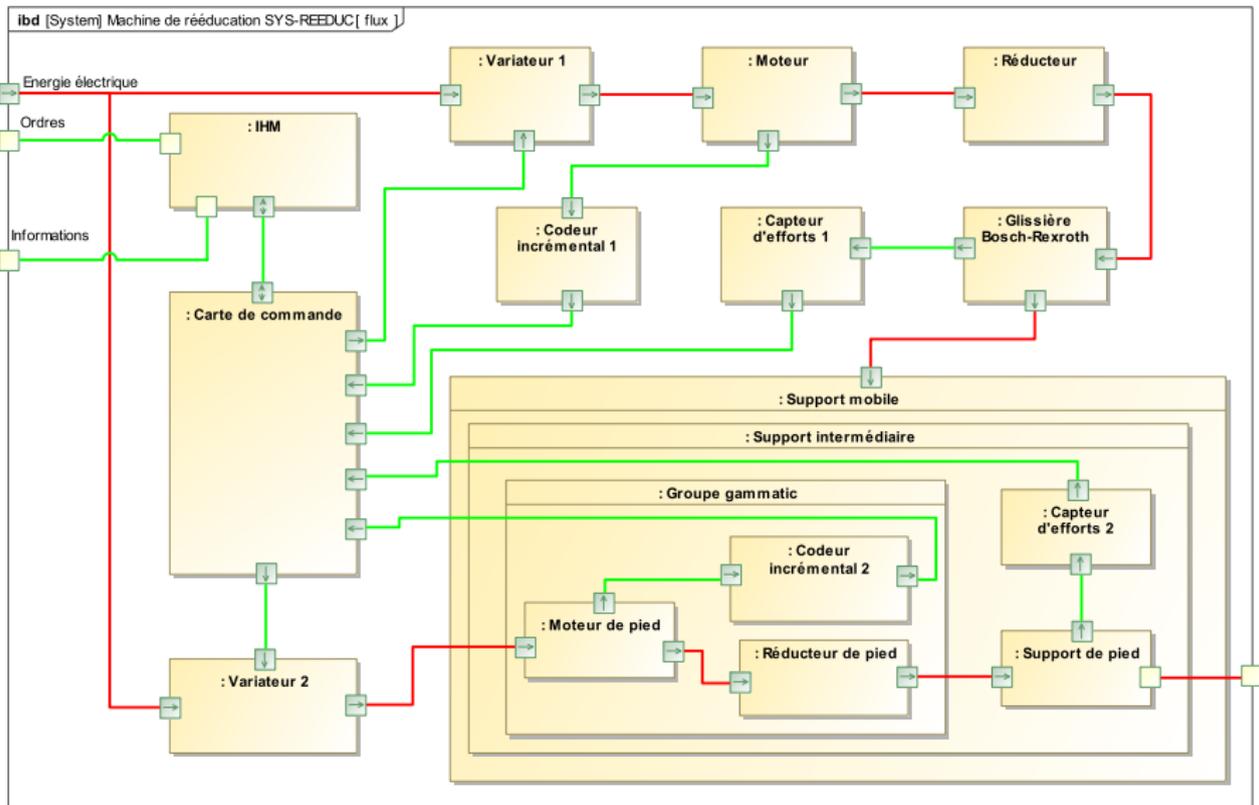
- **Les ports de flux** indiquent les échanges de matière, d'énergie et d'information (MEI) entre blocs : ce type de port contient une flèche dont le sens (entrante, sortante ou bidirectionnelle) indique celui du flux.
- **Les ports standards** indiquent la logique de commande et les interfaces d'un bloc : ce type de port ne contient pas d'indication particulière. Il sera peut être amené à disparaître.

# Partie commande





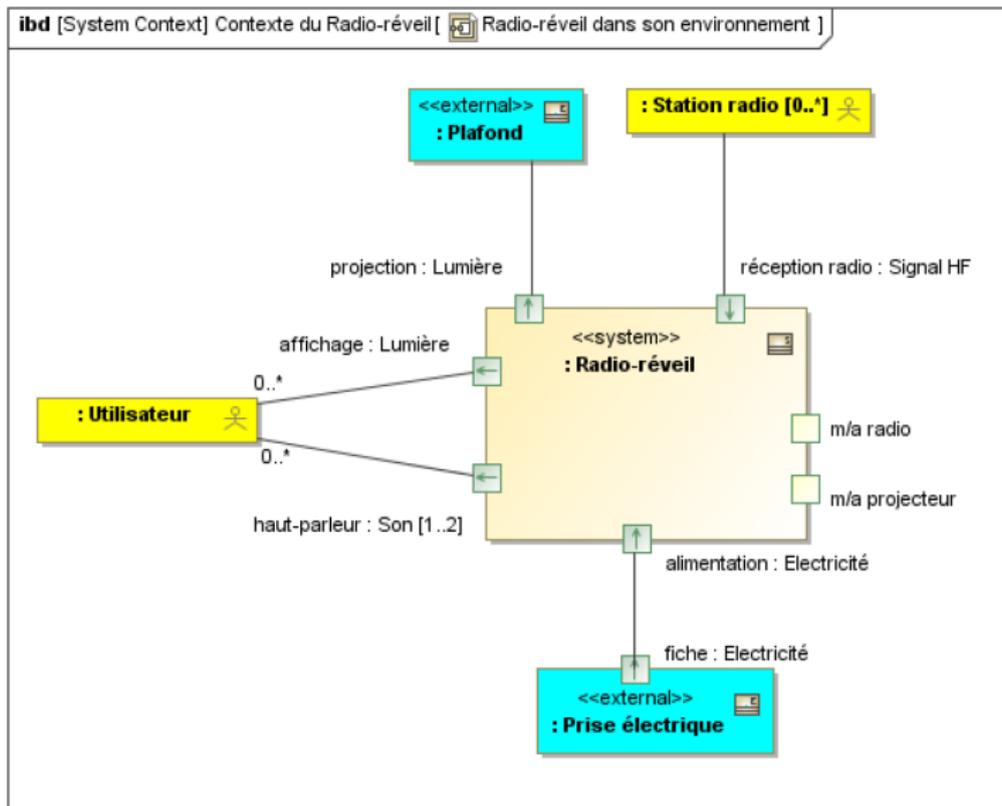




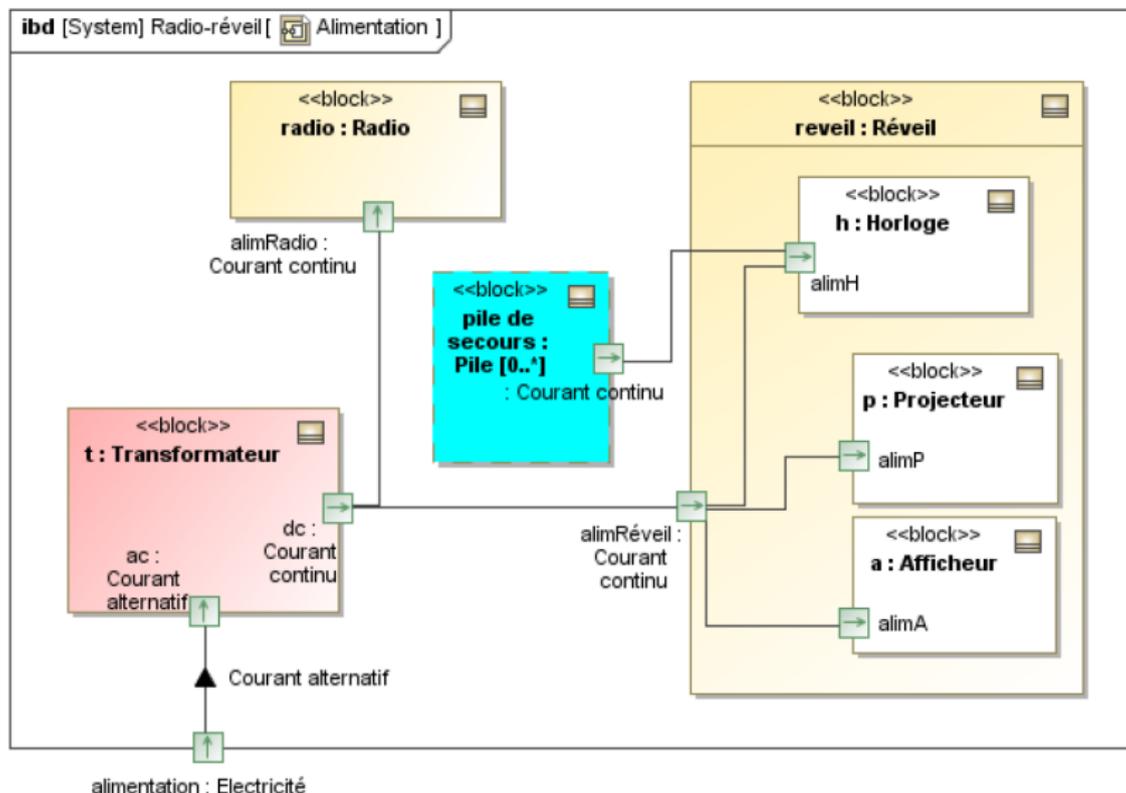
Les interconnexions des différents blocs via les ports standard et de flux représentés sur un diagramme de blocs internes renseignent sur les relations entre les blocs : ainsi, par exemple, un port standard noté `cmd` a été utilisé pour commander le sous-système de prise de vue et deux ports de flux ont été ajoutés, le port entrant représentant le flux vidéo de la caméra (qui ne fait pas partie du système) et le port sortant représentant la communication avec la station au sol.

La présence d'un symbole à rotule entre les blocs `Récepteur` et `Calculateur` permet de montrer l'interface fournie par le calculateur pour piloter la nacelle (symbolisée par la sphère pleine) et l'interface requise par la télécommande (symbolisée par la sphère creuse).

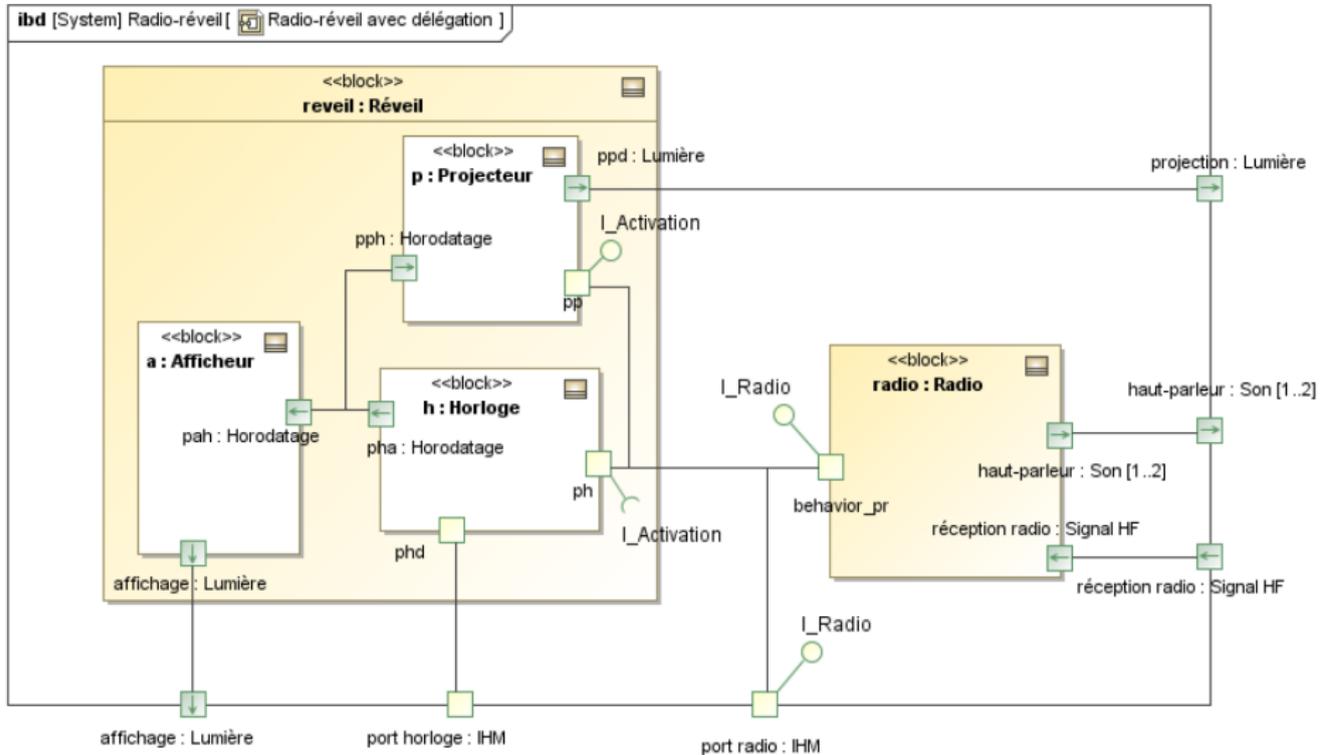
# diagramme de blocs internes (ibd) Radio-réveil



# diagramme de blocs internes (ibd) Radio-réveil



# diagramme de blocs internes (ibd) Radio-réveil



# Diagramme de séquence (sd)

## Définitions

Le diagramme de séquence est un diagramme comportemental appelé Sequence Diagram (sd) dans le langage SysML.

### DÉFINITION : Diagramme de séquence

*diagramme permettant de décrire les interactions existant entre plusieurs entités, celles-ci pouvant être des acteurs, le système ou ses sous-systèmes. Le diagramme ne montre donc que l'enchaînement séquentiel des différentes interactions.*

Un diagramme de séquence est rattaché à un cas d'utilisation et décrit ce dernier en entier ou en partie, ce qui correspond à un scénario de fonctionnement possible, défini dans un cadre précis : il peut donc aboutir tout aussi bien à des évolutions positives (fonctionnement normal) ou négatives (gestion des problèmes), en particulier dans la phase de démarrage avant le fonctionnement normal.

Le diagramme de séquence montre la séquence verticale des messages passés entre éléments (lignes de vie) au sein d'une interaction.

### DÉFINITION : 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.*



# Diagramme de séquence (sd)

## Aspects graphiques

Pour les messages propres à un cas d'utilisation, les diagrammes de séquence "système" montrent non seulement les acteurs externes qui interagissent directement avec le système, mais également ce système (en tant que boîte noire) et les événements système déclenchés par les acteurs.

L'ordre chronologique se déroule vers le bas et l'ordre des messages doit suivre la séquence décrite dans le cas d'utilisation.

On représente un diagramme de séquence "système" en plaçant de façon privilégiée l'acteur principal à gauche, puis une ligne de vie unique représentant le système en boîte noire, et, enfin, les éventuels acteurs secondaires sollicités durant le scénario à droite du système.

## DÉFINITION : Message

Appel d'un comportement chez le destinataire. Cela peut être des signaux ou des opérations.

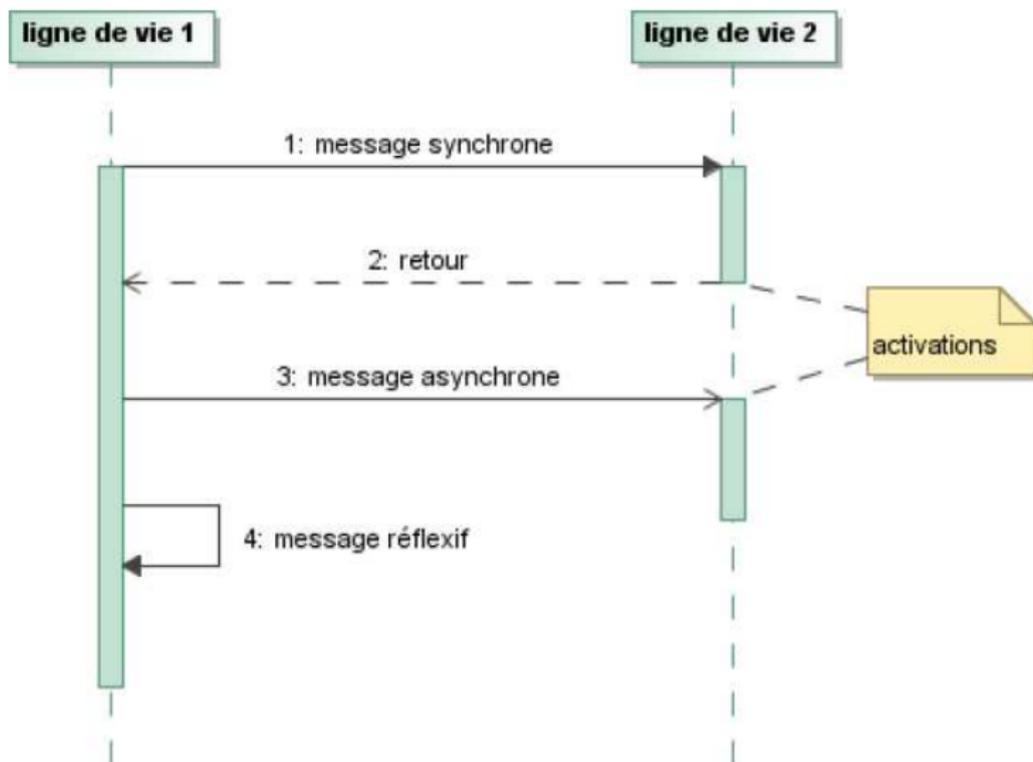
On distingue trois catégories de messages:

- **synchrones** : l'expéditeur attend une réponse pour poursuivre  

- **asynchrones** : l'expéditeur n'attend rien en retour  

- **réponses** : 

**REMARQUE** : il existe aussi des messages réflexifs 

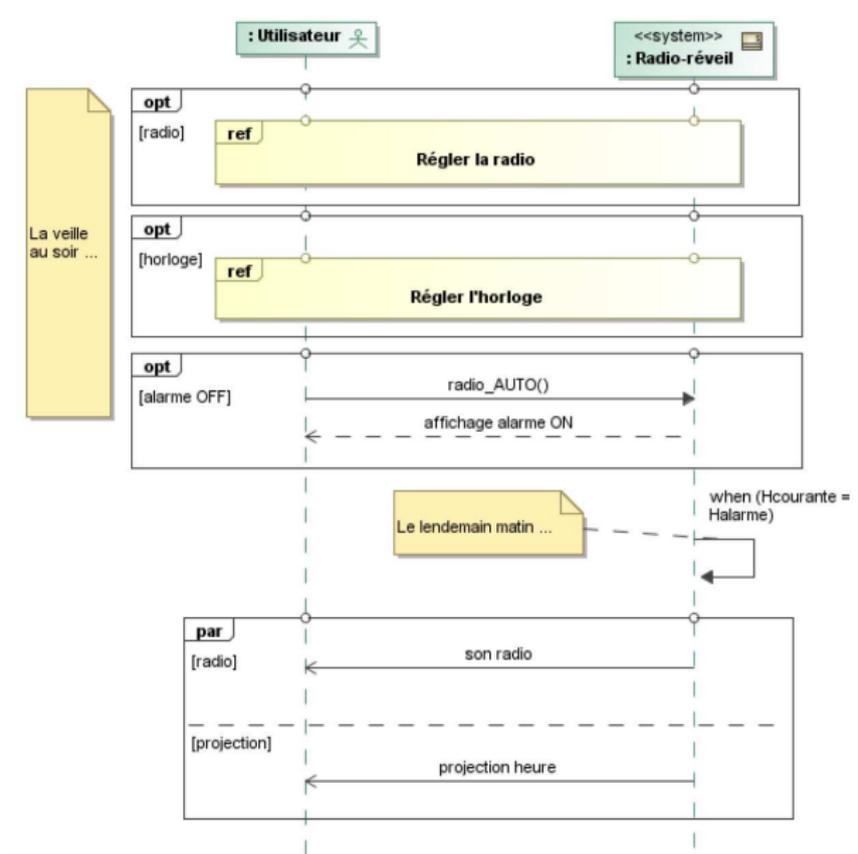


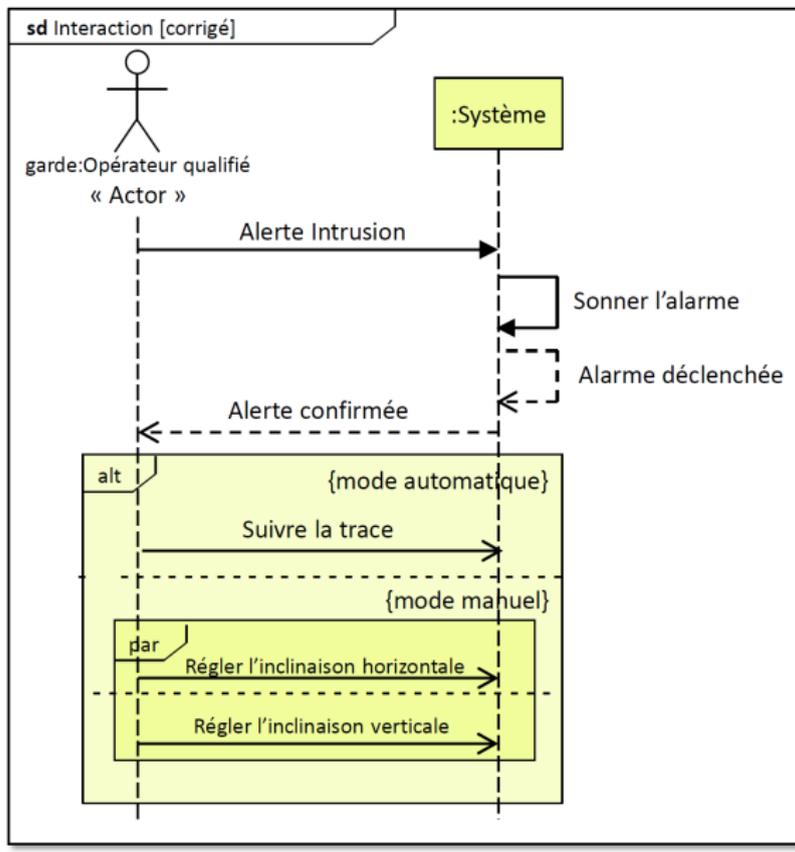
# Diagramme de séquence (sd)

## 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.



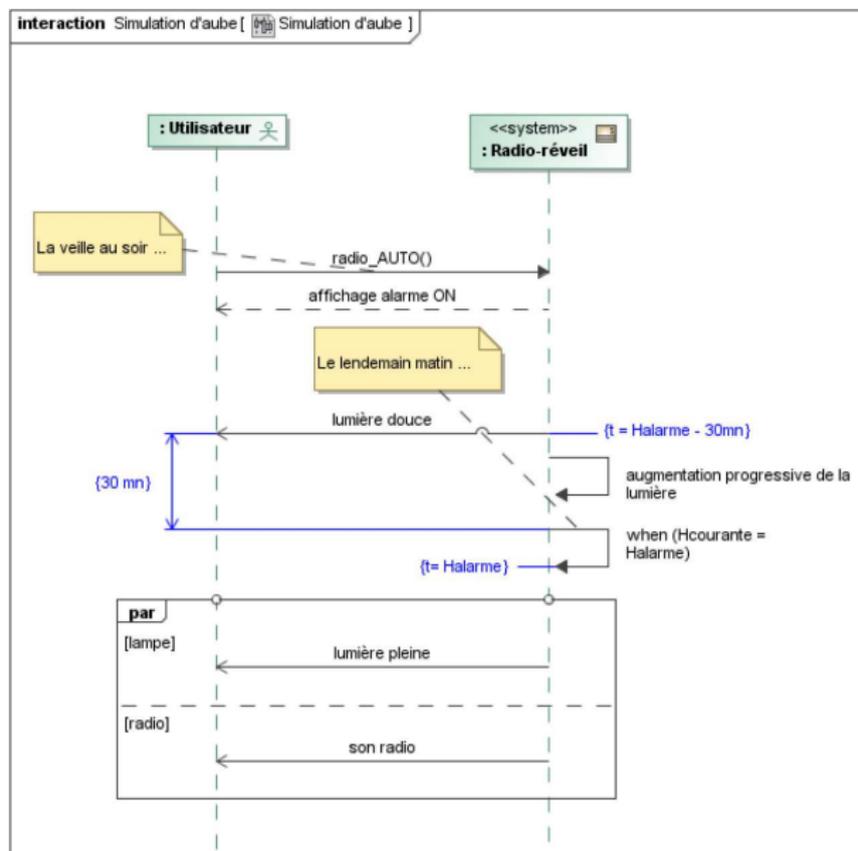


# Diagramme de séquence (sd)

## Contraintes temporelles

SysML permet d'ajouter des contraintes temporelles sur le diagramme de séquence. Il existe deux types de contraintes :

- **la contrainte de durée** permet d'indiquer une contrainte sur la durée exacte, la durée minimale ou la durée maximale entre deux événements ;
- **la contrainte de temps** permet de positionner des labels associés à des instants dans le scénario au niveau de certains messages et de les relier ainsi entre eux.

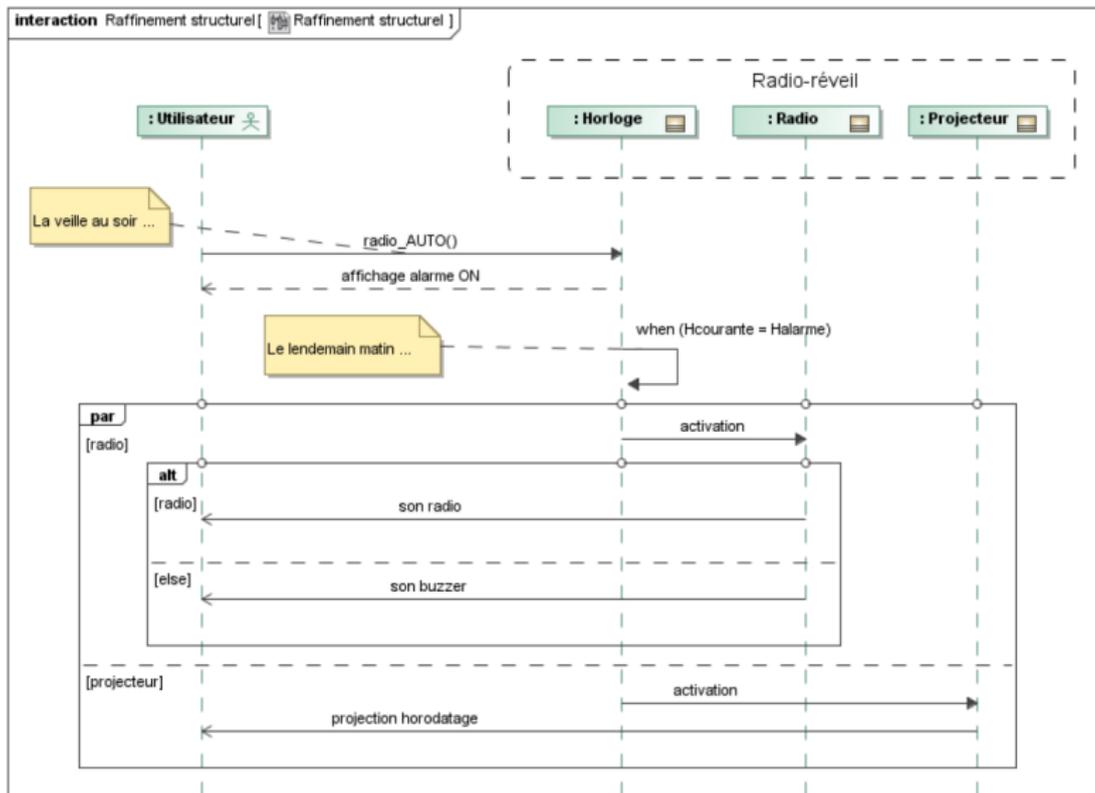


Pour simuler l'aube, la lampe commence à émettre doucement trente minutes avant l'heure du réveil. Le message 3 : lumière douce modélise ce début d'éclairage.

La contrainte de durée est représentée par une double flèche en prolongement de ce message et du déclenchement de l'alarme (message 5), avec la durée entre accolades : {30 mn}.

La contrainte de temps, pour sa part, est représentée en associant une contrainte {t = Halarme} en prolongement du message 5, et une autre contrainte {t = Halarme - 30 mn} en prolongement du message 3.

# diagramme de séquences (sd)

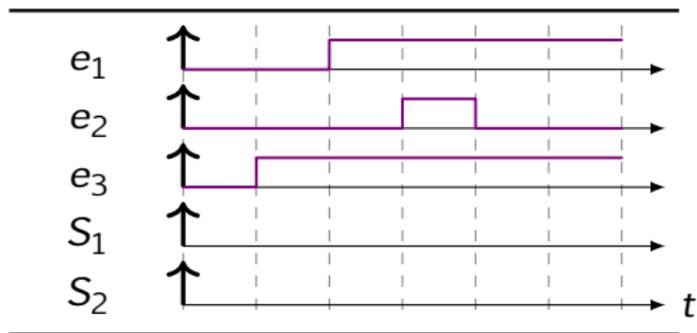


# Chronogrammes ou diagramme de Gantt

Afin de caractériser ces systèmes, on utilise alors les chronogrammes (aussi appelés diagrammes de Gantt). On représente l'évolution chronologique des entrées et sorties en considérant des changements d'états instantanés et simultanés.

# Chronogrammes ou diagramme de Gantt

Afin de caractériser ces systèmes, on utilise alors les chronogrammes (aussi appelés diagrammes de Gantt). On représente l'évolution chronologique des entrées et sorties en considérant des changements d'états instantanés et simultanés.



# Chronogrammes ou diagramme de Gantt

Afin de caractériser ces systèmes, on utilise alors les chronogrammes (aussi appelés diagrammes de Gantt). On représente l'évolution chronologique des entrées et sorties en considérant des changements d'états instantanés et simultanés.

# Chronogrammes ou diagramme de Gantt

Afin de caractériser ces systèmes, on utilise alors les chronogrammes (aussi appelés diagrammes de Gantt). On représente l'évolution chronologique des entrées et sorties en considérant des changements d'états instantanés et simultanés.

