

Introduction à l'ingénierie système

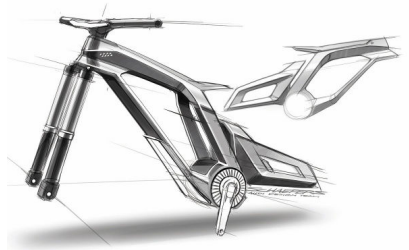
N. Mesnier

Lycée Jean Perrin, Lyon

2023–2024

Plan du cours

- 1 Introduction
- 2 Démarche d'ingénierie système
- 3 Analyse fonctionnelle
- 4 Analyse structurelle





Introduction

■ Contexte

L'Homme n'a cessé de créer et optimiser des outils et techniques pour améliorer son quotidien et sa productivité :

- XVIII^e développement industriel et mécanisation des outils de fabrication ;
- XX^e automatisation, organisation scientifique du travail
micro-électronique et informatique (ère numérique) ;
- XXI^e produits dits « intelligents » (objets connectés).

Définition (Produit)

Résultat d'activité ou de processus.

Un produit « intelligent » s'adapte en temps réel à son environnement ou aux exigences de l'utilisateur en exploitant des informations issues de **capteurs**.
(caméras, détecteurs de mouvement, récepteurs sans fil, capteurs de position, de son, de chaleur, d'humidité ou de champs magnétiques, etc.).

■ Contexte

L'Homme n'a cessé de créer et optimiser des outils et techniques pour améliorer son quotidien et sa productivité :

- XVIII^e développement industriel et mécanisation des outils de fabrication ;
- XX^e automatisation, organisation scientifique du travail
micro-électronique et informatique (ère numérique) ;
- XXI^e produits dits « intelligents » (objets connectés).

Définition (Produit)

Résultat d'activité ou de processus.

Un produit « intelligent » s'adapte en temps réel à son environnement ou aux exigences de l'utilisateur en exploitant des informations issues de capteurs.
(caméras, détecteurs de mouvement, récepteurs sans fil, capteurs de position, de son, de chaleur, d'humidité ou de champs magnétiques, etc.).

■ Contexte

L'Homme n'a de cesse de créer et optimiser des outils et techniques pour améliorer son quotidien et sa productivité :

- XVIII^e développement industriel et mécanisation des outils de fabrication ;
- XX^e automatisation, organisation scientifique du travail
micro-électronique et informatique (ère numérique) ;
- XXI^e produits dits « intelligents » (objets connectés).

Définition (Produit)

Résultat d'activité ou de processus.

Un **produit « intelligent » s'adapte en temps réel** à son environnement ou aux exigences de l'utilisateur en exploitant des informations issues de **capteurs**.

(caméras, détecteurs de mouvement, récepteurs sans fil, capteurs de position, de son, de chaleur, d'humidité ou de champs magnétiques, etc.).

■ Développement des produits « intelligents »

- fait appel à de nombreuses disciplines de l'ingénierie
génie mécanique, génie électrique, génie électronique, génie automatique, génie logiciel, génie chimique, génie industriel, etc.
- réalisé par des ingénieurs

Définition (Ingénieur, selon la CTI)

Le métier de l'ingénieur consiste à poser, étudier et résoudre de manière performante et innovante des problèmes souvent complexes de création, de conception, de réalisation, de mise en œuvre et de contrôle, ayant pour objet des produits, des systèmes ou des services – et éventuellement leur financement et leur commercialisation – au sein d'une organisation compétitive. Il prend en compte les préoccupations de protection de l'homme, de la vie et de l'environnement, et plus généralement du bien-être collectif.

■ Développement des produits « intelligents »

- fait appel à de nombreuses disciplines de l'ingénierie
génie mécanique, génie électrique, génie électronique, génie automatique, génie logiciel, génie chimique, génie industriel, etc.
- réalisé par des ingénieurs

Définition (Ingénieur, selon la CTI)

Le métier de l'ingénieur consiste à poser, étudier et résoudre de manière performante et innovante des problèmes souvent complexes de création, de conception, de réalisation, de mise en œuvre et de contrôle, ayant pour objet des produits, des systèmes ou des services – et éventuellement leur financement et leur commercialisation – au sein d'une organisation compétitive. Il prend en compte les préoccupations de protection de l'homme, de la vie et de l'environnement, et plus généralement du bien-être collectif.

Système : produit artificiel de l'esprit des hommes
permettant de penser une réalité complexe

(biologie, économie, linguistique, philosophie, management, organisations, etc.)

Définition (Système)

Un système est :

- une association structurée d'éléments (sous-systèmes ou composants)
- qui interagissent les uns avec les autres d'une manière organisée
- pour accomplir une finalité commune appelée fonction globale.

Système : produit artificiel de l'esprit des hommes permettant de penser une réalité complexe

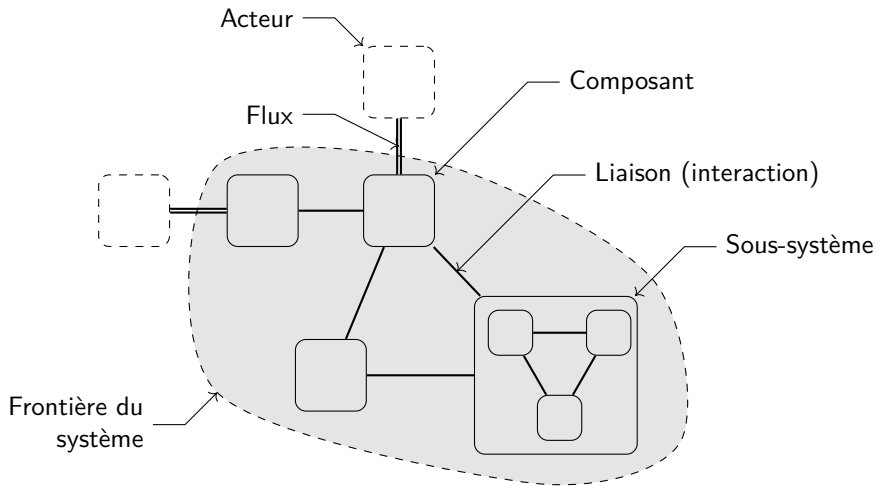
(biologie, économie, linguistique, philosophie, management, organisations, etc.)

Définition (Système)

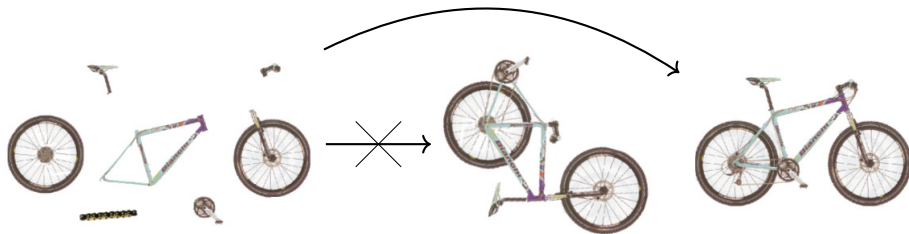
Un système est :

- une association structurée d'éléments (sous-systèmes ou composants)
- qui interagissent les uns avec les autres d'une manière organisée
- pour accomplir une finalité commune appelée fonction globale.

Notion de système



Notion de système

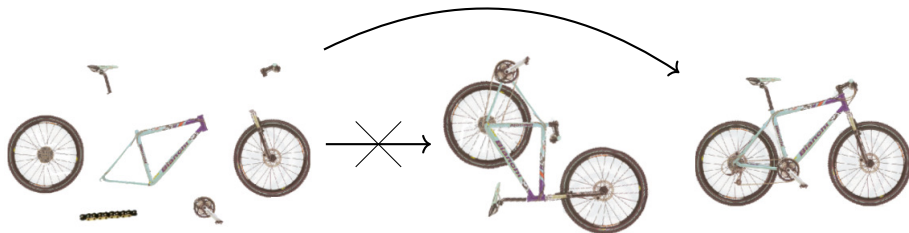


Un système n'est pas qu'un ensemble !

Système =

- éléments (composants) ;
- interactions entre éléments (liaisons) ;
- interactions avec son environnement (flux).

Notion de système

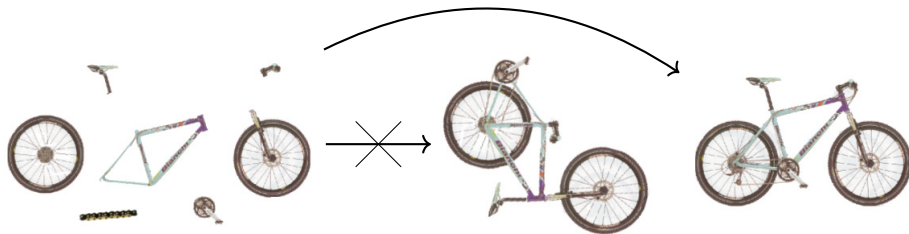


Un système n'est pas qu'un ensemble !

Système =

- éléments (composants) ;
- interactions entre éléments (liaisons) ;
- interactions avec son environnement (flux).

Notion de système



Un système n'est pas qu'un ensemble !

Système =

- éléments (composants) ;
- interactions entre éléments (liaisons) ;
- interactions avec son environnement (flux).

En SII :

Système $\iff$ Système technique

Définition (Système technique)

Un système technique ou produit industriel est formé d'éléments (matériels, logiciels, compétences humaines, processus) intégrés de telle sorte qu'ils fournissent, du fait de leurs interactions, les services correspondant à sa mission.

Un système technique est toujours conçu et réalisé
de façon à **satisfaire un besoin**
exprimé par un utilisateur ou un client.

En SII :

Système $\iff$ Système technique

Définition (Système technique)

Un système technique ou produit industriel est formé d'éléments (matériels, logiciels, compétences humaines, processus) intégrés de telle sorte qu'ils fournissent, du fait de leurs interactions, les services correspondant à sa mission.

Un système technique est toujours conçu et réalisé
de façon à **satisfaire un besoin**
exprimé par un utilisateur ou un client.

Exemples de systèmes techniques

Transports



Concept car EX1 (© Peugeot)



Sky Whale (© AWWA)



Planetsolar (© Tûranor)

Industrie



Chaîne de transfert (© Ariel)



Centre d'usinage
(© Deckel Maho)



Chaîne de conditionnement
(© Serac)

Exemples de systèmes techniques

Énergie



Éolienne (© Alstom)



Hydrolienne (© EDF)

Médical



IRM (© Siemens)



Robot chirurgical *da Vinci*
(© Intuitive Surgical)

Loisirs



Drone modèle S
(© Ciné-drone)



Robot Nao
(© Aldebaran Robotics)

■ Produits modernes

- systèmes complexes pluri-techniques :
 - architecture : systèmes qui « s'emboîtent » les uns aux autres ;
 - fonctionnalités : inhérentes aux possibilités des différentes technologies
- dont le comportement dépend d'un grand nombre de paramètres.

Définition (Système complexe)

Un système est dit complexe lorsque les interactions liant ses composants sont :

- multiples
- interdépendantes
- telles que le comportement global ne puisse être directement prévisible à partir des comportements élémentaires des composants.

■ Produits modernes

- systèmes complexes pluri-techniques :
 - architecture : systèmes qui « s'emboîtent » les uns aux autres ;
 - fonctionnalités : inhérentes aux possibilités des différentes technologies
- dont le comportement dépend d'un grand nombre de paramètres.

Définition (Système complexe)

Un système est dit complexe lorsque les interactions liant ses composants sont :

- multiples
- interdépendantes
- telles que le comportement global ne puisse être directement prévisible à partir des comportements élémentaires des composants.

■ Analyse d'un système simple (physique-chimie)

- isolement des phénomènes élémentaires (expérience) ;
- raisonnement déductif :

hypothèses → modèle → résultat → conclusion

établissant directement des relations de cause à effet.

■ Analyse des systèmes complexes (SII)

- compétences pluri-disciplinaires ;
- tri les entrées et sorties significatives ;
- hiérarchisation de l'organisation interne en niveaux ;
- recherche des relations (souvent non causales) entre paramètres ;
- identification des critères de comparaison, des boucles de rétroaction ;
- proposition de solutions ou modèles partiellement valides.

Organisation intellectuelle différente de celle des systèmes simples !

■ Analyse d'un système simple (physique-chimie)

- isolement des phénomènes élémentaires (expérience) ;
- raisonnement déductif :

hypothèses $\rightarrow$ modèle $\rightarrow$ résultat $\rightarrow$ conclusion

établissant directement des relations de cause à effet.

■ Analyse des systèmes complexes (SII)

- compétences pluri-disciplinaires ;
- tri les entrées et sorties significatives ;
- hiérarchisation de l'organisation interne en niveaux ;
- recherche des relations (souvent non causales) entre paramètres ;
- identification des critères de comparaison, des boucles de rétroaction ;
- proposition de solutions ou modèles partiellement valides.

Organisation intellectuelle différente de celle des systèmes simples !

■ Analyse d'un système simple (physique-chimie)

- isolement des phénomènes élémentaires (expérience) ;
- raisonnement déductif :

hypothèses $\rightarrow$ modèle $\rightarrow$ résultat $\rightarrow$ conclusion

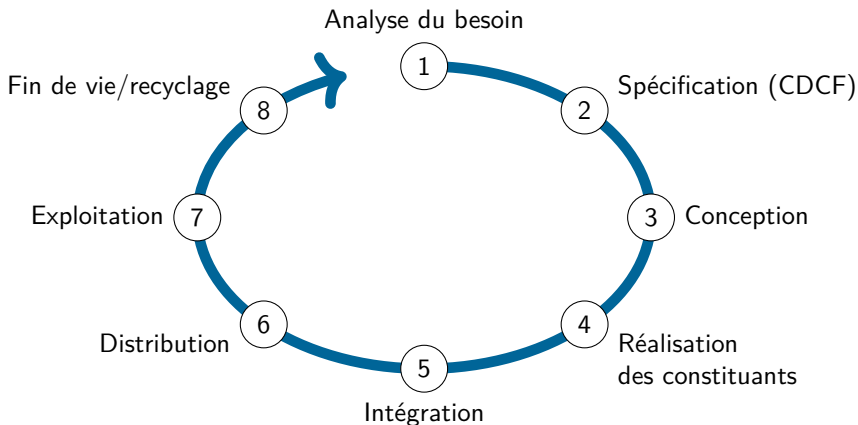
établissant directement des relations de cause à effet.

■ Analyse des systèmes complexes (SII)

- compétences pluri-disciplinaires ;
- tri les entrées et sorties significatives ;
- hiérarchisation de l'organisation interne en niveaux ;
- recherche des relations (souvent non causales) entre paramètres ;
- identification des critères de comparaison, des boucles de rétroaction ;
- proposition de solutions ou modèles partiellement valides.

Organisation intellectuelle différente de celle des systèmes simples !

Cycle de vie d'un produit industriel



Cycle de vie d'un produit industriel (1/8)

■ Analyse du besoin

Définition (Besoin)

Un besoin est une nécessité ou un désir éprouvé par l'utilisateur (le client) 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).

Exemple (Besoin de se rendre à Paris...)

Plusieurs produits peuvent satisfaire ce besoin :

- une paire de chaussures de sport ;
- un segway (photo ci-contre) ;
- un véhicule hybride ;
- un hélicoptère.

Choix ? $\Leftarrow$ Spécification des attentes = **exigences**



■ Spécification (CDCF)

Définition (Exigence)

Une exigence énonce une capacité ou une contrainte

- fonctionnelle (performances en vitesse, effort) ;
- technique (contraintes induites par l'utilisation de certains constituants, type d'énergie ou tension d'alimentation) ;
- environnementale (hygrométrie ou température du milieu ambiant) ;
- légale (normes de sécurité, de pollution, etc) ;
- pratique (échange de données numériques) ;
- énergétique, esthétique, etc.

que doit satisfaire un système.

Exigence $\iff$ Grandeur physique mesurable $\implies$ Vérification

■ Spécification (CDCF)

Ensemble des exigences = cahier des charges fonctionnel

Définition (Cahier des charges fonctionnel (CDCF))

Le cahier des charges fonctionnel est un document de structure normalisée formalisant le besoin du client ainsi que l'ensemble de ses exigences, sans spécifier de solution technique.

C'est un **contrat** entre le client et le concepteur du futur système.

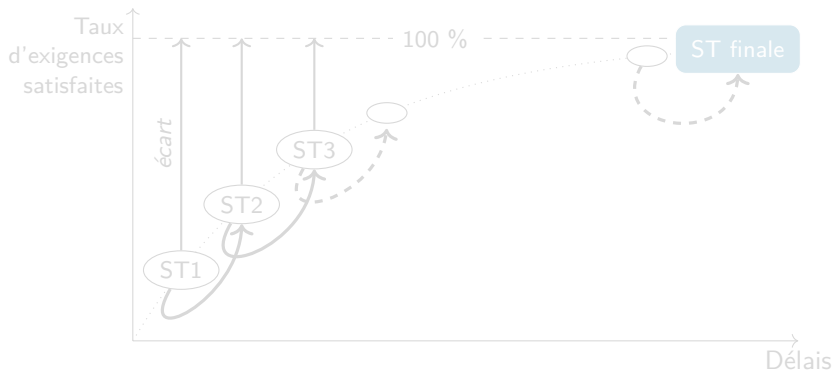


Cycle de vie d'un produit industriel (3/8)

■ Conception

Définition (Solution technique)

Une solution technique correspond au choix adopté par un industriel pour satisfaire un ensemble d'exigences.

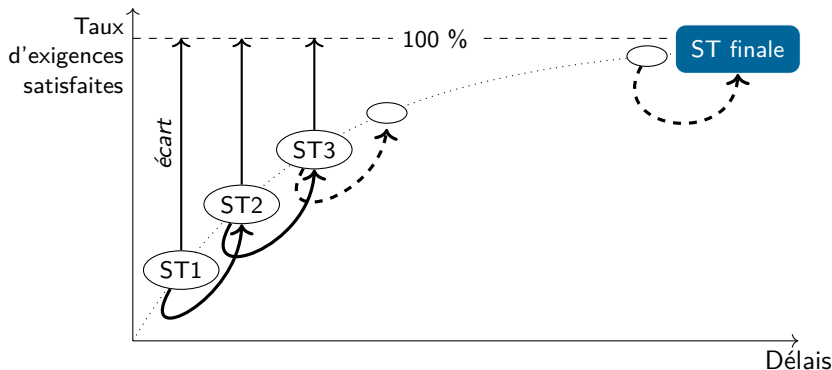


Cycle de vie d'un produit industriel (3/8)

■ Conception

Définition (Solution technique)

Une solution technique correspond au choix adopté par un industriel pour satisfaire un ensemble d'exigences.

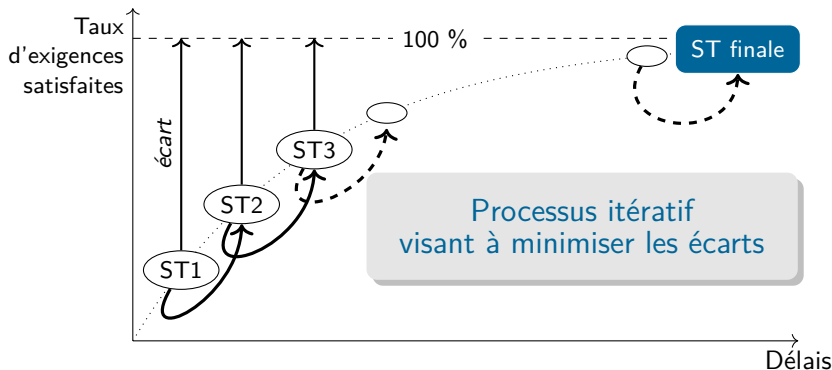


Cycle de vie d'un produit industriel (3/8)

■ Conception

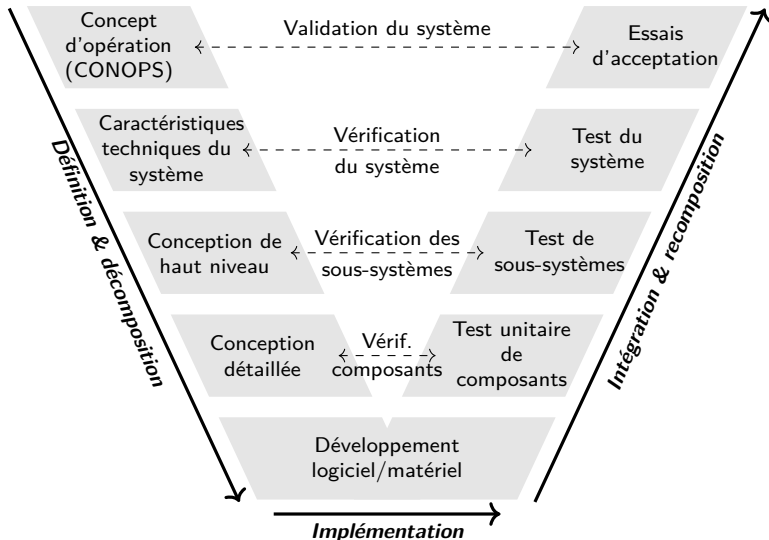
Définition (Solution technique)

Une solution technique correspond au choix adopté par un industriel pour satisfaire un ensemble d'exigences.



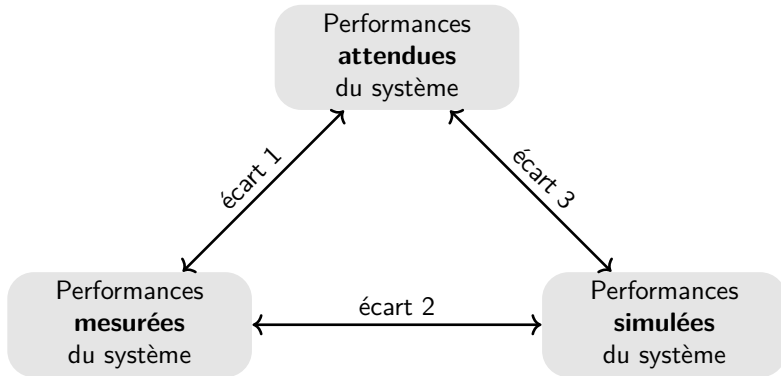
Cycle de vie d'un produit industriel (3-5/8)

■ Démarche de conception en « V »



■ Quantification des écarts en SII

- vérifier les performances attendues d'un système complexe (écart 1);
- valider une modélisation à partir d'expérimentations (écart 2);
- prévoir les performances d'un système à partir d'une modélisation (écart 3).





Démarche d'ingénierie système

Ingénierie des grands projets

missions Apollo (NASA), lanceurs Ariane (ESA),
radiotélescopes, centrales nucléaires, synchrotrons, etc.

Définition (Ingénierie système)

L'ingénierie système (ou ingénierie de systèmes) est une démarche méthodologique générale qui englobe l'ensemble des activités adéquates pour concevoir, faire évoluer et vérifier un système apportant une solution économique et performante aux besoins d'un client tout en satisfaisant l'ensemble des parties prenantes.

- L'ingénierie système est portée au niveau international par l'*international council on systems engineering* (INCOSE).
- Elle est organisée en chapitres.
- chapitre français : association française d'ingénierie système (AFIS)
- 3 normes : ISO/IEC 15288, ANSI/EIA 632, IEEE 1220

Ingénierie des grands projets

missions Apollo (NASA), lanceurs Ariane (ESA),
radiotélescopes, centrales nucléaires, synchrotrons, etc.

Définition (Ingénierie système)

L'ingénierie système (ou ingénierie de systèmes) est une démarche méthodologique générale qui englobe l'ensemble des activités adéquates pour concevoir, faire évoluer et vérifier un système apportant une solution économique et performante aux besoins d'un client tout en satisfaisant l'ensemble des parties prenantes.

- L'ingénierie système est portée au niveau international par l'*international council on systems engineering* (INCOSE).
- Elle est organisée en chapitres.
- chapitre français : association française d'ingénierie système (AFIS)
- 3 normes : ISO/IEC 15288, ANSI/EIA 632, IEEE 1220

Ingénierie des grands projets

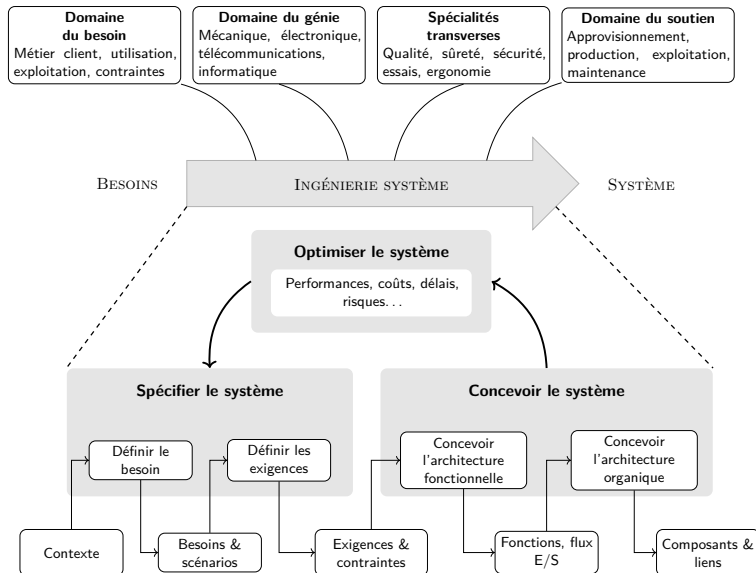
missions Apollo (NASA), lanceurs Ariane (ESA),
radiotélescopes, centrales nucléaires, synchrotrons, etc.

Définition (Ingénierie système)

L'ingénierie système (ou ingénierie de systèmes) est une démarche méthodologique générale qui englobe l'ensemble des activités adéquates pour concevoir, faire évoluer et vérifier un système apportant une solution économique et performante aux besoins d'un client tout en satisfaisant l'ensemble des parties prenantes.

- L'ingénierie système est portée au niveau international par l'*international council on systems engineering* (INCOSE).
- Elle est organisée en chapitres.
- chapitre français : association française d'ingénierie système (AFIS)
- 3 normes : ISO/IEC 15288, ANSI/EIA 632, IEEE 1220

Processus d'ingénierie système



■ Objectifs

- favoriser une **démarche coopérative et pluridisciplinaire** pour la conception des systèmes complexes ;
- **unicité des informations** pour gérer en configuration l'ensemble des éléments (exigences, modèles, simulations ou documents associées) ;
- **traçabilité** des décisions (justifiées, documentées et archivées)

Documentation des exigences que doit respecter un système.

■ Enjeux

- respect des exigences
- limiter les coûts
- maîtriser les délais
- améliorer la fiabilité

■ 3 points de vue

Besoin & exigences ?

définir précisément la finalité, les missions et les objectifs du système en explicitant les exigences et les contraintes de fonctionnement qu'il doit satisfaire.

Fonctions & comportements ?

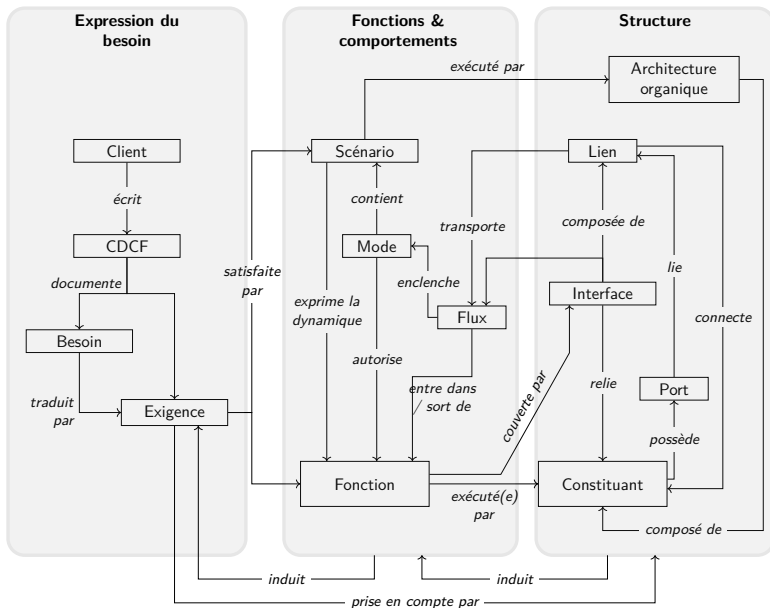
définir les fonctions et les différents cas d'utilisation du système en spécifiant ses différents états, ses interactions avec l'environnement et les activités de ses constituants.

⇒ étudier la dynamique du système et son mode de pilotage.

Structure ?

définir l'architecture structurelle ou organique du système en faisant apparaître ses différents constituants, leurs liens d'assemblage et leurs interactions sous forme de flux d'énergie, de matière ou d'information.

Méta-modèle de l'ingénierie système



Gérer la complexité grâce aux modèles

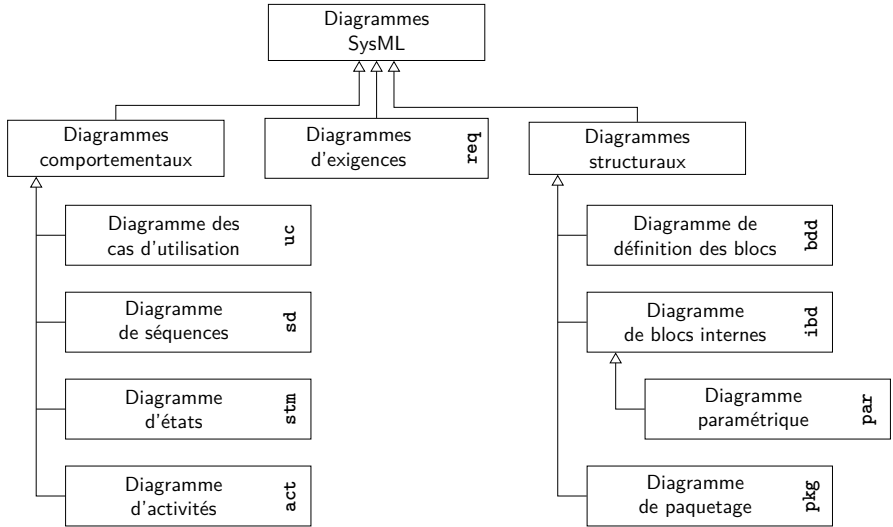
Définition (Modèle)

Un modèle est une représentation abstraite d'un système construite dans un but précis et qui ne contient donc qu'un ensemble restreint d'informations – supposées pertinentes.

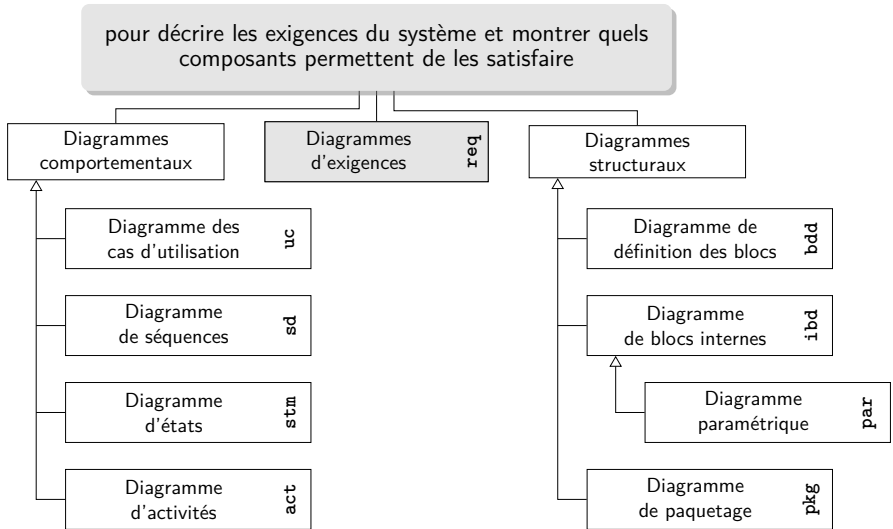
Comme par nature l'ingénierie système est une démarche coopérative et interdisciplinaire, il est fondamental de disposer d'une représentation commune du système avec un langage compréhensible par tous les corps de métiers, permettant d'assurer :

- une continuité entre le modèle géométrique (la maquette numérique) et les différents niveaux de modélisation des systèmes (fonctionnelle, logique et comportementale) ;
- une unicité des informations permettant de gérer en configuration l'ensemble des éléments (exigences, modèles, simulations, documents associées, etc.) ;
- une complétude du spectre des simulations à des fins de validation (simulations logiques, comportementales et réalistes).

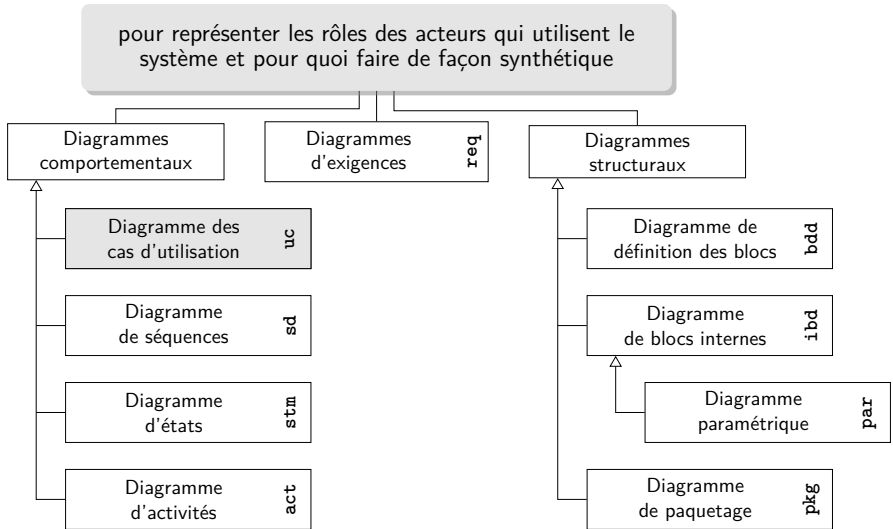
Langage commun de modélisation (SysML)



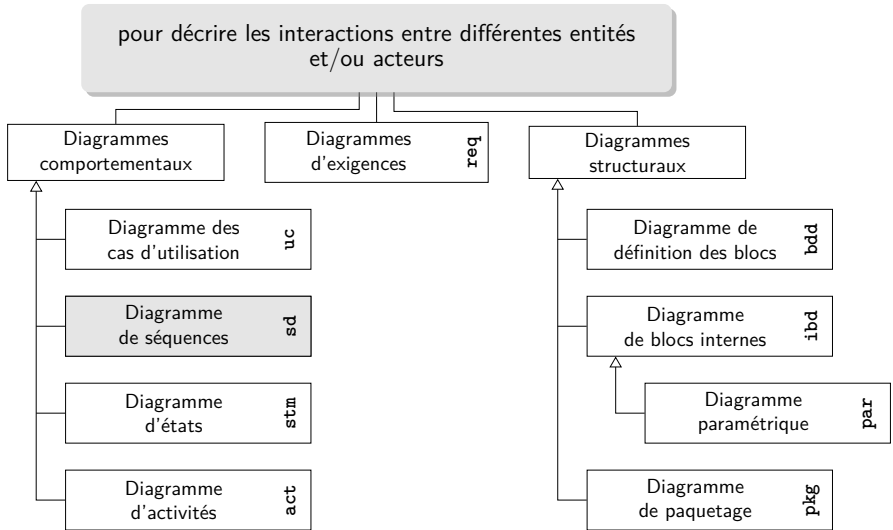
Langage commun de modélisation (SysML)



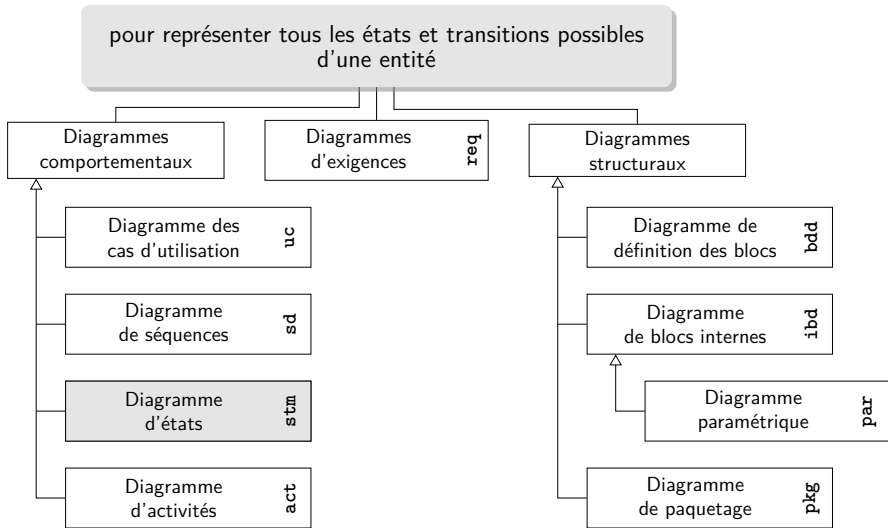
Langage commun de modélisation (SysML)



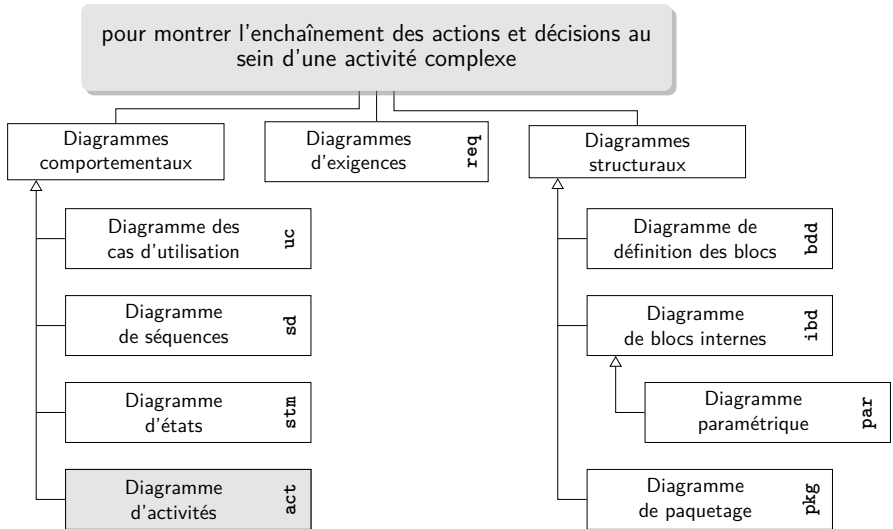
Langage commun de modélisation (SysML)



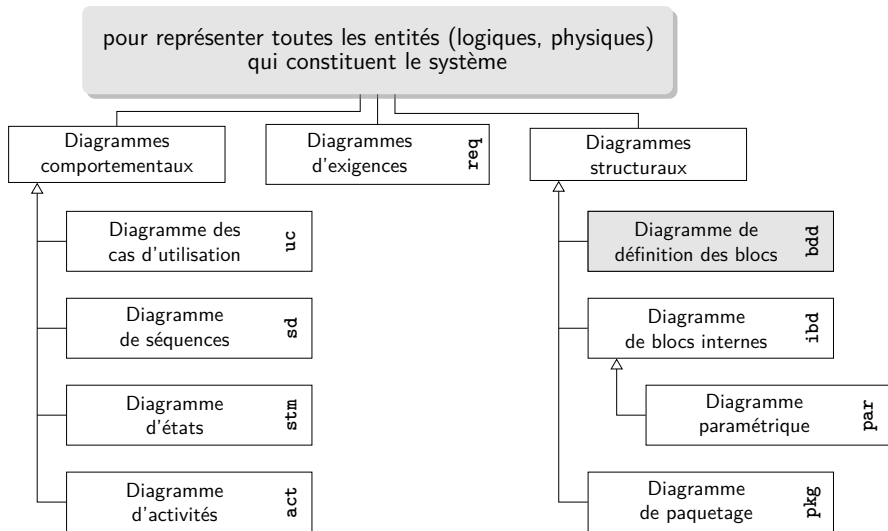
Langage commun de modélisation (SysML)



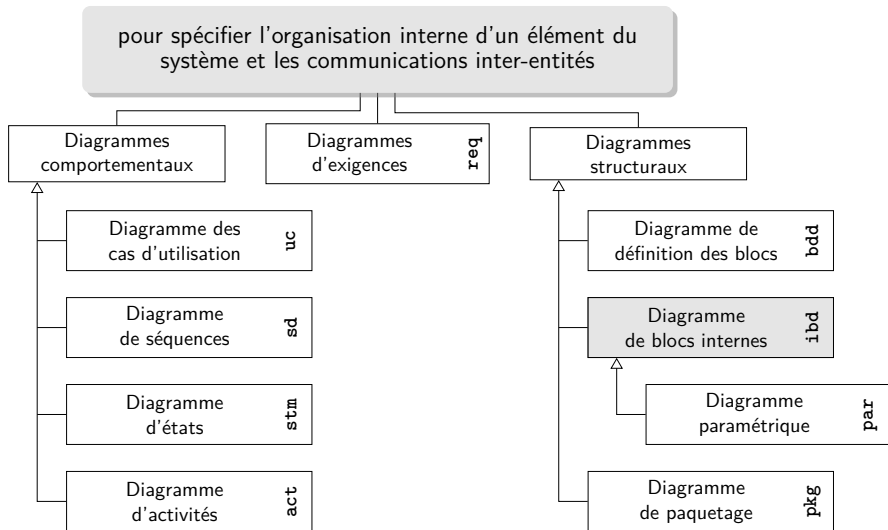
Langage commun de modélisation (SysML)



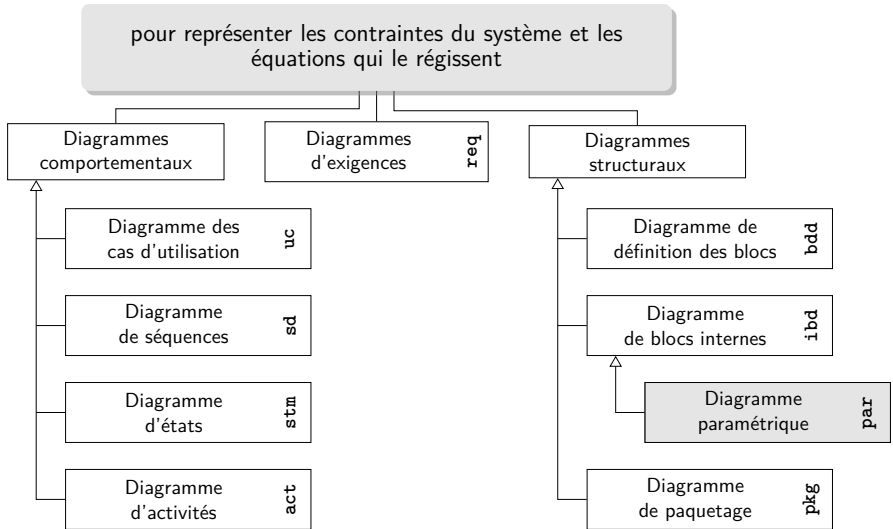
Langage commun de modélisation (SysML)



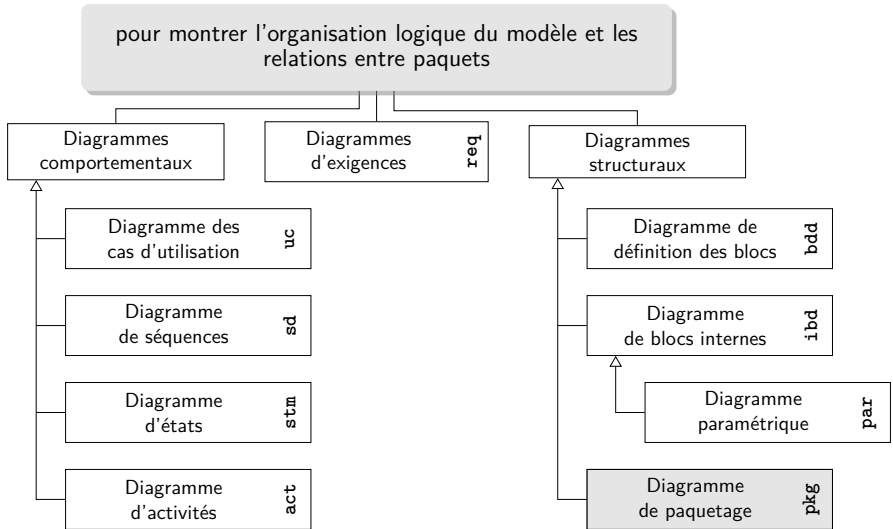
Langage commun de modélisation (SysML)



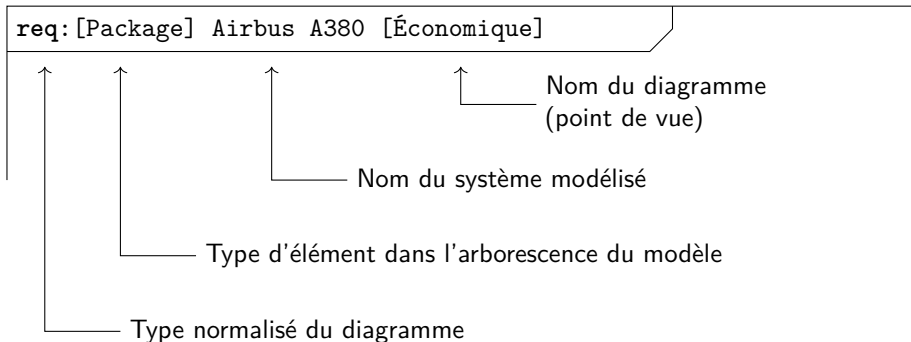
Langage commun de modélisation (SysML)



Langage commun de modélisation (SysML)



Exemple de cartouche d'un diagramme SysML





Analyse fonctionnelle

Analyse fonctionnelle

Objectif appréhender le fonctionnement d'un système en vue de le concevoir, de l'améliorer ou de diagnostiquer l'origine de ses dysfonctionnements.

Intérêt permet d'identifier les exigences auxquelles répond le système, la matière d'œuvre sur laquelle il agit, les fonctions internes ou externes qu'il réalise et de mettre en regard ses fonctions avec les solutions technologiques.

Exemple (Balance de ménage Halo®)

- jusqu'à 4 kg, précision de 1 g ;
- grand choix de couleurs ;
- faible volume (25 cm × 20 cm × 4 cm) ;
- mode de tarage automatique, pesées cumulatives, mode de conversion kg/L ;
- fonctionne avec une pile Cr2032 fournie.



Analyse fonctionnelle

Objectif appréhender le fonctionnement d'un système en vue de le concevoir, de l'améliorer ou de diagnostiquer l'origine de ses dysfonctionnements.

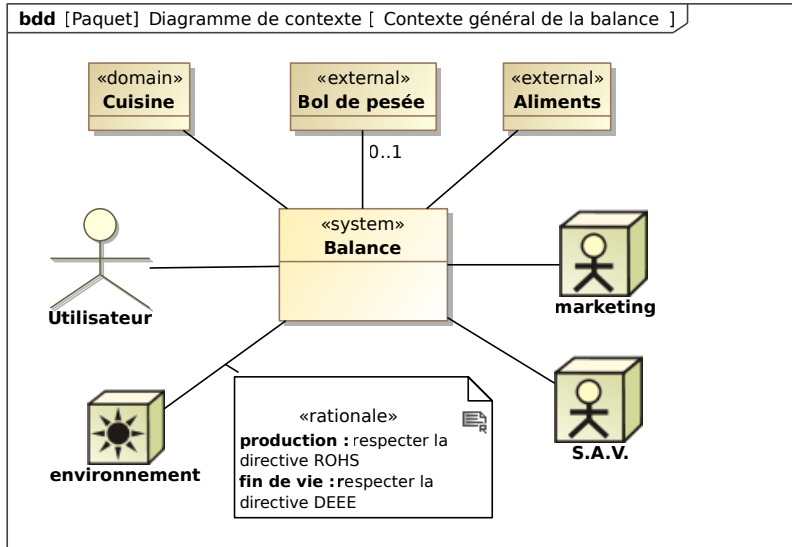
Intérêt permet d'identifier les exigences auxquelles répond le système, la matière d'œuvre sur laquelle il agit, les fonctions internes ou externes qu'il réalise et de mettre en regard ses fonctions avec les solutions technologiques.

Exemple (Balance de ménage Halo®)

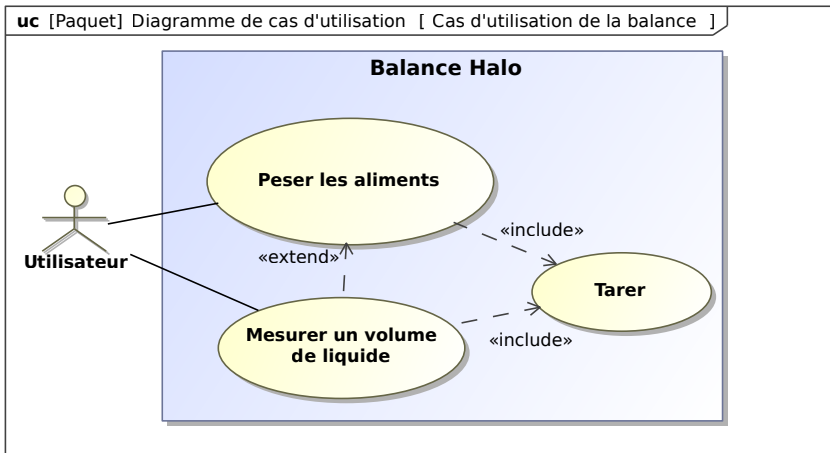
- jusqu'à 4 kg, précision de 1 g ;
- grand choix de couleurs ;
- faible volume (25 cm × 20 cm × 4 cm) ;
- mode de tarage automatique, pesées cumulatives, mode de conversion kg/L ;
- fonctionne avec une pile Cr2032 fournie.



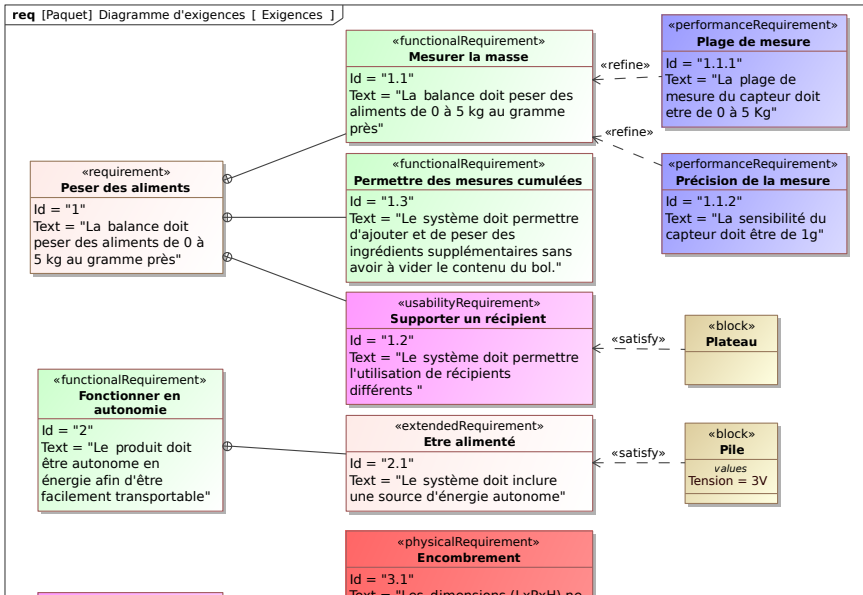
Frontière et contexte d'étude



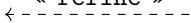
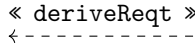
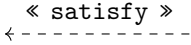
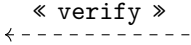
Cas d'utilisation



Exigences



■ Différents liens du diagramme d'exigences

Symbole	Lien	Description
	Contenance	Précise la décomposition d'une exigence principale (coté $\oplus$) en exigences unitaires.
	Raffinement	L'exigence pointée par la flèche est précisée par celle à l'autre extrémité.
	Dérivation	L'exigence en queue de flèche dérive de celle pointée.
	Satisfaction	L'exigence pointée par la flèche est satisfaite par l'élément (bloc) en queue de flèche.
	Vérification	L'exigence pointée par la flèche peut être vérifiée par le test (TestCase) en queue de flèche.

Cahier des charges fonctionnel

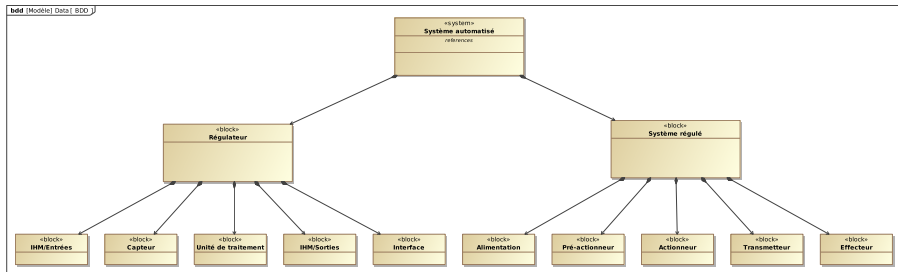
Fonctions	Critères	Niveaux	Flexibilité
Peser des aliments	Plage de mesure	0 à 5 kg	0
	Précision de mesure	1 g	0
Fonctionner en autonomie	Tension continue	0 à 12 V	1
	Batterie(s)	Standard	0
Faciliter le rangement	Encombrement (L×P×H)	25 × 20 × 2 cm	1
	Masse	< 2 kg	1
Résister au milieu ambiant	Humidité relative	5 à 95 %	1
	Température	-10 à 45 °C	1
Plaire à l'utilisateur	Coloris		2
	Formes arrondies	Rayons > 2 mm	2



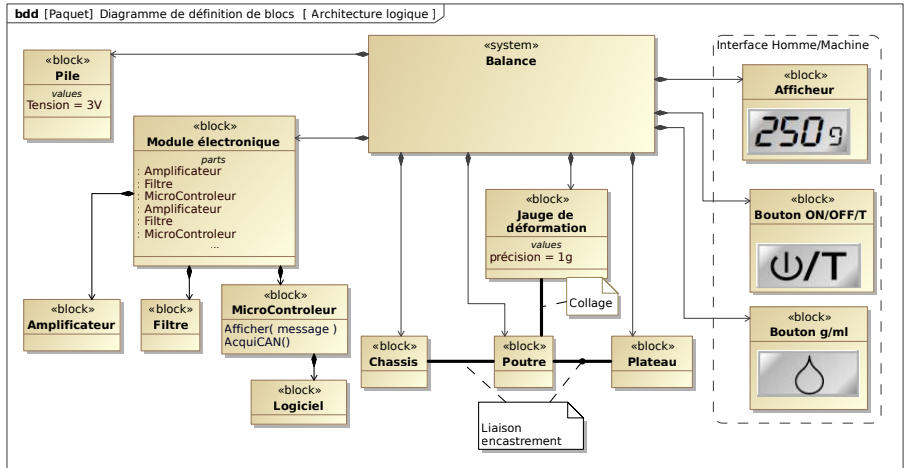
Analyse structurelle

■ Systèmes complexes

- quasiment tous automatisés ;
- une partie opérative = système régulé
- une partie commande = régulateur



Architecture logique, composition

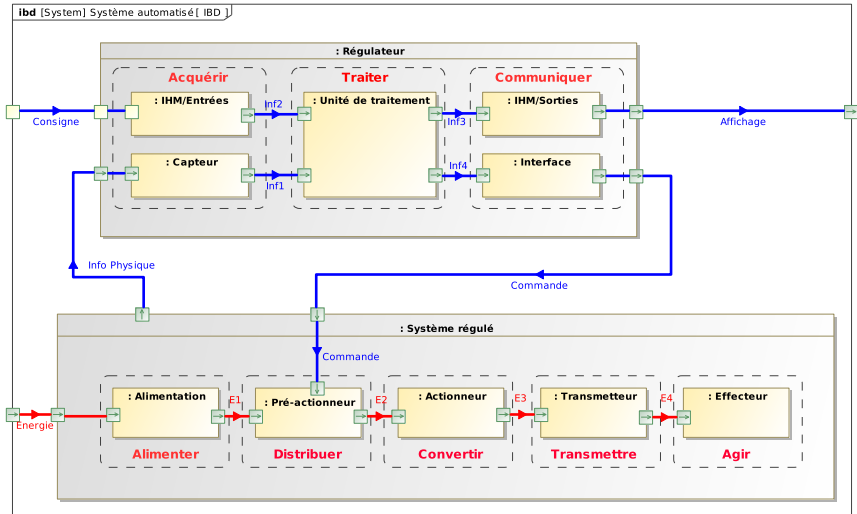


■ Différents liens du diagramme de définition des blocs

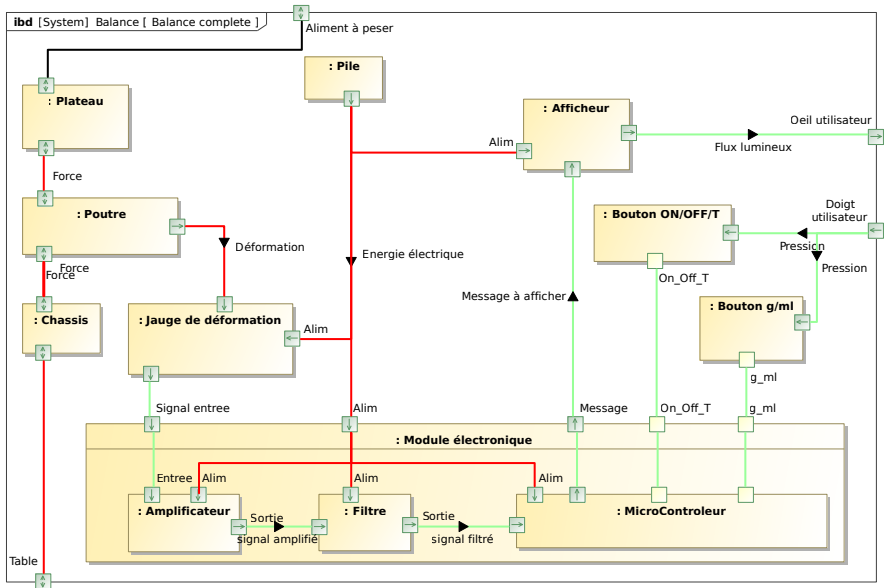
Symbole	Lien	Description
	Composition	Le bloc conteneur (coté ) a nécessairement besoin du bloc contenu (coté ) pour fonctionner.
	Agrégation	Le bloc conteneur (coté ) n'a pas nécessairement besoin du bloc contenu (coté ) pour fonctionner : c'est une « option ».
	Dérivation	Les blocs n'ont pas de relation hiérarchique.

Architecture fonctionnelle, flux & interactions

- une chaîne d'information associée à la commande par le régulateur
- une chaîne d'énergie associée à la partie opérative du système



Architecture fonctionnelle, flux & interactions



Flux d'énergie, puissance

Domaine	Effort	Flux
Électrotechnique	Tension U en V	Courant I en A
Mécanique de translation	Force F en N	Vitesse V en m/s
Mécanique de rotation	Couple C en N·m	Vitesse de rotation ω en rad/s
Hydraulique – Pneumatique	Pression P en Pa	Débit Q en m ³ /s
Thermique	Température T en °C	Flux d'entropie $\dot{Q}$ en W/°C



N. Mesnier, lycée Jean Perrin, Lyon