

# MPSI PCSI

*Patrick Beynet*

*Christian Collignon*

*Christophe Durant*

*Maxime Girot*

*Éric Laumonier*

*Olivier Tourvieille*

PRÉPAS SCIENCES

COLLECTION DIRIGÉE PAR BERTRAND HAUCHECORNE

# SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

- Objectifs
- Cours résumé
- Méthodes
- Vrai/faux, erreurs classiques
- Exercices de base et d'approfondissement
- Sujets de concours (écrits, oraux)
- Corrigés détaillés et commentés

**3<sup>e</sup> édition  
actualisée**



**Sciences  
industrielles  
de l'ingénieur  
MPSI – PCSI**



**PRÉPAS SCIENCES**

collection dirigée par Bertrand Hauchecorne

# Sciences industrielles de l'ingénieur

## MPSI – PCSI

**3<sup>e</sup> édition actualisée**

ouvrage coordonné par

**Patrick BEYNET**

*Professeur au lycée Rouvière (Toulon)*

**Christian COLLIGNON**

*Professeur au lycée Gustave Eiffel (Dijon)*

**Maxime GIROT**

*Professeur au lycée de Bellevue  
(Fort-de-France)*

**Christophe DURANT**

*Professeur au lycée Clemenceau (Nantes)*

**Éric LAUMONIER**

*Professeur au lycée Henri Moissan (Meaux)*

**Olivier TOURVIEILLE**

*Professeur au lycée Étienne Mimard (Saint-Étienne)*



# COLLECTION PRÉPAS SCIENCES

Retrouvez tous les titres de la collection et des extraits sur [www.editions-ellipses.fr](http://www.editions-ellipses.fr)



*Un étudiant n'est pas un sac que l'on remplit mais une bougie que l'on enflamme.*

Vladimir Arnold

ISBN 9782340-023352  
© Ellipses Édition Marketing S.A., 2018  
32, rue Bargue 75740 Paris cedex 15



Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5.2° et 3°a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

[www.editions-ellipses.fr](http://www.editions-ellipses.fr)

# Avant-propos

**Réussir en classes préparatoires** nécessite d'assimiler rapidement un grand nombre de connaissances, mais surtout de savoir les utiliser, à bon escient, et les rendre opérationnelles au moment opportun. Bien sûr, l'apprentissage du cours de votre professeur jour après jour est indispensable. Cependant, on constate que pour beaucoup, c'est loin d'être suffisant. Combien d'entre vous ont bien appris leur cours et pourtant se trouvent démunis lors d'un devoir, et plus grave, le jour du concours.

Cette collection a été conçue pour répondre à cette difficulté. Suivant scrupuleusement le programme, chaque ouvrage est scindé en chapitres, dont chacun correspond, en gros, à une semaine de cours. Leur structure est identique pour chaque niveau, en sciences industrielles pour l'ingénieur comme en mathématiques, physique ou chimie.

**Le résumé de cours** est là pour vous remettre en mémoire tous les résultats à connaître. Sa relecture est indispensable avant un devoir, le passage d'une colle relative au thème traité et lors des révisions précédant les concours. Ils sont énoncés sans démonstration.

**La partie « méthodes »** vous initie aux techniques utiles pour résoudre les exercices classiques. Complément indispensable du cours, elle l'éclaire et l'illustre.

**La partie « vrai/faux »** permet de tester votre recul par rapport au programme et de vous révéler les mauvais réflexes à rectifier. Son corrigé est l'occasion de mettre en garde contre des **erreurs classiques**.

**Les exercices** sont incontournables pour assimiler le programme et pour répondre aux exigences du concours. Des **indications**, que les meilleurs pourront ignorer, permettront de répondre aux besoins de chacun, selon son niveau. Les **corrigés** sont rédigés avec soin et de manière exhaustive.

Ainsi l'ouvrage de SII comme ceux de physique, de chimie et de maths vous accompagneront tout au long de l'année et vous guideront dans votre cheminement vers **la réussite aux concours**.

Bertrand Hauchecorne



# Sommaire

1. La spécification du besoin .....	1
2. Architectures fonctionnelle et structurelle .....	35
3. Introduction aux systèmes asservis.....	69
4. Modélisation des systèmes linéaires continus et invariants .....	95
5. Modélisation des SLCI asservis et schémas bloc .....	121
6. Réponse temporelle des SLCI .....	149
7. Étude fréquentielle des SLCI .....	177
8. Identification des SLCI .....	209
9. Position et orientation relative de deux solides indéformables .....	237
10. Vitesse et accélération .....	263
11. Torseur distributeur des vitesses .....	293
12. Applications de cinématique graphique .....	325
13. Modélisation cinématique des liaisons .....	355
14. Mécanismes .....	387
15. Quelques transmetteurs de puissance simples .....	417
16. Modélisation des actions mécaniques .....	447
17. Résolution d'un problème de statique .....	477
18. Cas de forces coplanaires : résolution graphique .....	507
19. Les systèmes logiques .....	537
20. Les systèmes à évènements discrets .....	563
21. Les outils de communication technique.....	595
Table de notations .....	633
Unités .....	637





# Chapitre 1

# La spécification du besoin

Le **paquebot France** est sorti des Chantiers de l'Atlantique, à Saint-Nazaire ; il est mis en service en janvier 1962 avec le Havre pour port d'attache. Sa construction mobilise durant quatre ans de nombreuses entreprises nationales. Long de 315 m, il pèse environ 60 000 tonnes et sa puissance est de l'ordre de 160 000 ch. Il peut embarquer près de 2 000 passagers et 1 000 membres d'équipage qu'il peut emmener en cinq jours de l'autre côté de l'Atlantique. Il dispose de superstructures en alliage léger d'aluminium et d'une coque presque entièrement soudée ce qui lui permet d'atteindre la vitesse de 31 nœuds à l'aide de ses 4 hélices de 5,8 m de diamètre.



Devenu peu rentable, il est vendu en 1974 puis finalement démantelé fin 2009 en Inde.

## ■■ Objectifs

### ■ Ce qu'il faut connaître

- ▷ Les notions de système, besoin, acteurs et interactions
- ▷ Les différents types de fonction
- ▷ La définition des exigences, du cahier des charges fonctionnel et de sa spécification
- ▷ Le diagramme des exigences
- ▷ Le diagramme des cas d'utilisation
- ▷ Le diagramme de séquence.

### ■ Ce qu'il faut savoir faire

- ▷ Isoler un système et décrire le besoin
- ▷ Présenter la fonction globale
- ▷ Traduire un besoin fonctionnel en exigences
- ▷ Définir les domaines d'application, les critères technico-économiques
- ▷ Définir les éléments influents du milieu extérieur
- ▷ Qualifier et quantifier les exigences (critère, niveau)
- ▷ Décrire le comportement attendu d'un système.

## ■ La spécification des exigences

### □ Système, besoin et exigences

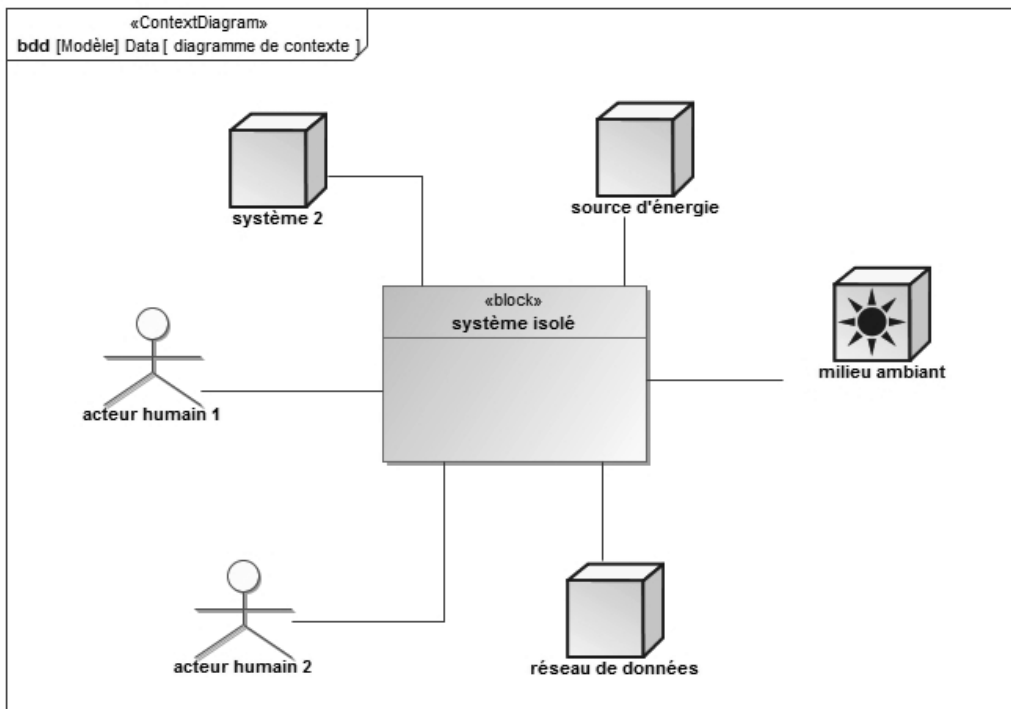
Un **système technique** est un ensemble fonctionnel permettant de répondre à un **besoin**. Il doit satisfaire à des **exigences**. Celles-ci peuvent être liées à des performances (vitesse, effort, etc.), à des contraintes induites par l'utilisation de certains constituants (type d'énergie, tension d'alimentation, etc.), le milieu ambiant (humidité, température, etc.), et bien d'autres choses.

### □ Acteurs et interactions

L'isolement du système technique permet de délimiter une frontière d'étude.

Il est alors possible de définir les **interactions** entre le système et son milieu extérieur. Les **acteurs** qui représentent ce dernier, peuvent être de nature humaine, une source d'énergie, des objets, un réseau de données, etc.

Le **diagramme de contexte** est un diagramme particulier de définition de blocs (blocks definition diagram ou **bdd**) SysML (voir chapitre 2) qui n'est pas normalisé. Il permet de montrer de manière synthétique système, acteurs et interactions sans les détailler.



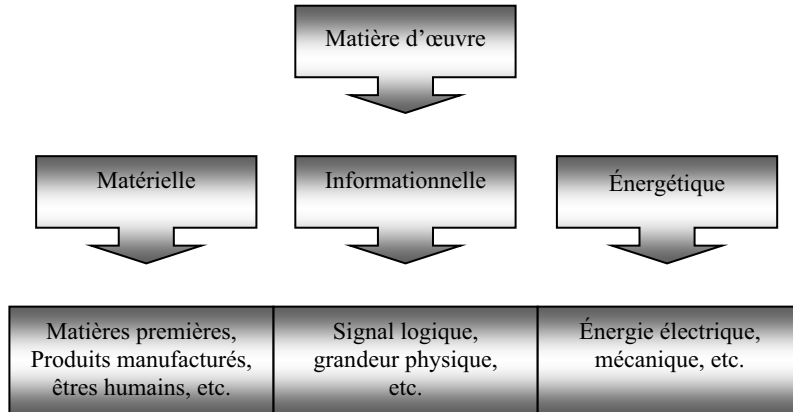
⇒ Méthode 1.1. Lecture et construction d'un diagramme de contexte

## □ Fonctions

Le système technique assure une **fonction de service globale** en agissant sur une ou plusieurs **matières d'œuvre** afin de créer une **valeur ajoutée**.

Une fonction est un verbe d'action à l'infinifitif (déplacer, traiter, acquérir, transformer, etc.) parfois suivi d'un complément.

La matière d'œuvre est un élément d'entrée sur lequel s'exercent les activités du système. Elle peut être de différents types, c'est le triptyque Matière / Information / Énergie :



On peut classer les fonctions réalisées en plusieurs catégories :

- les fonctions de service (FS) qui définissent les actions essentielles du système répondant au besoin de l'utilisateur ;
- les fonctions techniques (FT) qui dépendent des solutions technologiques utilisées pour réaliser les fonctions de service. Elles sont en général ignorées par l'utilisateur.

## □ Critères d'appréciation, niveau et flexibilité

Les **critères** permettant d'apprécier un système sont notamment liés aux caractéristiques techniques (tension d'alimentation, énergies, etc.), aux performances (force, vitesse, temps pour passer de 0 à 100 km/h, etc.), à l'esthétique (notion très subjective), mais aussi à l'usage (fiabilité, durée de vie, coût global de possession, etc.).

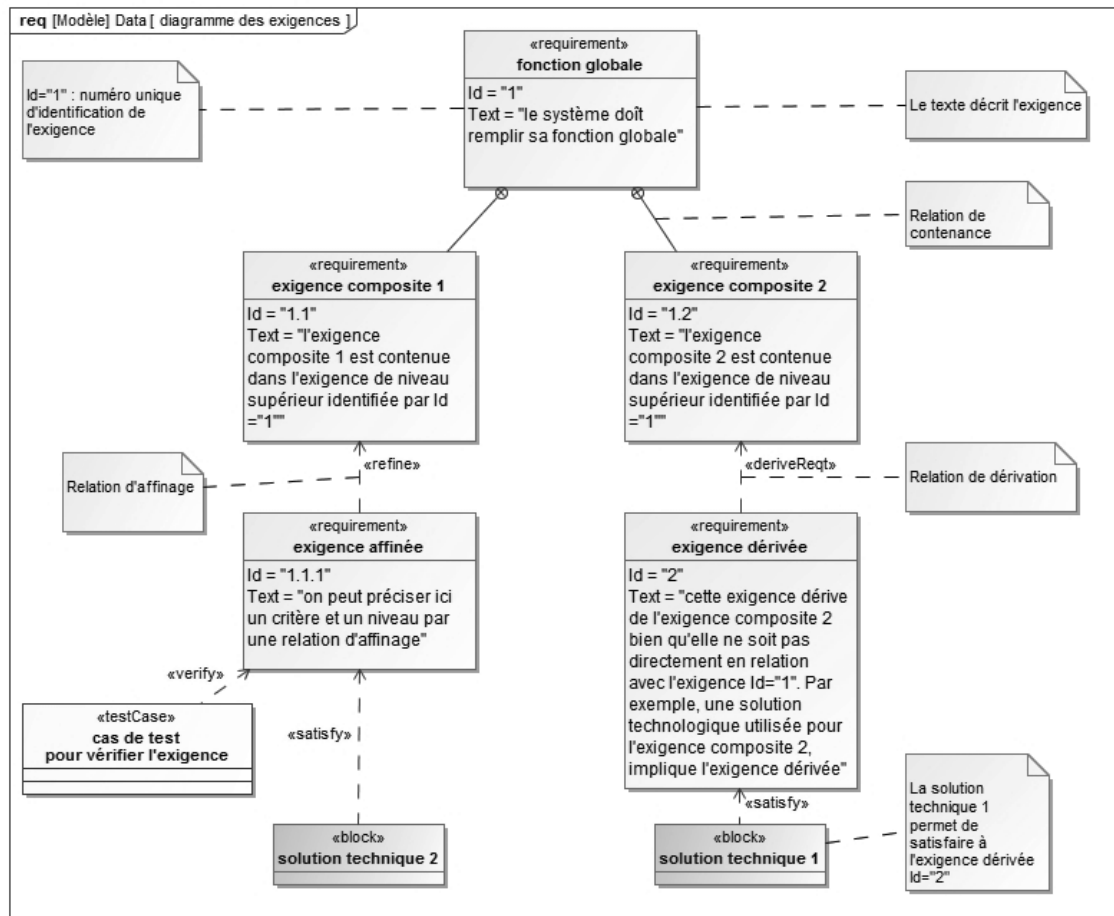
Le **niveau** permet de quantifier un critère en indiquant une valeur, un intervalle, une norme, etc.

La **flexibilité** donne une indication sur la marge de manœuvre laissée au concepteur.

## □ Diagramme des exigences

Le diagramme des exigences (requirements diagram ou **req**) est un diagramme SysML normalisé. Il montre notamment les exigences, leur hiérarchie et les relations qui les lient.

Il peut également indiquer les solutions techniques retenues, des tests en cours de validation, etc.



⇒ Méthode 1.2. Lecture et construction d'un diagramme des exigences

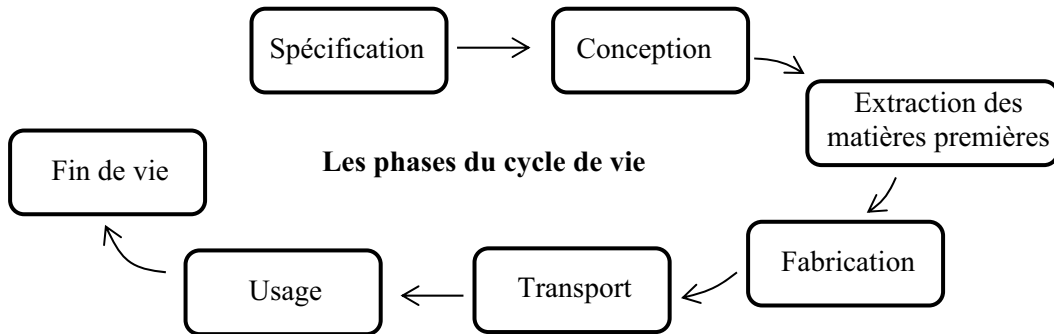
### □ Cahier des charges fonctionnel (CdCF)

C'est un document par lequel le demandeur exprime son besoin (ou celui qu'il est chargé de traduire) en terme de **fonctions de services** ou d'**exigences**. Pour chacune d'elles sont définis des critères d'appréciation et leurs niveaux. Chacun de ces niveaux doit être assorti d'une flexibilité (norme AFNOR X 50-150).

Exigences	Critères	Niveaux	Flexibilités
Exigence "1.1.1 "	Critère a	Niveau 1	nulle
	Critère b	Niveau 2	faible
Exigence "2"	Critère c	Niveau 3	moyenne

## ■ La spécification des cas d'utilisation

### □ Cycle de vie

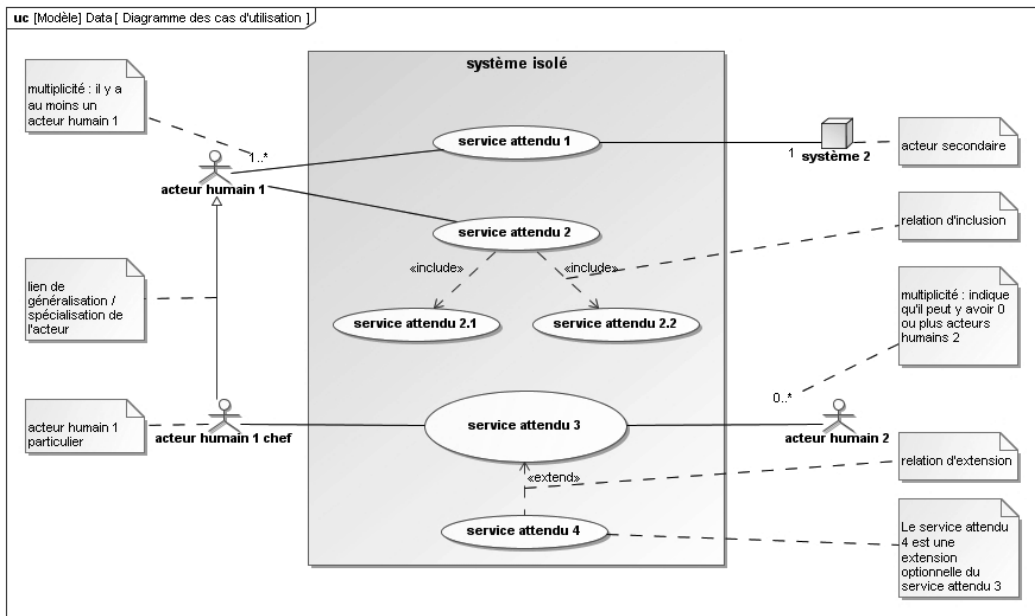


Chaque étape est caractérisée par des exigences, des contraintes et des risques propres. Leur expression et leur caractérisation lors de l'étape initiale de spécification, sont des points clés pour la réussite et l'avenir du système. Dans certains types de produits ou systèmes, on peut aussi mettre en évidence les phases d'étude de marché, de maintenance, etc.

### □ Diagramme des cas d'utilisation

Un **cas d'utilisation** est un **service attendu** par un acteur à l'aide du système. Il peut y en avoir plusieurs dans une phase du **cycle de vie**.

Le **diagramme des cas d'utilisation** (uses case diagram ou **uc**) est un diagramme normalisé SysML de haut niveau montrant les fonctionnalités ainsi que les relations entre le système et ses acteurs. Il n'est ici pas question de savoir comment ces dernières sont réalisées.



⇒ Méthode 1.3. Lecture et construction d'un diagramme des cas d'utilisation

## □ Le diagramme de séquence

Afin de détailler les interactions montrées dans un diagramme des cas d'utilisation, il est possible de construire un **diagramme de séquence** (sequence diagram ou **sd**) normalisé SysML. L'activité de chaque acteur d'un cas d'utilisation, est représentée sur une **ligne de vie** verticale.

Il en est de même pour le système étudié ou des sous-parties de celui-ci.

Les échanges de messages sont liés à des **événements**, ils sont représentés par des flèches. Il peut y avoir des **messages asynchrones** (flèche évidée :  $\longrightarrow$ ) qui n'attendent aucun retour. D'autres sont **synchrones** (flèche pleine :  $\longrightarrow$ ), et nécessitent un retour d'information tracé alors en pointillés ( $\dashrightarrow$ ).

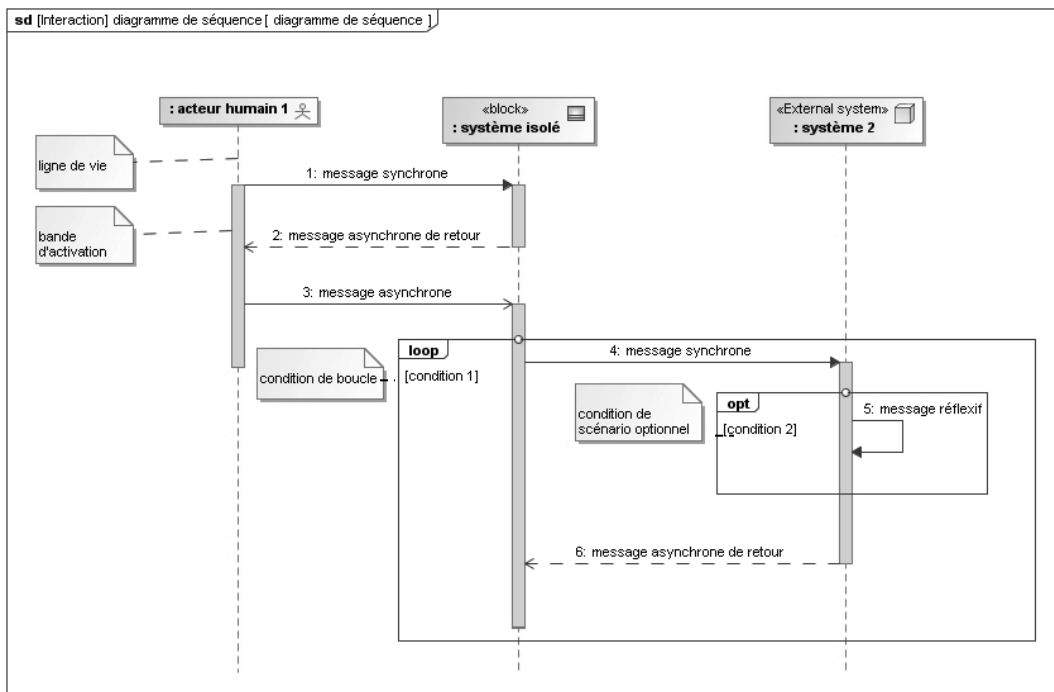
Un **message réflexif** permet de montrer une activité interne pendant un certain temps par exemple.

Il n'y a pas d'échelle de temps à respecter, on montre uniquement la chronologie des activités et des événements. Une **bande d'activation** verticale optionnelle peut être indiquée sur la ligne de vie, pour montrer les périodes d'activité des acteurs concernés.

Pour des scénarios complexes, des **fragments combinés** sont disponibles.

On trouve notamment :

- « **par** » : plusieurs scénarios se déroulent en parallèle ;
- « **loop** » : le scénario est à répéter en boucle tant qu'une condition est vraie ;
- « **opt** » : un scénario optionnel est possible selon une condition ;
- « **alt** » : plusieurs scénarios différents sont envisageables selon des conditions ;
- « **ref** » : un scénario est référencé. Il est décrit séparément.



⇒ **Méthode 1.4. Lecture et construction d'un diagramme de séquence**



## ■ Comment spécifier les exigences d'un système technique ?

### □ Méthode 1.1. Lecture et construction d'un diagramme de contexte

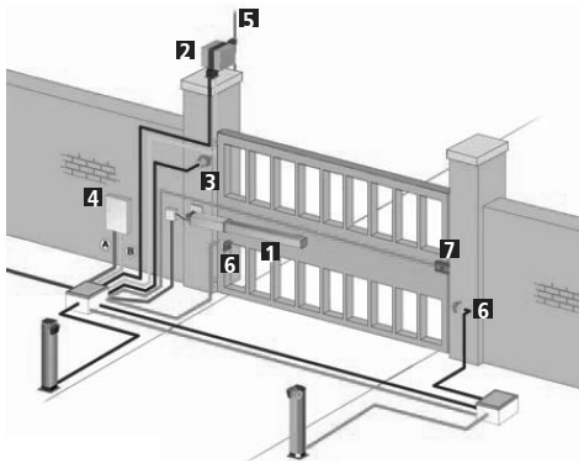
Pour décrire le contexte d'utilisation d'un système, il faut tout d'abord définir la phase du cycle de vie considérée. En général, nous nous placerons en phase d'utilisation. Ensuite, il faut effectuer un isolement fictif et recenser les différents acteurs présentant des interactions avec le système, c'est-à-dire ayant une influence sur son comportement. Les liens montrent des échanges, qui à ce niveau de l'étude ne sont pas encore définis.

⇒ Exercices 1.1, 1.2 et 1.3

*Exemple : système de portail automatique FAAC*

L'ouverture et la fermeture du portail d'une propriété peuvent être particulièrement contraignantes. Il est donc intéressant d'avoir la possibilité d'une manœuvre automatique du portail par les personnes habilitées.

L'organisation structurelle du système automatisé FAAC est la suivante :

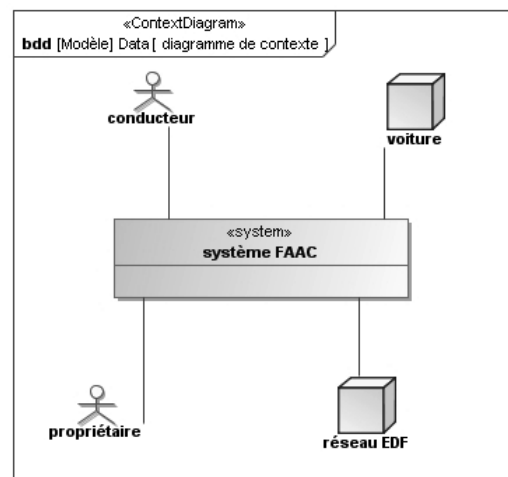


- 1 : Actionneur FAAC 402
- 2 : Lampe clignotante
- 3 : Bouton poussoir à clé
- 4 : Armoire de commande
- 5 : Antenne H.F.
- 6 : Cellules photoélectriques
- 7 : Serrure électrique

En phase d'utilisation normale, on peut recenser les principaux acteurs :

- le conducteur de la voiture ;
- la voiture ;
- le propriétaire de la maison ;
- le réseau EDF.

Selon le niveau de détail souhaité, il est possible de rajouter des acteurs comme le milieu physique ambiant, le mur, etc.

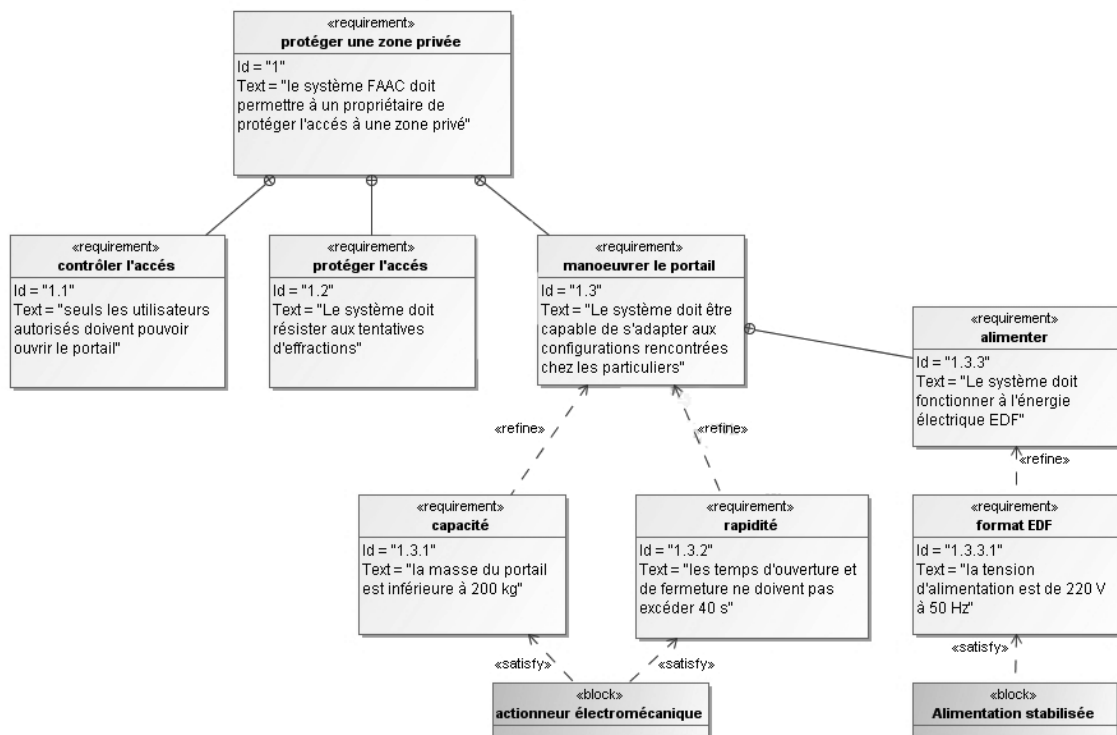


## □ Méthode 1.2. Lecture et construction d'un diagramme des exigences

La recherche des exigences auxquelles un système doit satisfaire, se fait souvent selon un raisonnement qui va du général au particulier. Sur un diagramme, il est souvent d'usage d'écrire une description de haut en bas. Les chiffres d'identification, permettent aussi de juger du niveau hiérarchique d'une exigence. Au fil de la constitution du cahier des charges et des solutions technologiques adoptées, de nombreuses exigences de niveau inférieur ou dérivées peuvent émerger. Dans le cadre des concours, pour simplifier la compréhension d'une problématique, nous ne traiterons que des exigences principales ou de sous-parties de cahier des charges.

⇒ Exercices 1.2 et 1.3

Exemple : système de portail automatique FAAC



Exigences	Critères	Niveaux
Exigence "1.3.1 "	Masse	200 kg
Exigence "1.3.2"	Temps d'ouverture Temps de fermeture	40 s 40 s
Exigence "1.3.3.1"	Énergie électrique	220 V – 50 Hz

## ■ Comment spécifier les cas d'utilisation d'un système technique ?

### □ Méthode 1.3. Lecture et construction d'un diagramme des cas d'utilisation

Les cas d'utilisation sont placés dans des bulles. Ils représentent des fonctionnalités attendues. Il est d'usage de placer les acteurs secondaires lorsqu'ils existent à droite du diagramme.

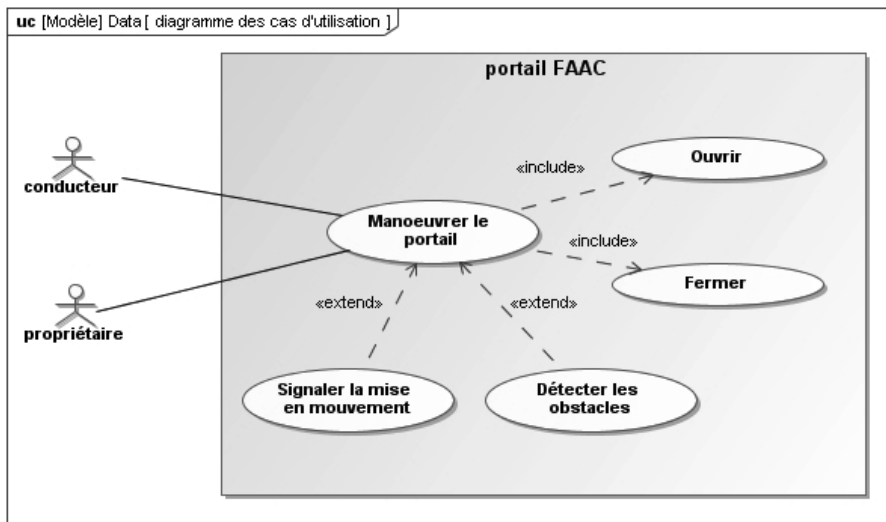
Des indices de multiplicités peuvent être indiqués, ils sont facultatifs.

Il n'y a pas de chronologie des cas d'utilisation selon leur position dans le diagramme. Les services attendus peuvent se faire successivement, en parallèle, dans un ordre quelconque, selon les occurrences d'évènements extérieurs et les lois de commande.

Il n'est pas conseillé d'indiquer un nombre important de cas d'utilisation afin de préserver la facilité de lecture du diagramme.

⇒ Exercices 1.4 et 1.5

*Exemple : système de portail automatique FAAC*



« Manœuvrer le portail » fait apparaître par extension deux services attendus qui ne sont pas obligatoires pour le besoin primaire : « Signaler la mise en mouvement » et « Détecter les obstacles ».

Pour le cas d'utilisation « Détecter les obstacles », il est envisageable d'indiquer un lien avec des acteurs secondaires qui seraient « voiture » ou « piéton » par exemple. Attention à ne pas surcharger le diagramme, cela reste un outil de communication. Les liens essentiels sont ceux que l'on détaillera avec un diagramme de séquence par exemple, c'est-à-dire ceux pour lesquels il y a des échanges. Les cas d'utilisation « Ouvrir » et « Fermer » ne sont pas indispensables à ce niveau de représentation.

## ❑ Méthode 1.4. Lecture et construction d'un diagramme de séquence

La chronologie se lit du haut vers le bas. En général, l'échelle du temps n'est pas respectée sur une ligne de vie. On privilégie la succession d'évènements.

Tous les échanges entre système et acteurs ne sont pas forcément représentés sur un diagramme unique.

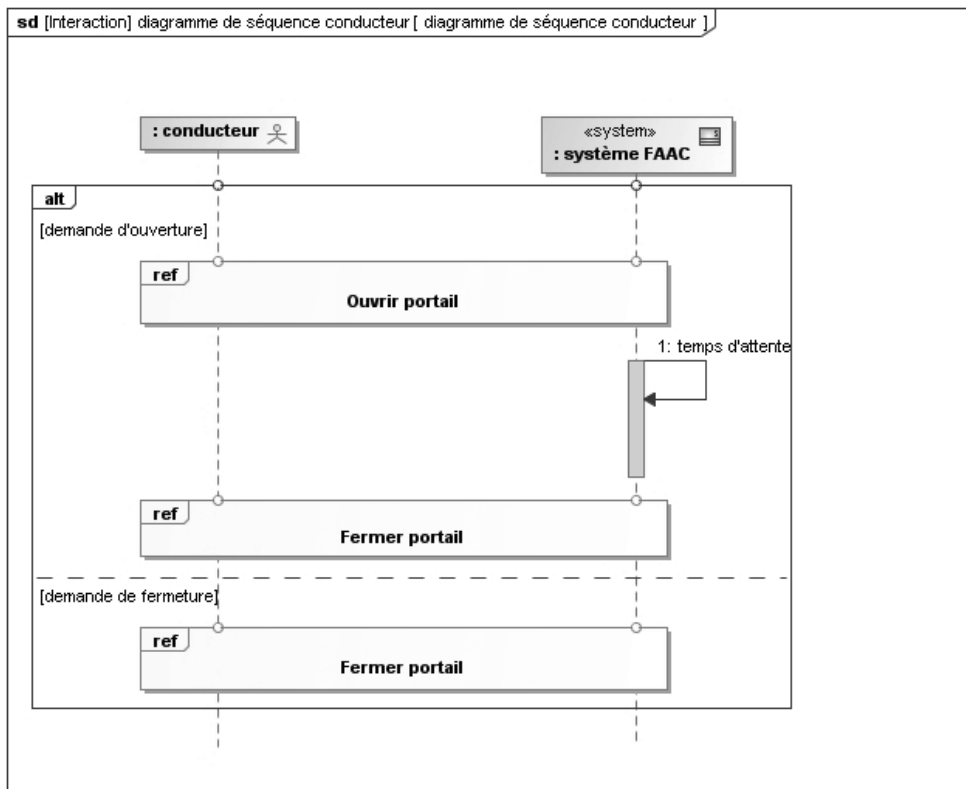
La représentation modulaire à l'aide du fragment combiné « ref » permet de structurer la communication en plusieurs graphes.

La connaissance du formalisme normalisé du diagramme de séquence est essentielle à la bonne compréhension du comportement attendu.

⇒ Exercices 1.5, 1.6 et 1.7

*Exemple : système de portail automatique FAAC*

Le cas d'utilisation « Manœuvrer le portail » peut dans un premier temps être décrit comme suit pour l'acteur « conducteur » :



Deux choix sont possibles suivant la demande d'ouverture ou de fermeture.

L'ouverture est suivie automatiquement d'une fermeture après un temps d'attente.

Le fragment combiné « Ouvrir portail » peut être décrit séparément comme sur la page suivante.

Un signal lumineux clignotant permet d'avertir le conducteur de la mise en mouvement imminente. Il durera jusqu'à la fin du mouvement.  
 En parallèle, après un bref délai d'attente, une temporisation réglable permet de définir le temps de fonctionnement de l'actionneur électromécanique.  
 Enfin, après un temps d'attente, le portail se referme automatiquement.

