PTSI

Patrick Beynet
Christian Collignon
Laurent Deschamps
Christophe Durant
Maxime Girot
François Jeay
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

3e édition

NOUVEAUX PROGRAMMES !

ellipses

Sciences industrielles de l'ingénieur

PTSI

PRÉPAS SCIENCES
collection dirigée par Bertrand Hauchecorne

Sciences industrielles de l'ingénieur

PTSI

3e édition

NOUVEAUX PROGRAMMES

ouvrage coordonné par

Patrick BEYNET
Professeur au lycée Rouvière (Toulon)

Christian COLLIGNON
Professeur au lycée Gustave Eiffel (Dijon)

Laurent DESCHAMPS
Professeur au lycée Rouvière (Toulon)

Christophe DURANT
Professeur au lycée Clemenceau (Nantes)

Maxime GIROT
Professeur au lycée de Bellevue (Fort-de-France)

François JEAY
Professeur au lycée Rouvière (Toulon)

Olivier TOURVIEILLE
Professeur au lycée Étienne Mimard (Saint-Étienne)

ellipses

COLLECTION
PRÉPAS SCIENCES

Retrouvez tous les titres de la collection et des extraits sur 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 9782340-048492
© Ellipses Édition Marketing S.A., 2021
8/10 rue la Quintinie 75015 Paris

DANGER LE PHOTOCOPILLAGE TUE LE LIVRE

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

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 remédier à quelques mauvais réflexes. 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 sciences industrielles pour l'ingénieur comme ceux de physique, de chimie et de mathématiques 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.	Les outils de communication technique	65
4.	La représentation géométrique normalisée	99
5.	La spécification géométrique des pièces mécaniques	135
6.	Introduction aux systèmes asservis	169
7.	Modélisation des systèmes linéaires continus et invariants	195
8.	Modélisation des S.L.C.I. asservis et schémas blocs	221
9.	Réponse temporelle des S.L.C.I.	249
10.	Étude fréquentielle des S.L.C.I.	279
11.	Identification des S.L.C.I.	311
12.	Performances des S.L.C.I.	339
13.	Position et orientation relative de deux solides indéformables	373
14.	Vitesse et accélération	399
15.	Torseur distributeur des vitesses	429
16.	Modélisation cinématique des liaisons	461
17.	Étude des chaînes de solides (Partie 1)	493
18.	Quelques transmetteurs de puissance simples	523
19.	Modélisation des actions mécaniques	553
20.	Résolution d'un problème de statique	583
21.	Étude des chaînes de solides (Partie 2)	615
22.	Algorithmique	655
23.	Les systèmes à événements discrets	685
24.	Sources et circuits électriques	717
25.	Modélisation des convertisseurs statiques	741
26.	Transmission de données	791
27.	Matériaux	827
28.	L'obtention des pièces brutes	863
29.	Génération de surfaces par enlèvement de matière	899
30.	La liaison encastrement	941
31.	Le guidage en rotation par contacts glissants	975
	Table de notations	1007
	Unités	1011

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 et environnementaux
- Évaluer l'impact environnemental et sociétal
- Définir les éléments influents du milieu extérieur
- Qualifier et quantifier les exigences (critère, niveau)
- Décrire le comportement attendu d'un système.

Résumé de cours

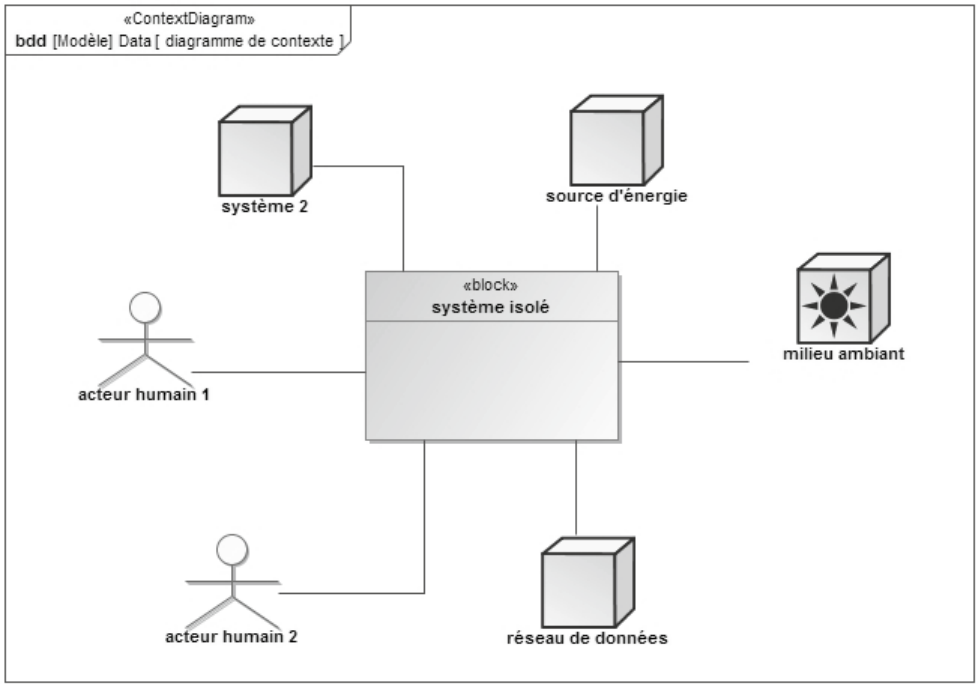
La spécification des exigences

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, etc.), le milieu ambiant (humidité, température, etc.), les normes environnementales (émission CO_2, etc.), et bien d'autres choses.

Acteurs et interactions

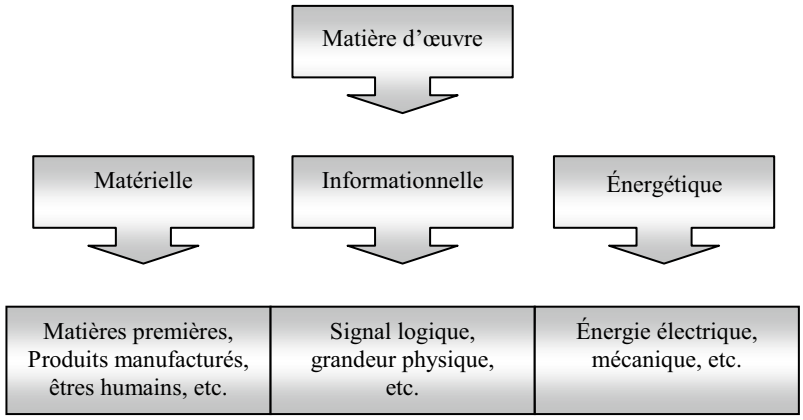
L'isolement du système technique permet de délimiter une frontière d'étude.
Il est alors possible de définir les **interactions** entre le système et son milieu extérieur. Les **acteurs** qui représentent ce dernier, peuvent être de nature humaine, une source d'énergie, des objets, un réseau de données, 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'infinitif (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 :

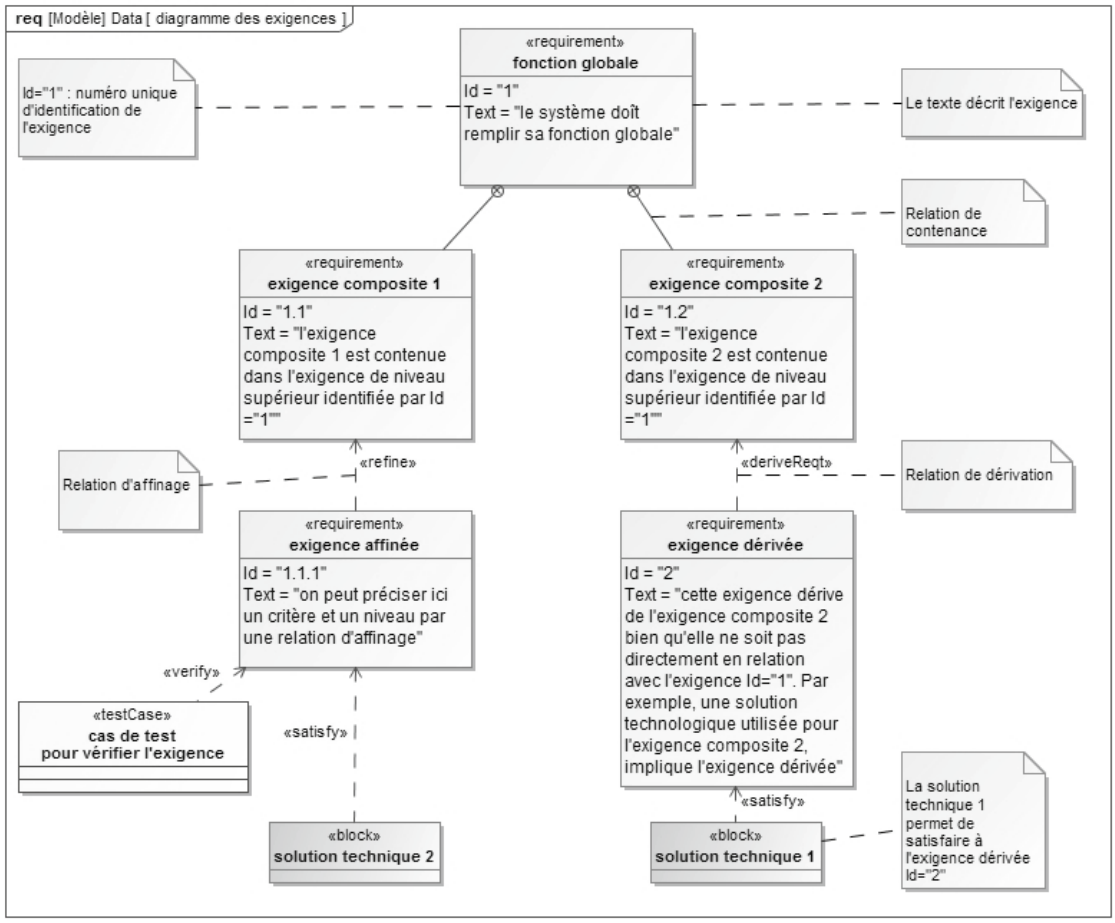
- les fonctions de service (FS) qui définissent les actions essentielles du système répondant au besoin de l'utilisateur ;
- les fonctions techniques (FT) qui dépendent des solutions technologiques utilisées pour réaliser les fonctions de service. Elles sont en général ignorées par l'utilisateur.

❑ 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)

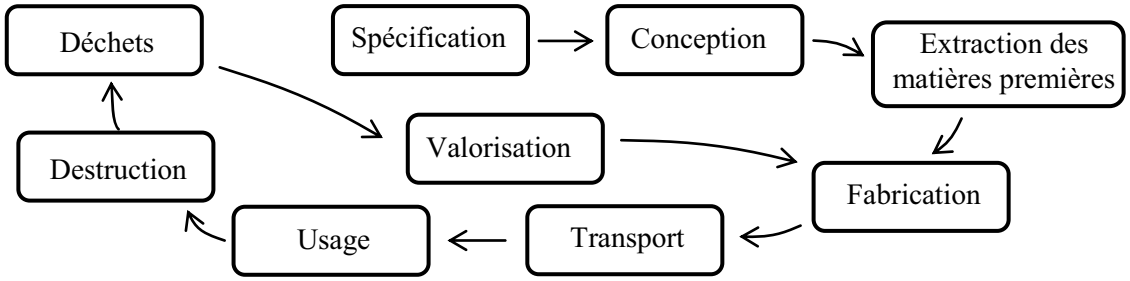
C'est un document par lequel le demandeur exprime son besoin (ou celui qu'il est chargé de traduire) en terme de **fonctions de services** ou d'**exigences**. Pour chacune d'elles sont définis des critères d'appréciation et leurs niveaux. Chacun de ces niveaux doit être assorti d'une flexibilité (norme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

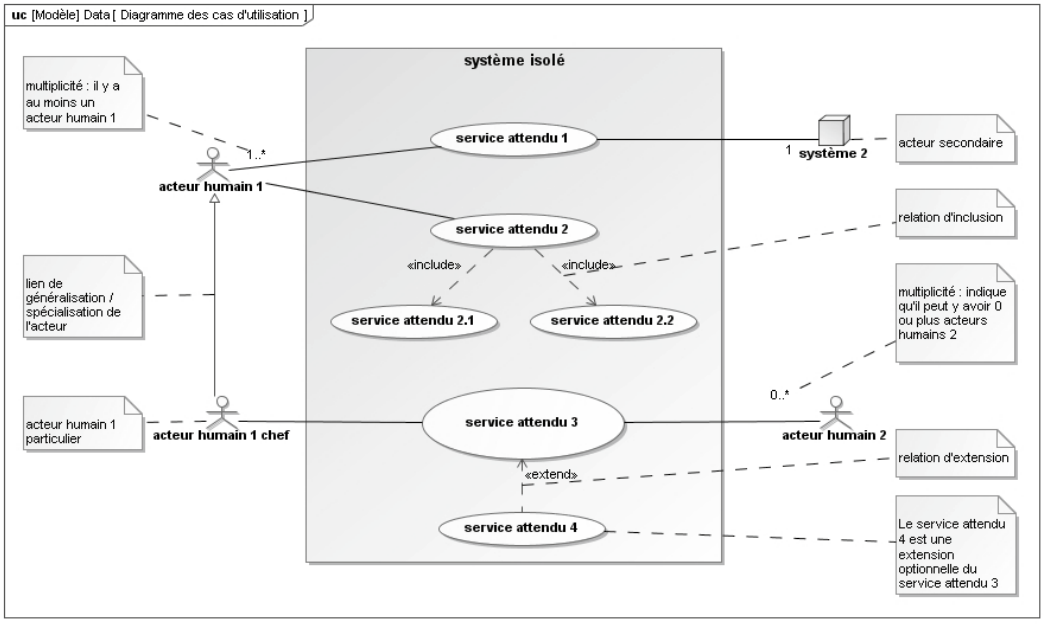
Les phases du cycle de vie



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 **évènements**, ils sont représentés par des flèches. Il peut y avoir des **messages asynchrones** (flèche évidée : ⟶) qui n'attendent aucun retour. D'autres sont **synchrones** (flèche pleine : ⟶), et nécessitent un retour d'information tracé alors en pointillés (- - ≫).

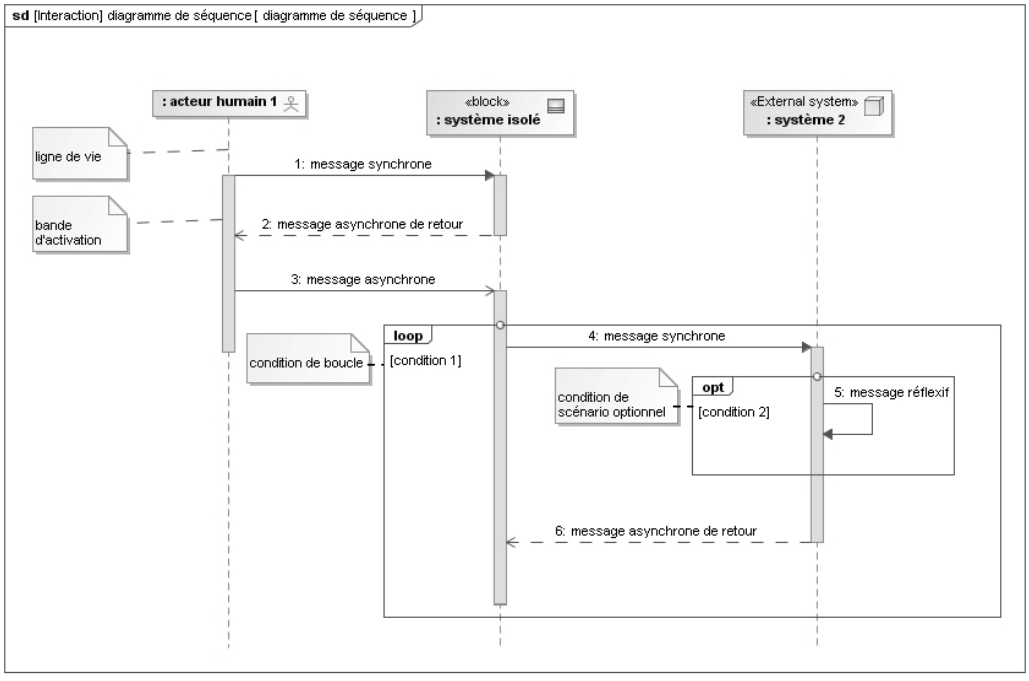
Un **message réflexif** permet de montrer une activité interne pendant un certain temps par exemple.

Il n'y a pas d'échelle de temps à respecter, on montre uniquement la chronologie des activités et des évènements. 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

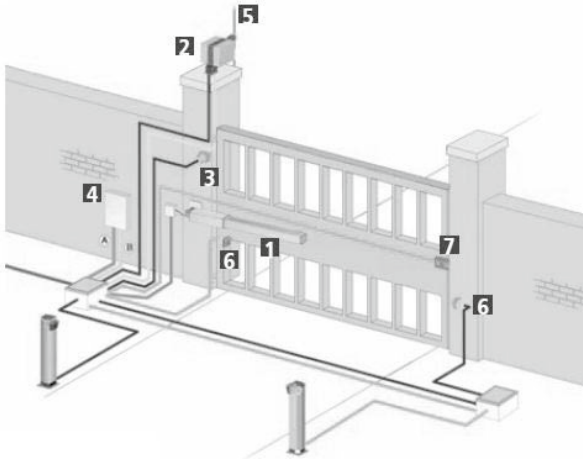
Pour décrire le contexte d'utilisation d'un système, il faut tout d'abord définir la phase du cycle de vie considérée. En général, nous nous placerons en phase d'utilisation. Ensuite, il faut effectuer un isolement fictif et recenser les différents acteurs présentant des interactions avec le système, 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 :

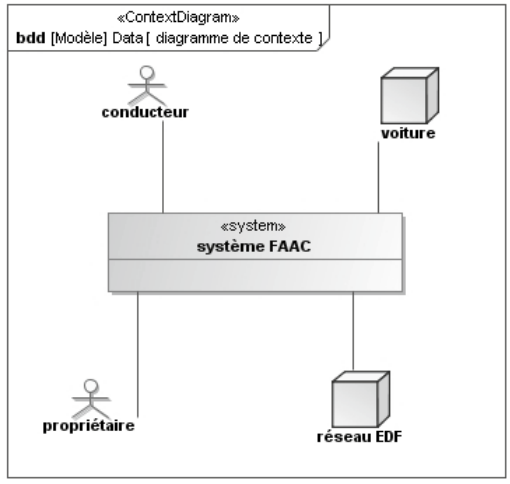


1 : Actionneur FAAC 402
2 : Lampe clignotante
3 : Bouton poussoir à clé
4 : Armoire de commande
5 : Antenne H.F.
6 : Cellules photoélectriques
7 : Serrure électrique

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.

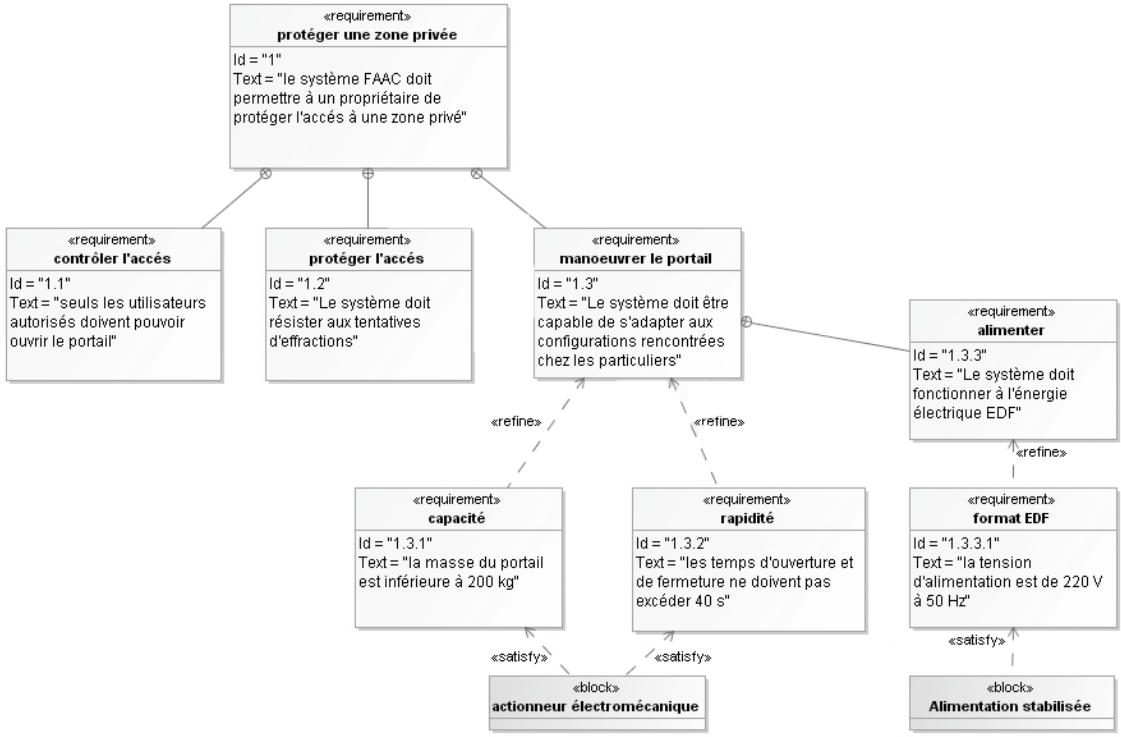


❑ Méthode 1.2. Lecture et construction d'un diagramme des exigences

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

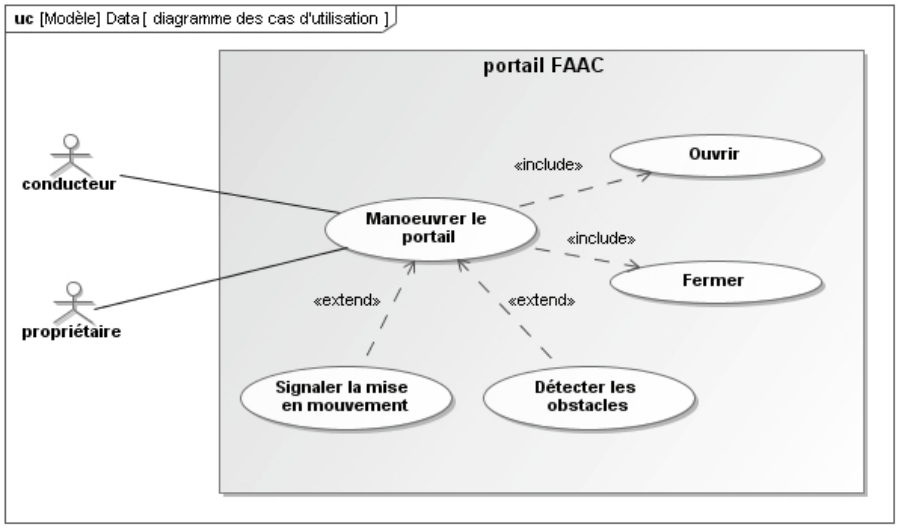
■ Comment spécifier les cas d'utilisation d'un système technique ?

❑ 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.

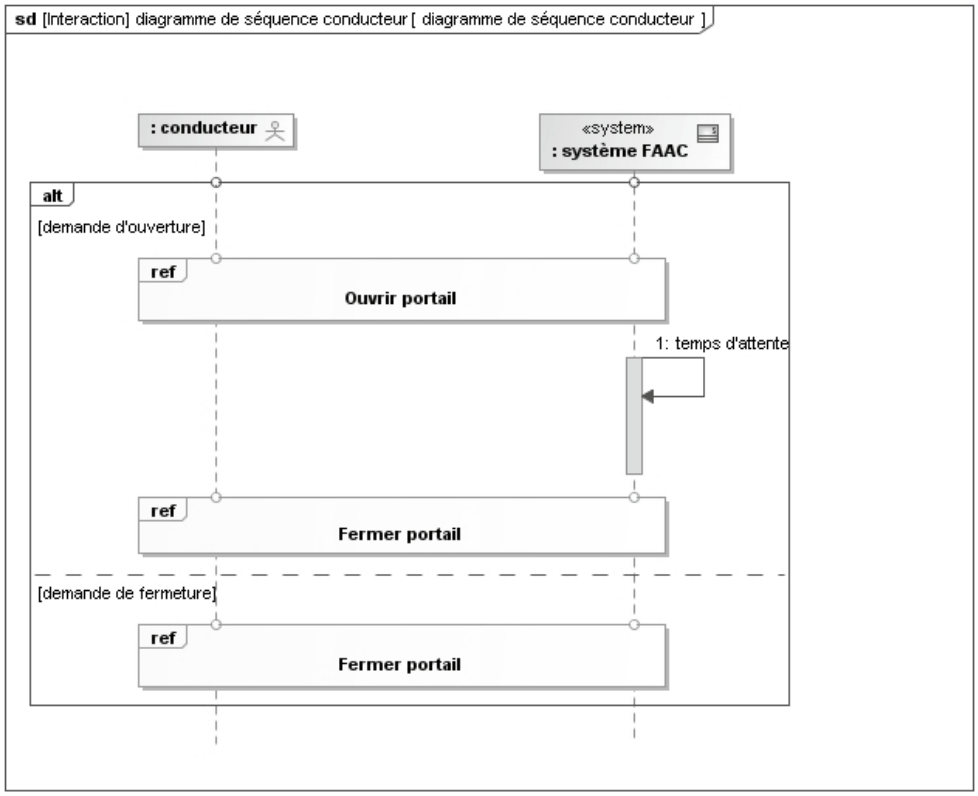
❑ Méthode 1.4. Lecture et construction d'un diagramme de séquence

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

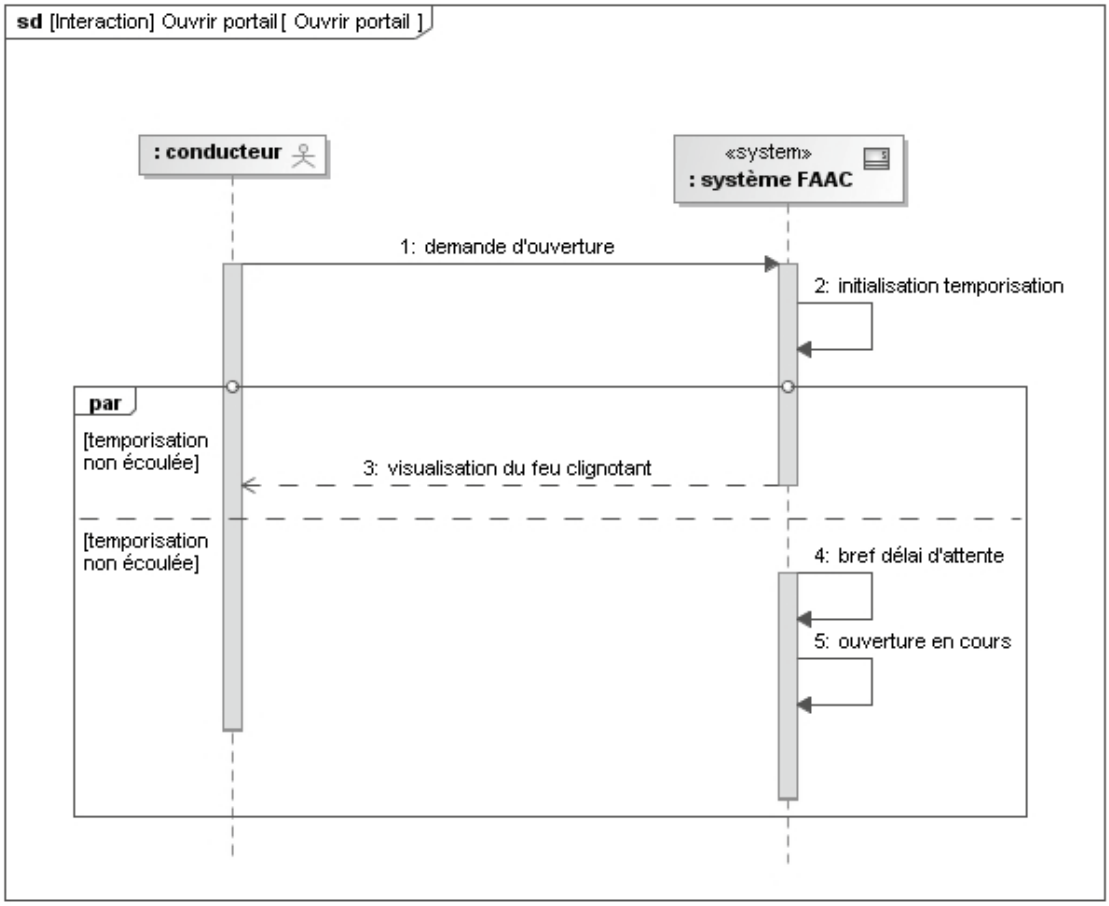
Exemple : système de portail automatique FAAC

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.



Vrai/Faux

		Vrai	Faux
1.	Un acteur est toujours un être humain.	☐	☐
2.	Le garagiste peut être un acteur pour le système « voiture ».	☐	☐
3.	Un bouchon est un acteur pour un système automatique d'embouteillage.	☐	☐
4.	Le diagramme des exigences ne montre que des exigences.	☐	☐
5.	Une exigence ne peut comporter qu'un seul critère d'appréciation.	☐	☐
6.	Une exigence n'est pas forcément liée à un besoin technique.	☐	☐
7.	100 km/h est un critère de vitesse.	☐	☐
8.	Un niveau ne peut comporter qu'une seule valeur.	☐	☐
9.	Le diagramme des cas d'utilisation énumère tous les services attendus d'un système.	☐	☐
10.	Un cas d'utilisation est toujours lié à un acteur au minimum.	☐	☐

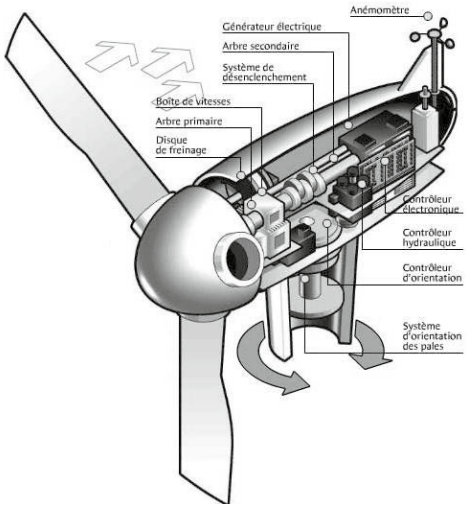
La spécification des exigences

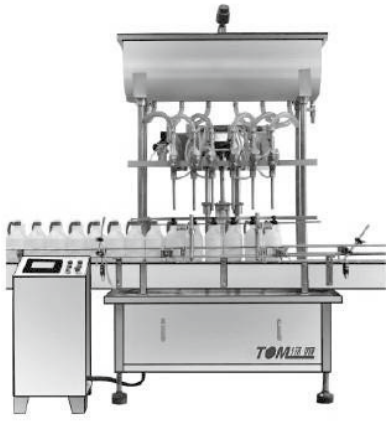
Exercice 1.1

Pour les systèmes techniques donnés ci-dessous :

1. Définir le contexte d'utilisation par un diagramme de définition de blocs SysML.
2. Donner la fonction de service globale.
3. Associer à celle-ci deux ou trois critères.







a) Disque dur interne *b) Éolienne* *c) Chaîne automatique de remplissage de bouteilles*

Exercice 1.2

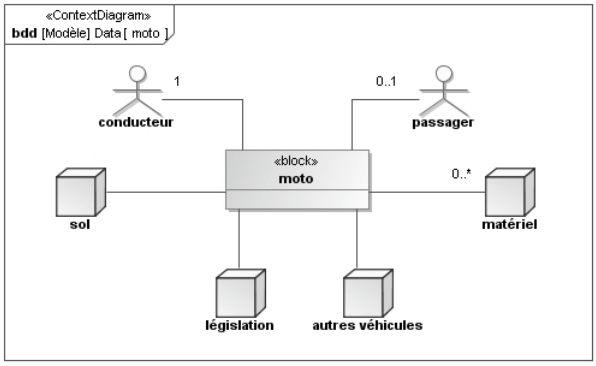
Le support d'étude proposé est une moto Yamaha (voir page suivante).
Elle permet à son pilote de se déplacer, en transportant un passager occasionnel et/ou du matériel léger. C'est un moyen de transport plus rapide et plus maniable qu'une voiture.
La moto est principalement constituée :

- d'un cadre, qui assure la liaison entre tous les autres composants,
- d'un ensemble de direction, qui permet d'orienter la roue avant,
- d'un système de suspension,
- de deux roues,
- d'un ensemble motorisé (moteur + boîte de vitesse + transmission), qui entraîne la roue arrière.

Principaux composants de la moto :



Le diagramme de contexte représenté ci-dessous, donne une modélisation partielle des interactions de la moto avec les éléments du milieu extérieur, pendant une phase de roulage.

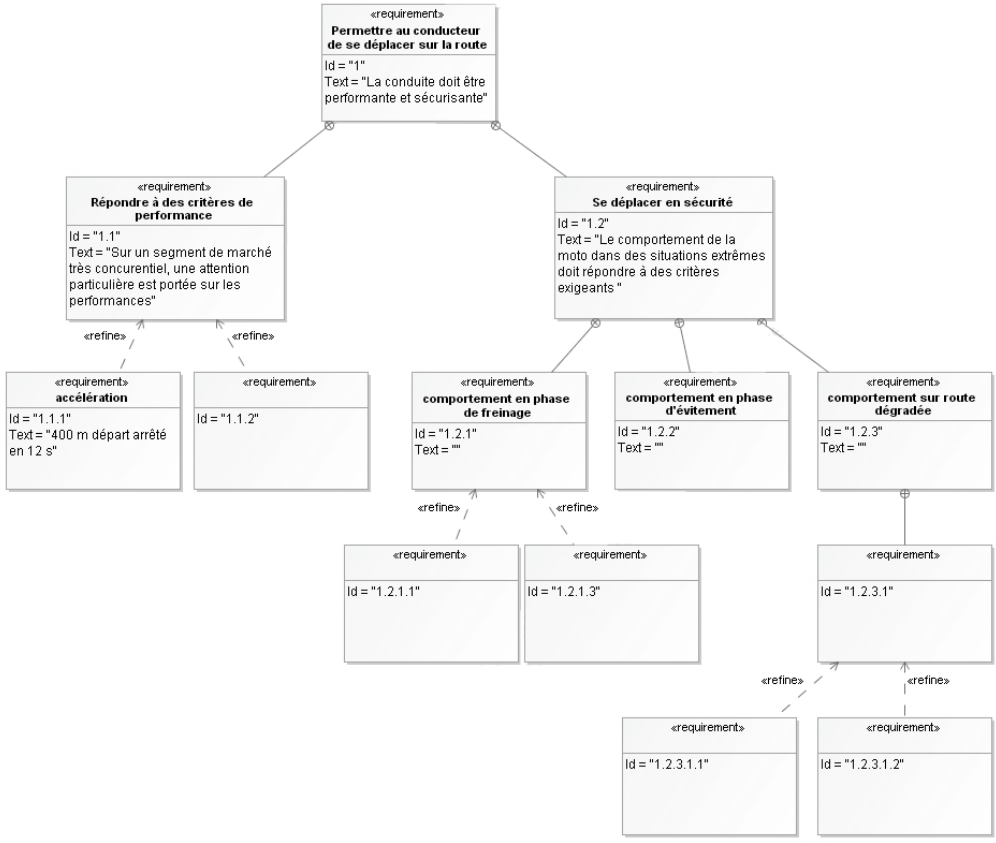


1. Proposer des exigences ou fonctions de service correspondant au besoin à satisfaire par la moto.
2. Pour l'exigence liée au transport d'un passager, proposer des critères d'appréciation.

On donne un extrait du cahier des charges :

Exigences	Critères	Niveaux
FS_1 : permettre au conducteur de se déplacer sur la route	Stabilité	Autonome pour V > 40 km/h
	Vitesse	> 200 km/h sur circuit
	Accélération	400 m départ arrêté en 12 s
	Distance de freinage	70 m à 100 km/h
	Autonomie avec un plein d'essence, sur autoroute	370 km
	Dérapage	Aucun
	Oscillation perçue	Fréquence f < 5 Hz à haute vitesse
		Temps oscillation < 3 s à basse vitesse

On donne sur la page suivante un extrait du diagramme des exigences de la fonction de service FS_1 : permettre au conducteur de se déplacer sur la route.

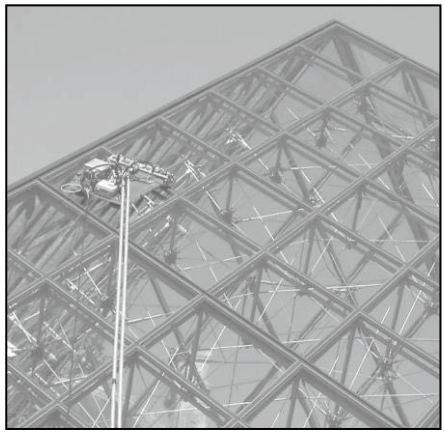


3. Compléter le diagramme des exigences ci-dessus pour y faire apparaître des critères et niveaux mentionnés dans l'extrait de cahier des charges précédent.

❑ Exercice 1.3*

La société Robosoft a développé un robot permettant d'assurer de manière automatique l'entretien de la pyramide du Louvre. Son utilisation évite l'intervention difficile et périlleuse des opérateurs sur l'édifice. Le robot, nommé Robuglass, s'inspire des machines utilisées pour le lavage des sols qui utilisent une brosse tournante et un dispositif de raclage.





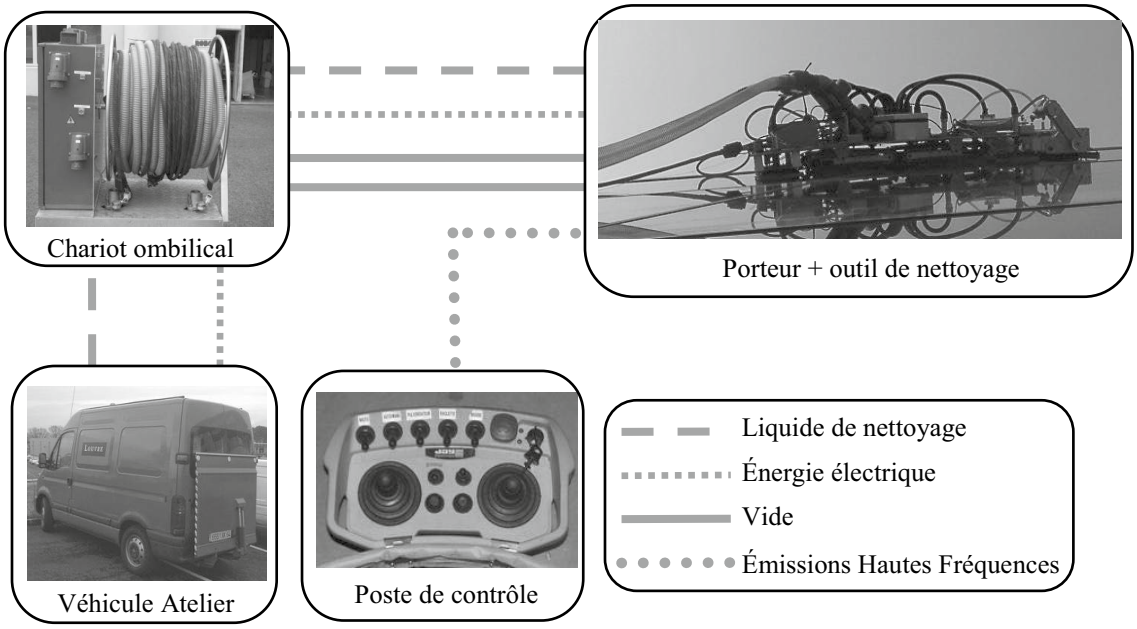
Robuglass se compose de 4 sous-ensembles distincts :

– le porteur constitue le robot qui se déplace sur la surface vitrée, emportant l'outil de nettoyage. L'outil de nettoyage est constitué d'une brosse, d'une buse qui l'arrose de produit nettoyant et d'un dispositif de raclage (raclette + essuie-glace) ;

– le chariot ombilical supporte les 2 pompes à vide (assurant une redondance pour des raisons de sécurité). Il est connecté à toutes les sources d'énergie provenant du véhicule atelier ;

– le poste de contrôle permet à l'opérateur de commander manuellement le porteur ou de vérifier le bon déroulement de l'opération de nettoyage ;

– le véhicule atelier permet le rangement du porteur, de l'outillage et du chariot ombilical. Il contient une cuve avec sa pompe pour la préparation et le transfert du produit de nettoyage. Il permet de réaliser l'entretien courant et les petites réparations.



1. Tracer le diagramme de contexte du système « porteur » dans sa phase de nettoyage.

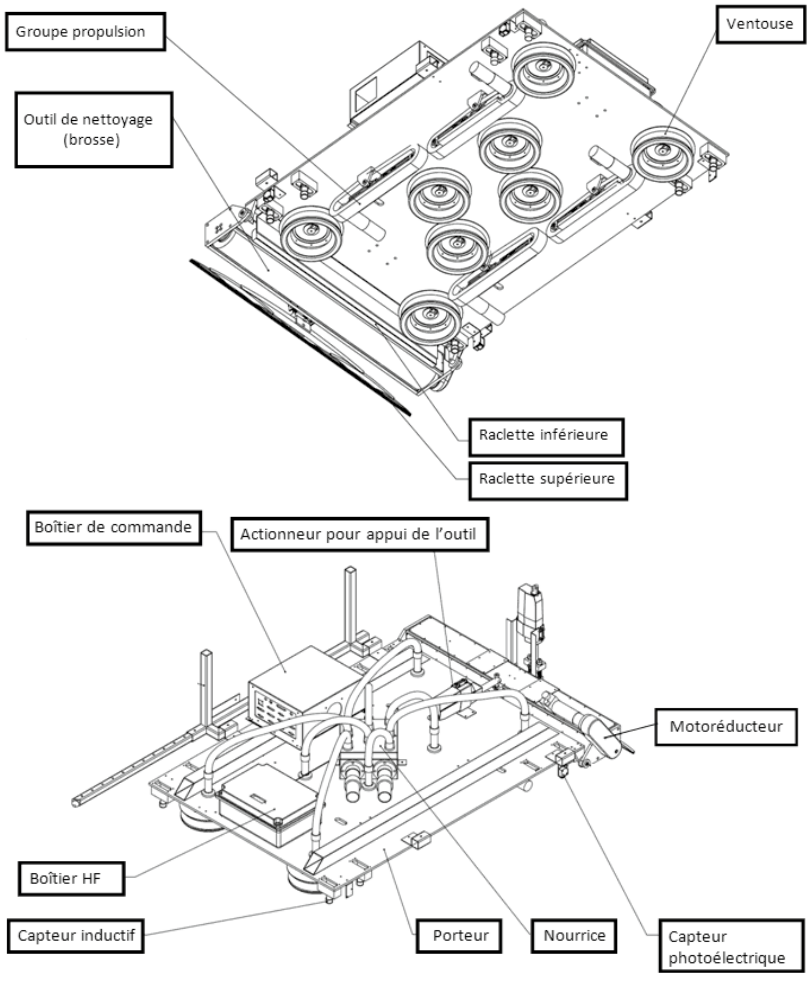
2. Proposer une exigence pour chaque lien entre le système « porteur » et ses acteurs.

Le porteur est constitué d'un plateau supportant les différents composants :

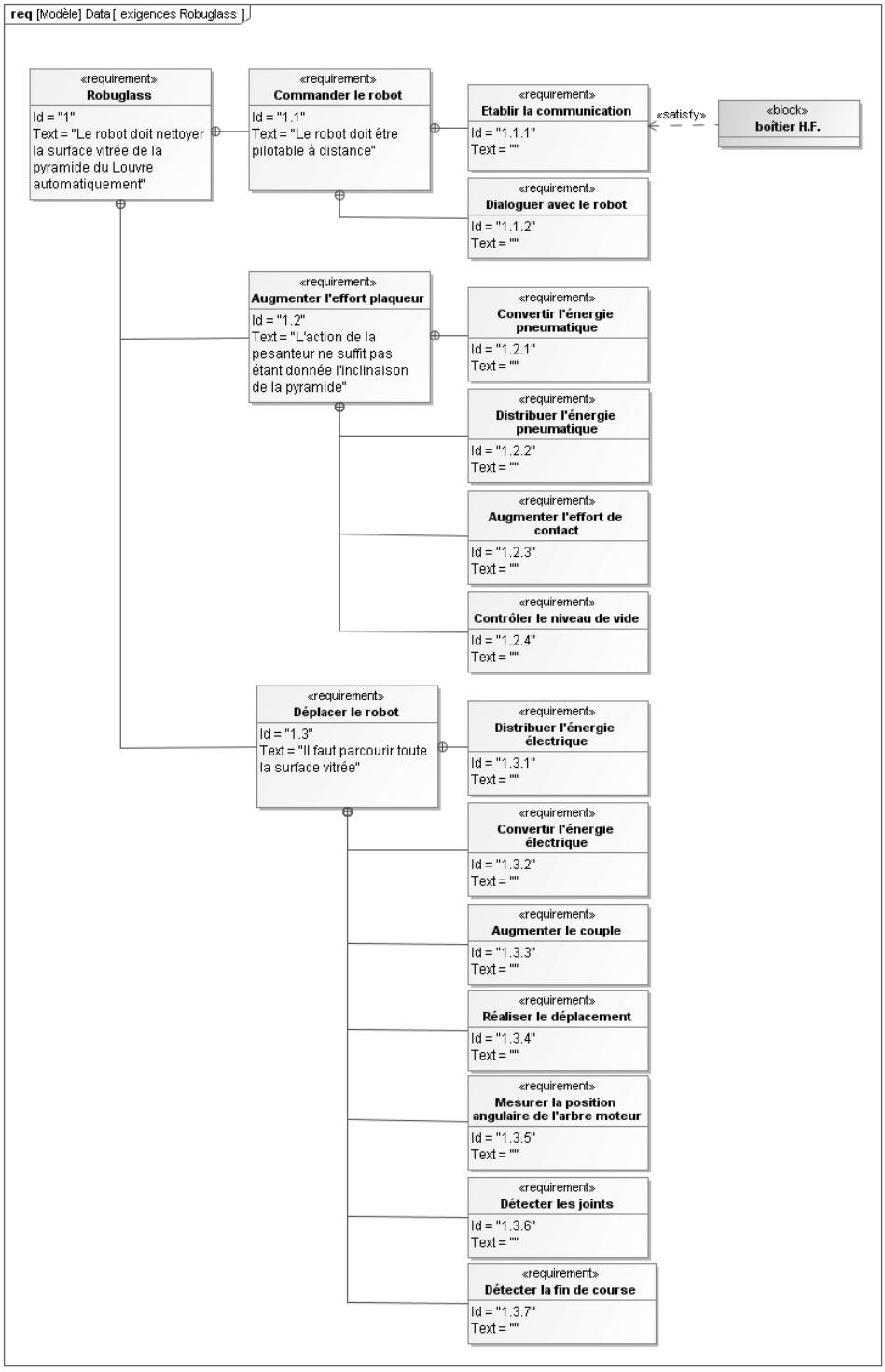
– la motricité est assurée par 4 groupes de propulsion composés chacun d'une chenille entraînée par un motoréducteur électrique indépendant. Chaque moteur à courant continu est alimenté par un variateur, qui permet de distribuer l'énergie électrique. Un réducteur permet de réduire la vitesse de rotation et d'augmenter le couple aux roues motrices. Les roues motrices entraînent les chenilles. Un codeur incrémental permet la mesure de la position angulaire de l'arbre moteur. Chaque groupe de motorisation est asservi en vitesse ;

– 8 ventouses sont disposées sous le plateau afin d'améliorer l'adhérence du porteur à la surface vitrée. La pression à l'intérieur des ventouses est inférieure à la pression atmosphérique, créant ainsi un effet d'aspiration et donc un effort plaqueur sur la surface vitrée. Une nourrice assure la liaison aux pompes à vide du chariot ombilical et aux ventouses ;

– des capteurs de pression (non visibles) contrôlent le vide dans chacune des ventouses ;
– des capteurs photoélectriques sont disposés à l'avant du porteur. Lorsque le porteur arrive en haut de la pyramide, les capteurs ne détectant plus la surface vitrée n'envoient plus de signal électrique, provoquant ainsi l'arrêt du robot ;
– des capteurs inductifs disposés sur les côtés du robot permettent la détection des joints de vitre en aluminium. Ils participent au contrôle de la trajectoire en mode automatique ;
– le porteur est équipé d'un boîtier de commande (comportant un calculateur) capable de gérer le système. Il traite toutes les informations reçues des différents capteurs et du boîtier HF. Il élabore les consignes pour les variateurs des groupes de propulsion et l'outil de nettoyage ;
– un boîtier d'émission-réception HF permet la communication avec le poste de contrôle ;
– l'outil de nettoyage embarqué sur le robot est équipé d'une brosse rotative alimentée en fluide de nettoyage et de deux raclettes. La brosse est entraînée par un motoréducteur. Une courroie transmet la puissance du réducteur à la brosse. Un vérin électrique permet de positionner l'outil de nettoyage dans les différentes phases et de contrôler l'effort normal entre l'outil et la surface vitrée en phase de nettoyage.



3. Sur le diagramme suivant, indiquer les solutions technologiques permettant de satisfaire les différentes exigences techniques.



❑ Exercice 1.4

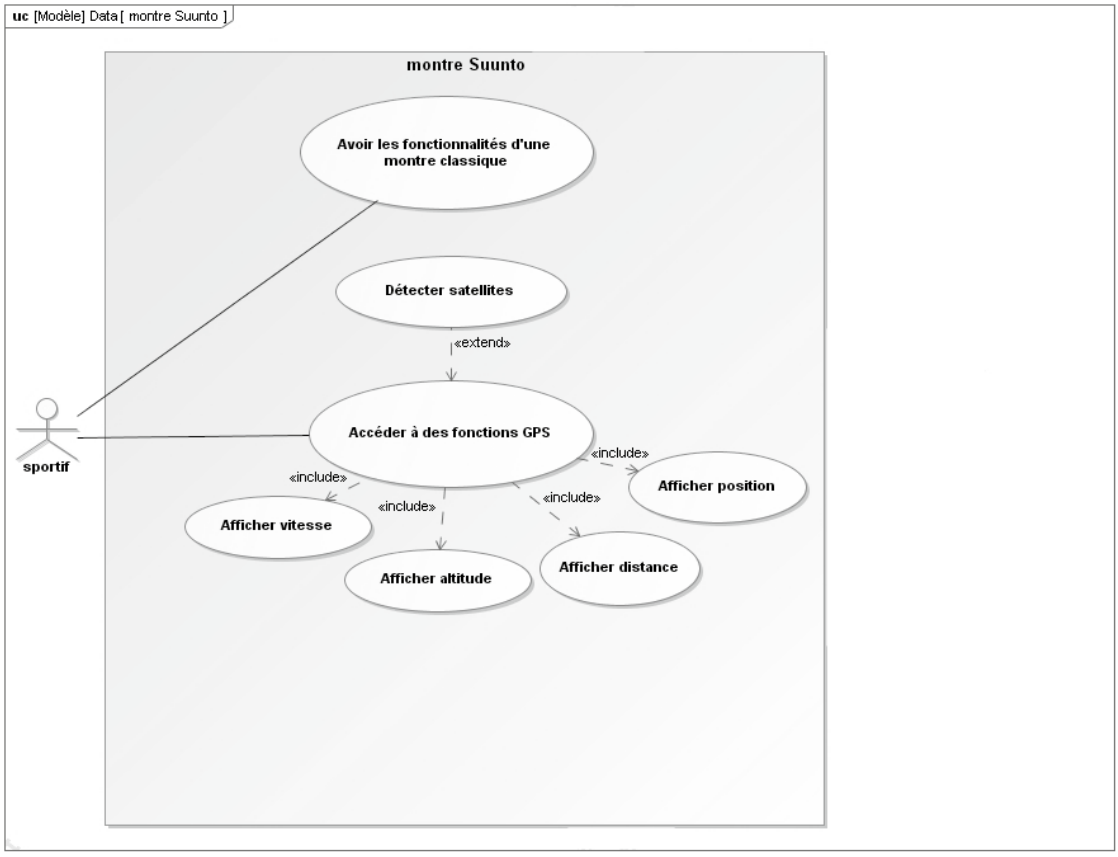


On s'intéresse à une montre Suunto dotée de fonctions habituelles (heure, date, alarme, chronomètre, etc.). Elle est également équipée de fonctionnalités appréciées des sportifs :
– un récepteur GPS (affichage vitesse, distance parcourue, etc.),



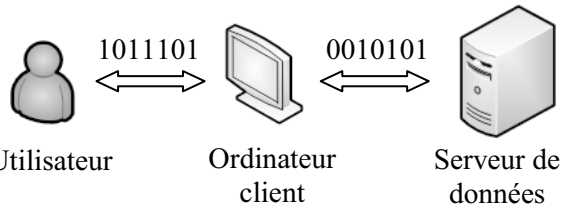
– un cardio-fréquencemètre (affichage des battements du cœur à l'aide d'un capteur placé dans une ceinture pectorale).

Compléter le diagramme des cas d'utilisation afin de prendre en compte ces fonctionnalités supplémentaires.



❑ Exercice 1.5*

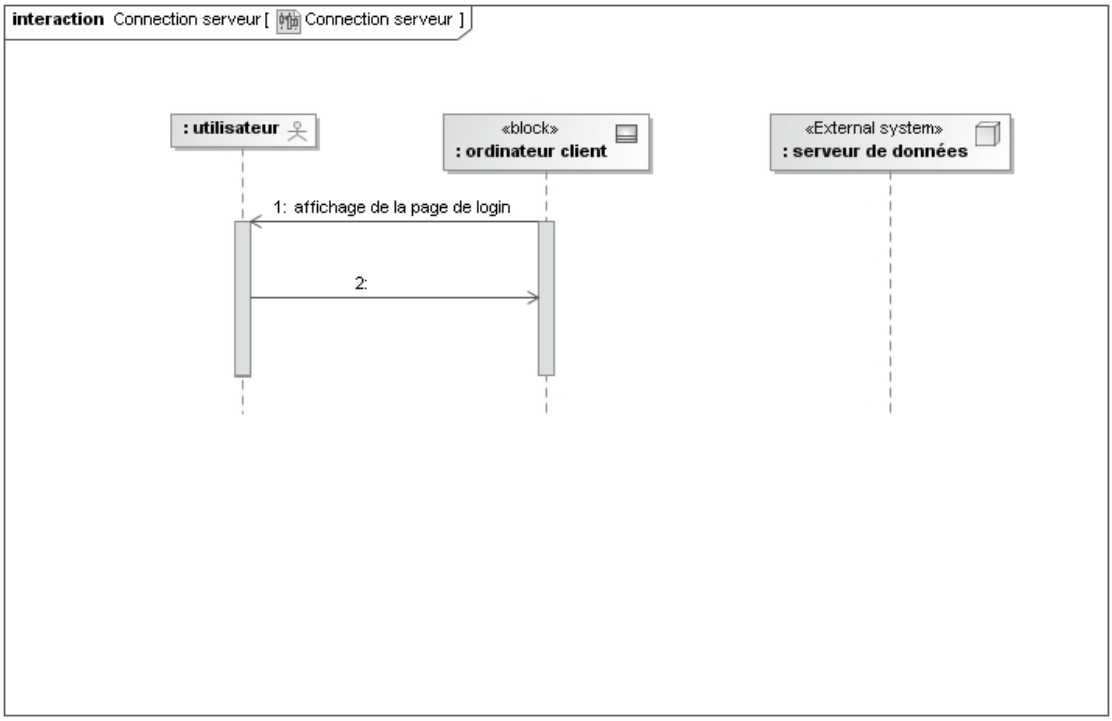
L'utilisateur d'un réseau informatique souhaite accéder à un serveur de données au moyen d'un ordinateur client.



1. Pour un ordinateur client, décrire le cas d'utilisation « se connecter à un serveur » avec un diagramme SysML.

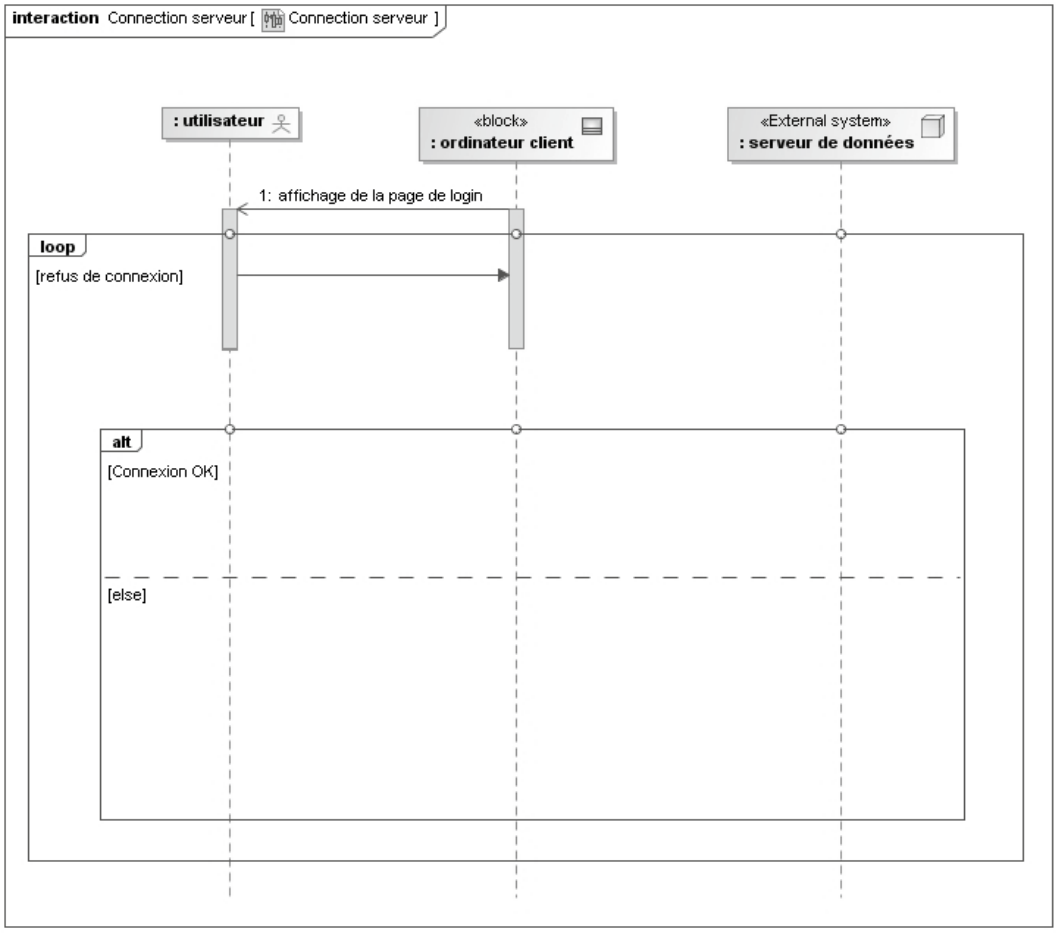
Le scénario nominal de connexion est le suivant :
- L'ordinateur client affiche sa page de login,
- L'utilisateur entre son nom d'utilisateur et son mot de passe,
- Le client transmet ces informations au serveur,
- Le serveur vérifie les paramètres de connexion,
- Il informe le client de l'autorisation de connexion,
- Le client affiche à l'utilisateur la page d'accueil des utilisateurs connectés.

2. Compléter le diagramme de séquence décrivant le scénario nominal ci-dessous :



Tant que les paramètres entrés par l'utilisateur ne sont pas corrects, l'ordinateur client affiche la page de login avec un message d'erreur.

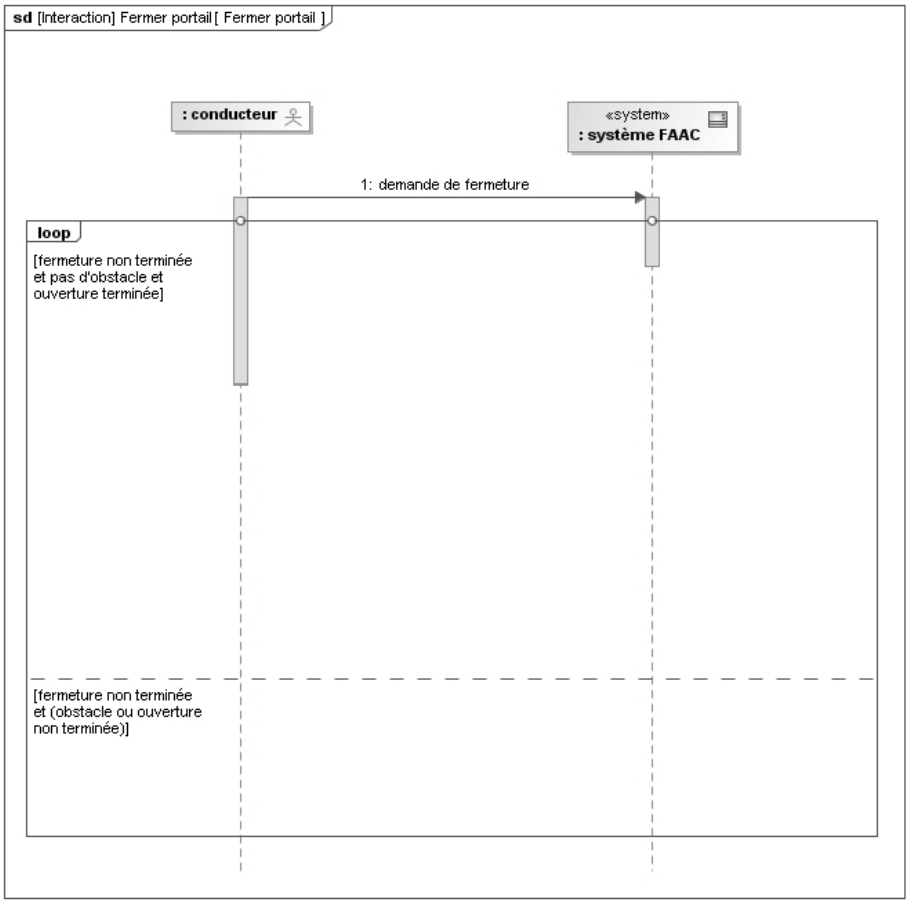
3. Compléter le diagramme de séquence ci-dessous en considérant le complément de cahier des charges présenté précédemment.



❑ Exercice 1.6*

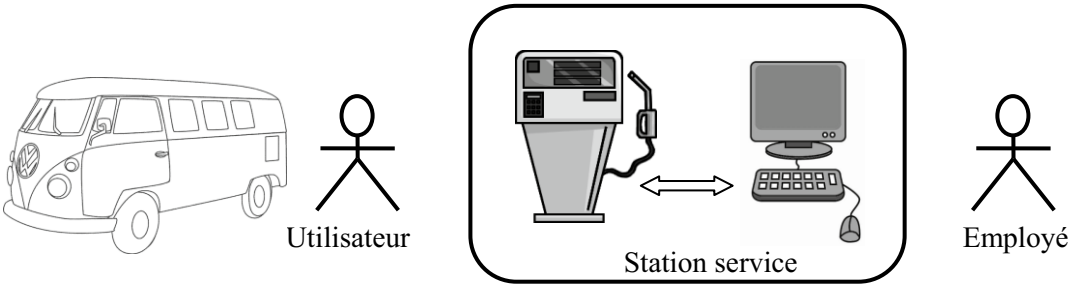
Sur l'exemple de la méthode 1.4 relatif au système de portail automatique FAAC.
Le fragment combiné « Ouvrir portail » est détaillé. On s'intéresse maintenant à celui nommé « Fermer portail ».
Un signal lumineux clignotant permet d'avertir le conducteur de la mise en mouvement imminente. Il dure jusqu'à 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. La manœuvre s'interrompt si le portail rencontre un obstacle ; le système débute alors un cycle complet d'ouverture.

Compléter le diagramme de séquence référencé « Fermer portail ».

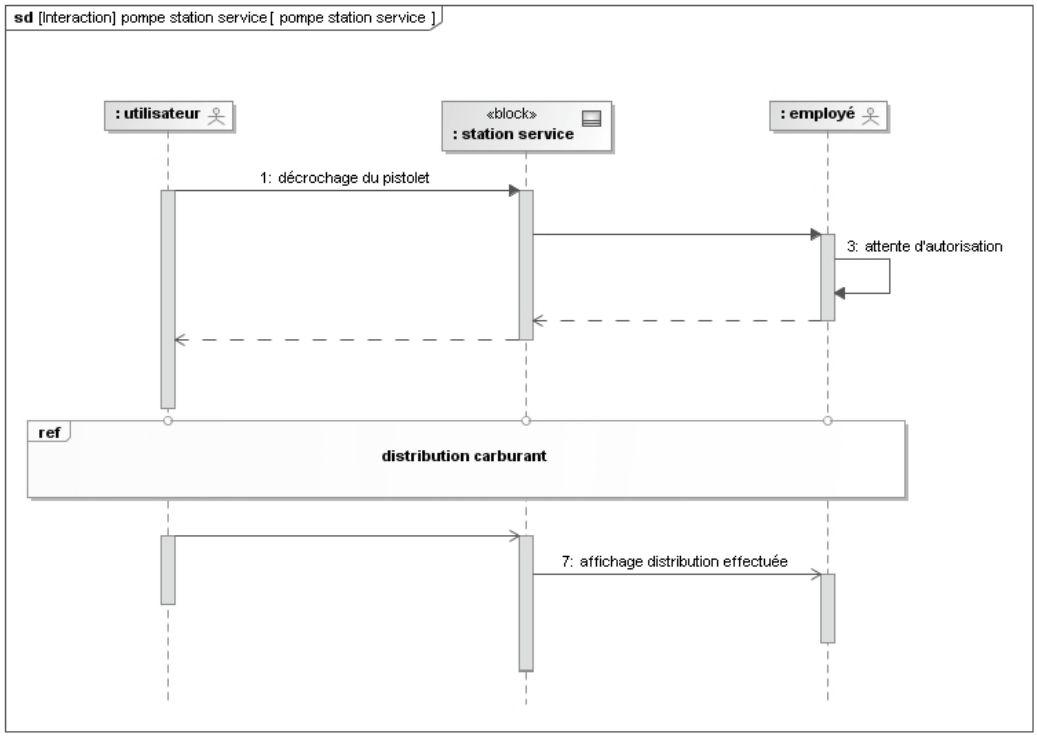


❑ Exercice 1.7*

On s'intéresse à la distribution de carburant dans une station service. Elle implique trois acteurs :



Le scénario nominal de distribution de carburant est décrit par le diagramme de séquence incomplet en page suivante.



1. Compléter le diagramme de séquence ci-dessus en indiquant la nature des messages manquants.
2. Détailler le fragment combiné « distribution carburant ».

■ Pour vous aider à démarrer

Exercice 1.1. L'étude est réalisée en phase d'utilisation normale. Un disque dur interne est en interaction avec la carte mère de l'ordinateur (échange des données), l'alimentation stabilisée (énergie de fonctionnement), le boîtier de l'unité centrale et le milieu ambiant (température). Pour définir la fonction de service globale, il faut se demander à quoi sert le système.
Exercice 1.3. À chaque lien du diagramme de contexte, on peut au moins définir une exigence. Par exemple entre le « porteur » et « surface vitrée », il est nécessaire de définir une exigence du type « Déplacer le porteur sur la surface vitrée ». Les solutions techniques permettent de satisfaire aux exigences.
Exercice 1.5. Lorsque l'utilisateur demande un accès, c'est un message synchrone qui attend donc un retour. L'ordinateur client sert d'interface entre l'utilisateur et le serveur de données.

Corrigé des vrai/faux

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
faux	vrai	vrai	faux	faux	vrai	vrai	faux	faux	vrai

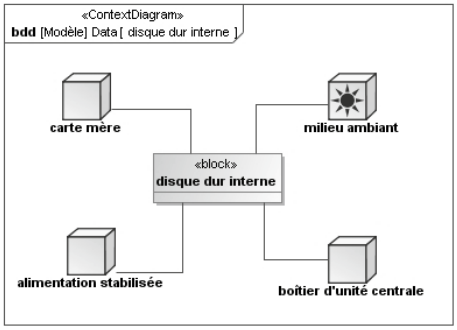
1. Un acteur est une entité en interaction avec le système. Cela peut être une personne physique mais aussi un objet, un système, un milieu ambiant, etc.
2. Le garagiste est un acteur pour le système « voiture » en phase de maintenance.
3. Une chaîne automatique d'embouteillage agit sur plusieurs matières d'œuvre matérielles : la bouteille, le liquide qu'elle doit contenir, le bouchon, les étiquettes, etc. Tous ces éléments sont donc en interaction avec le système.
4. Le diagramme des exigences montre les exigences requises (hiérarchie et relations qui les lient). Il peut aussi indiquer des solutions techniques retenues ou en cours de validation, des notes diverses, etc.
5. Une exigence peut être définie par plusieurs critères. Par exemple, une exigence liée au design peut comporter des critères de couleur et de forme.
6. Les exigences peuvent provenir de besoins techniques (cadence de production, temps d'utilisation, tenue en température, etc.), mais aussi de contraintes à satisfaire liées au design, au packaging, au transport, à l'image que renvoie le système auprès des utilisateurs, etc.
7. 100 km/h est le niveau que l'on associerait à un critère de vitesse lié à une exigence de rapidité.
8. Le niveau d'un critère peut être une valeur mais aussi un intervalle de valeurs. Par exemple, l'exigence principale d'un pèse-personne est d'acquérir une masse et d'afficher un résultat précis. Le critère d'étendue de mesure est associé à un niveau du type « 10 à 120 kg ».
9. Selon la phase du cycle de vie envisagée, il peut y avoir des cas d'utilisation qui existent ou non. Par exemple, en phase de maintenance d'un véhicule automobile, le garagiste peut brancher un outil de diagnostic. Ce service n'existe pas pour le conducteur habituel.
10. Un cas d'utilisation est toujours lié à un acteur au minimum.

❑ Les erreurs classiques

Les diagrammes présentés dans ce chapitre sont des outils de communication. Ils doivent être facilement décodables. Des niveaux de détail trop importants, nuisent forcément aux messages à transmettre. Il faut donc privilégier l'analyse par niveau et la décomposition modulaire.

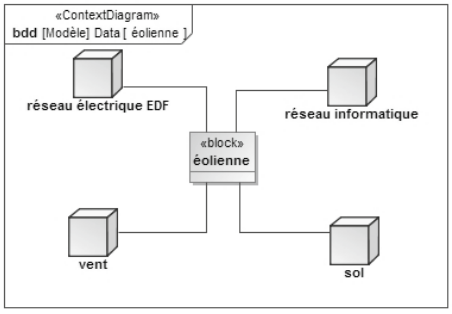
Exercice 1.1

a) Disque dur interne



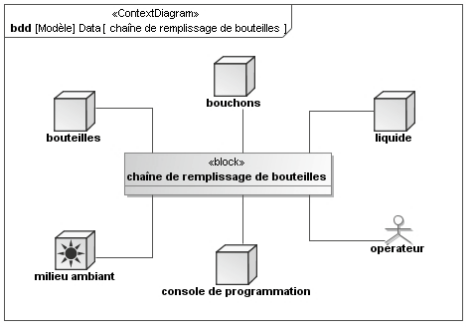
Fonction de service globale : stocker des données.
Critères : capacité de stockage, vitesse de lecture de données, vitesse d'écriture, taille mémoire tampon.

b) Éolienne



Fonction de service globale : convertir l'énergie.
Critères : vitesse du vent en fonctionnement normal, vitesse du vent pour mise en sécurité (drapeau), format énergie électrique EDF, puissance électrique, rendement.

c) Chaîne automatique de remplissage de bouteilles



Fonction de service globale : remplir des bouteilles.
Critères : dimensions des bouteilles et des bouchons, volume et type de liquide, cadence de production.

⇨ *Méthode 1.1*

Exercice 1.2

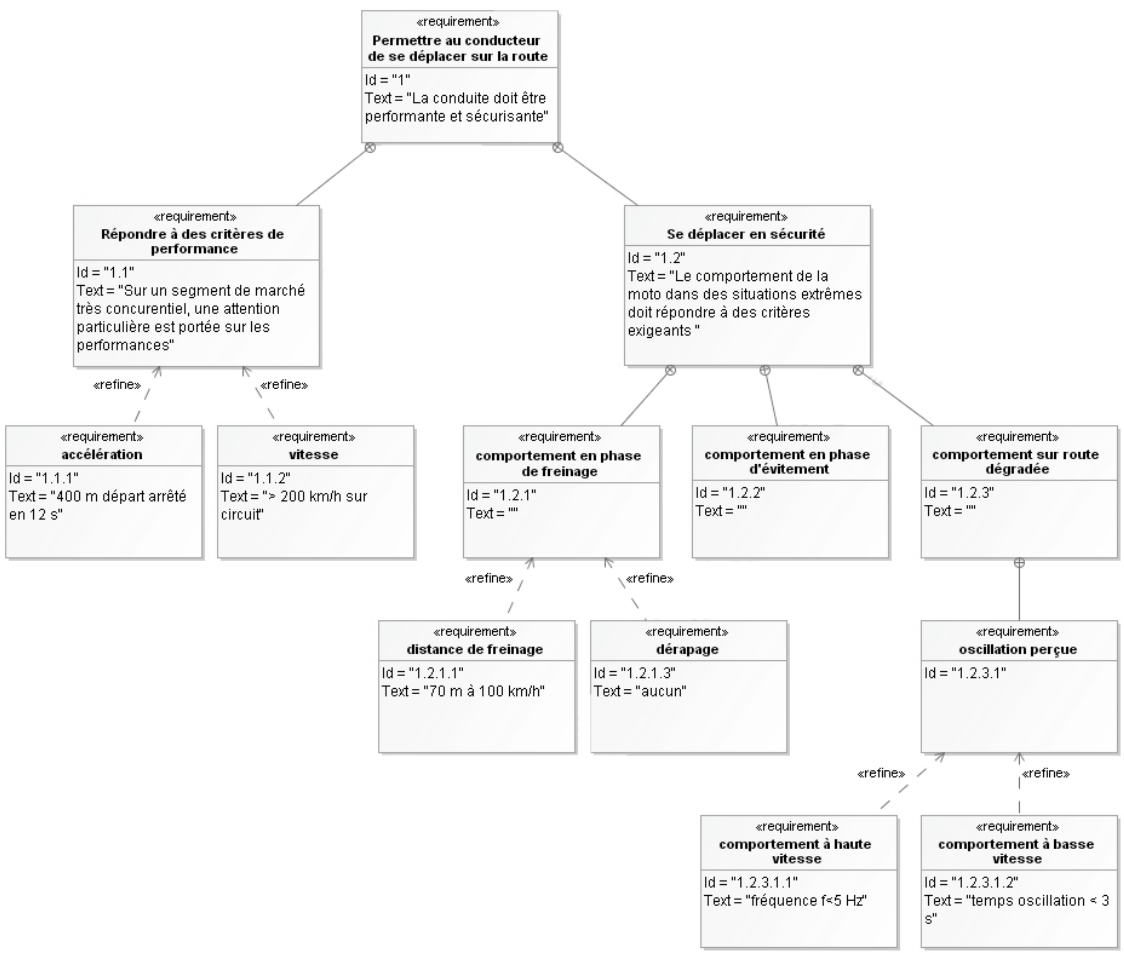
1. On peut lister les exigences sous la forme de fonctions de service :

FS_1 : permettre au conducteur de se déplacer sur la route
FS_2 : transporter du matériel
FS_3 : transporter un passager
FS_4 : être en liaison avec la route
FS_5 : respecter la législation routière en vigueur
FS_6 : s'insérer dans la circulation routière

2. Pour la fonction de service FS_3 : transporter un passager, on peut notamment proposer les critères suivants :

– poids du passager
– corpulence.

3.

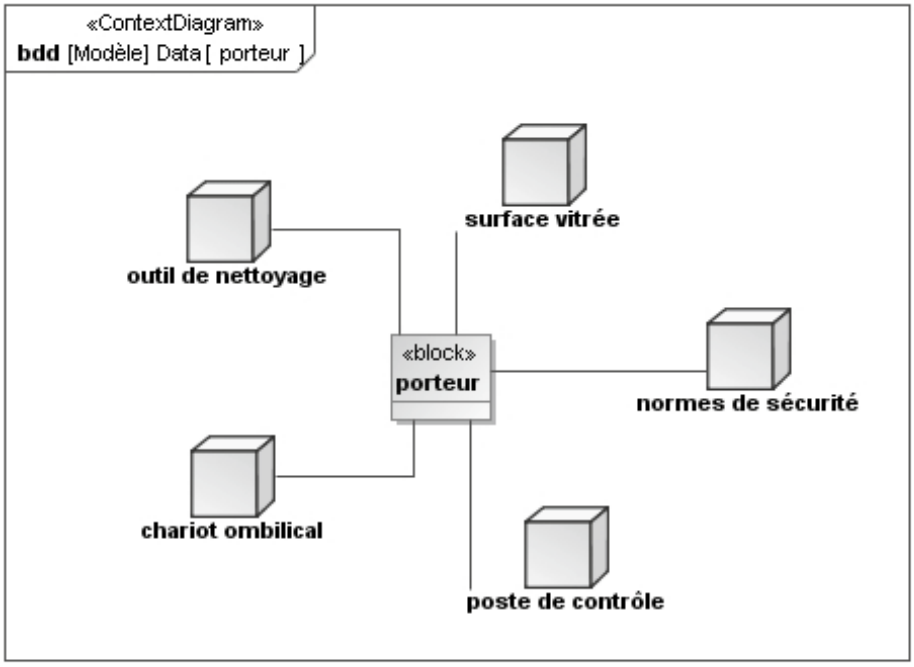


⇨ *Méthodes 1.1 et 1.2*

Corrigé

Exercice 1.3

1.

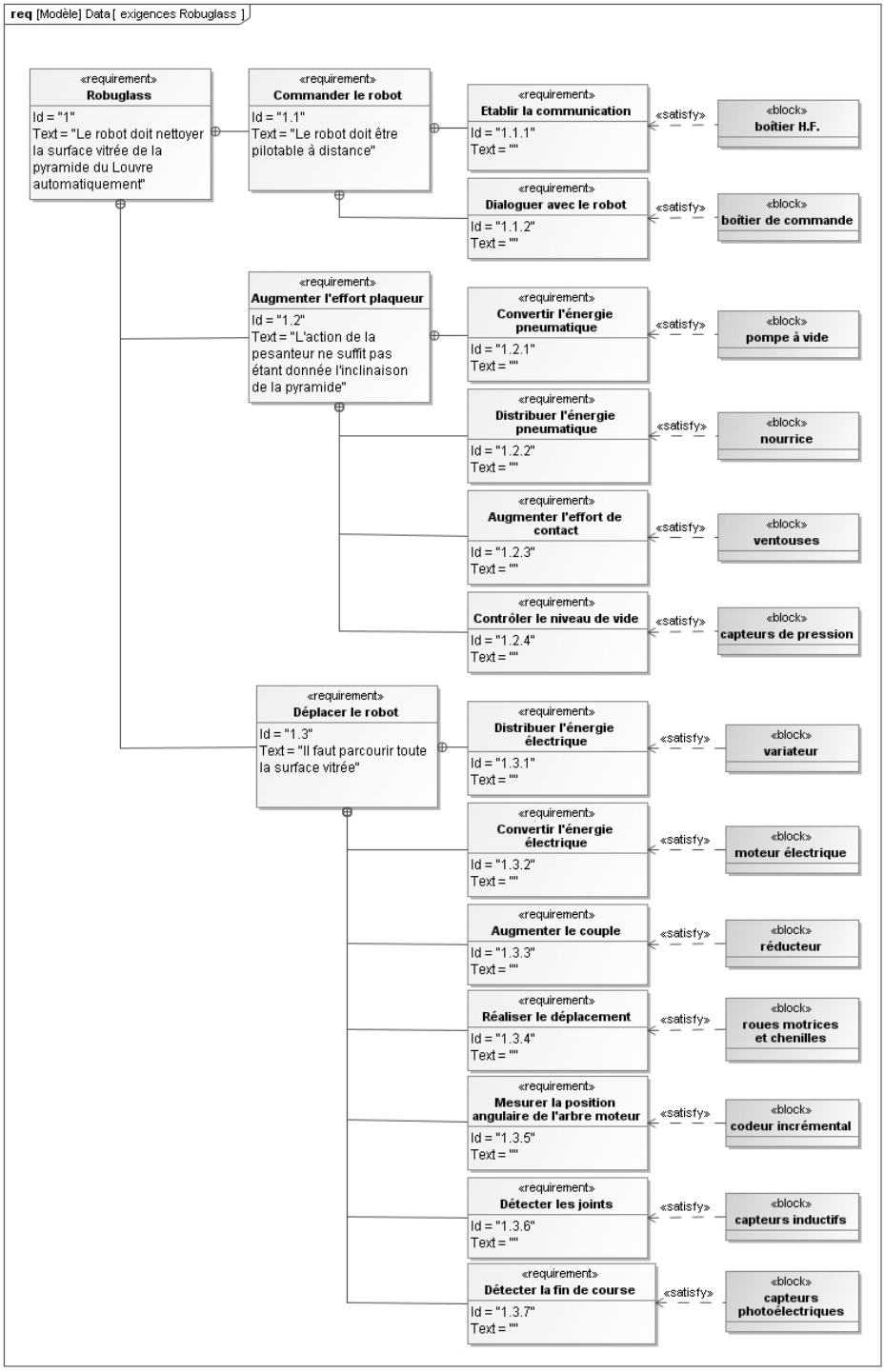


⇨ *Méthode 1.1*

2.

On peut notamment recenser les exigences suivantes :
– Entre « porteur » et « surface vitrée » :
Exigence 1 : Déplacer le porteur sur la surface vitrée,
– Entre « porteur » et « outil de nettoyage » :
Exigence 2 : Fixer l'outil de nettoyage sur le porteur,
– Entre « porteur » et « poste de contrôle » :
Exigence 3 : Commander manuellement le porteur et vérifier le bon fonctionnement,
– Entre « porteur » et « chariot ombilical » :
Exigence 4 : Alimenter en énergie,
– Entre « porteur » et « normes de sécurité » :
Exigence 5 : Assurer la redondance pour une sécurité optimale.

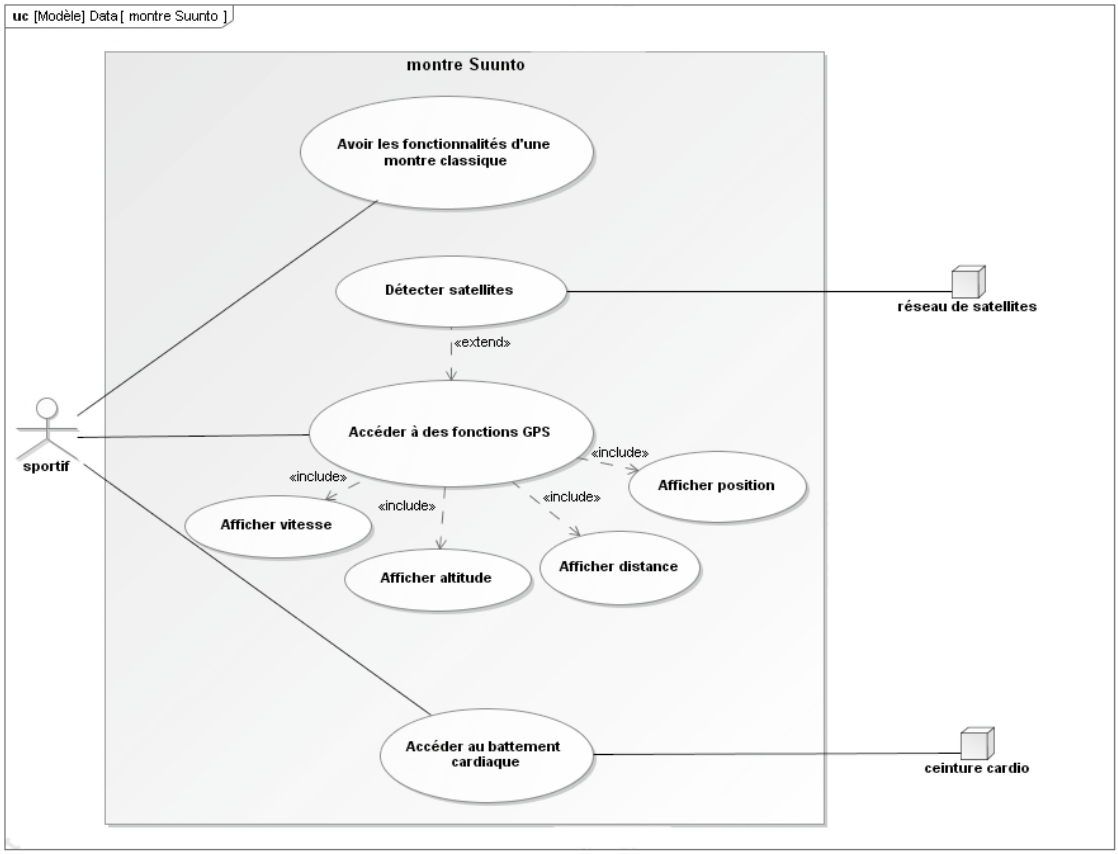
3.



⇨ *Méthode 1.2*

Corrigé

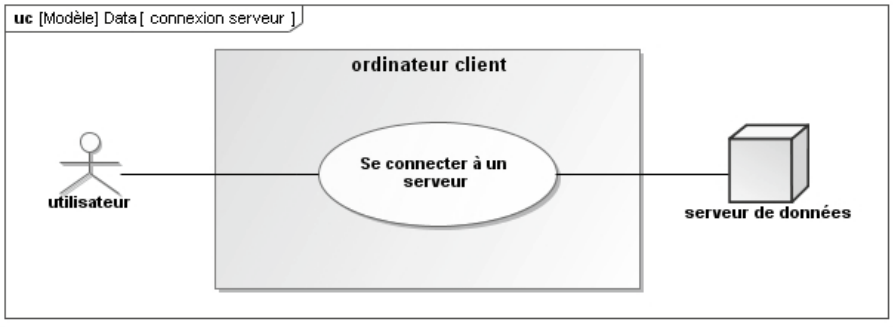
Exercice 1.4



⇨ *Méthode 1.3*

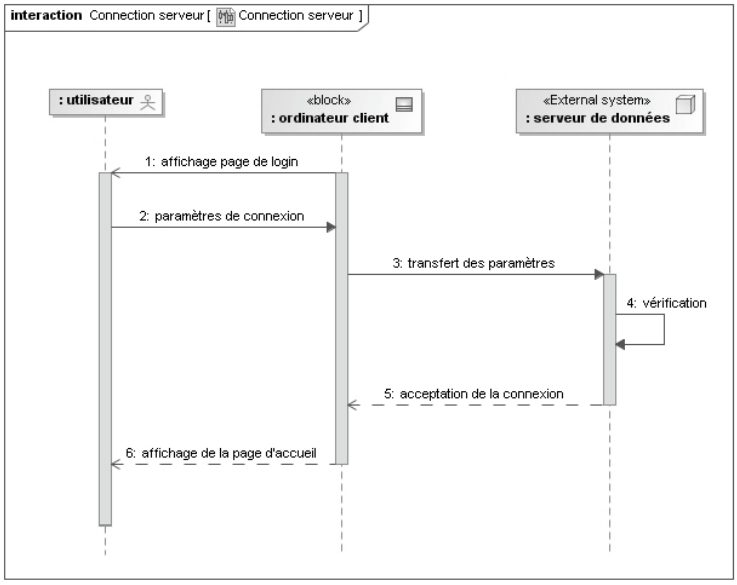
Exercice 1.5

1.

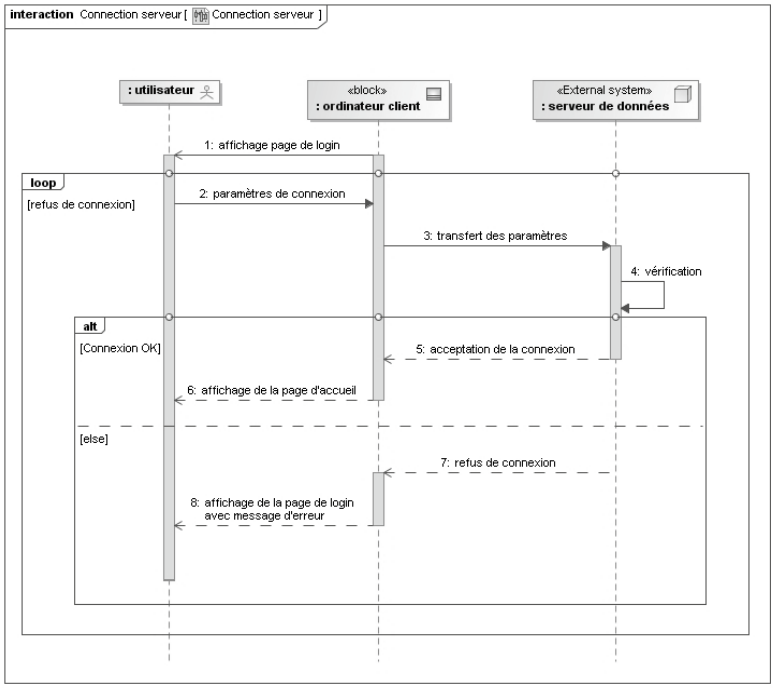


⇨ *Méthode 1.3*

2. Le scénario nominal est le suivant :



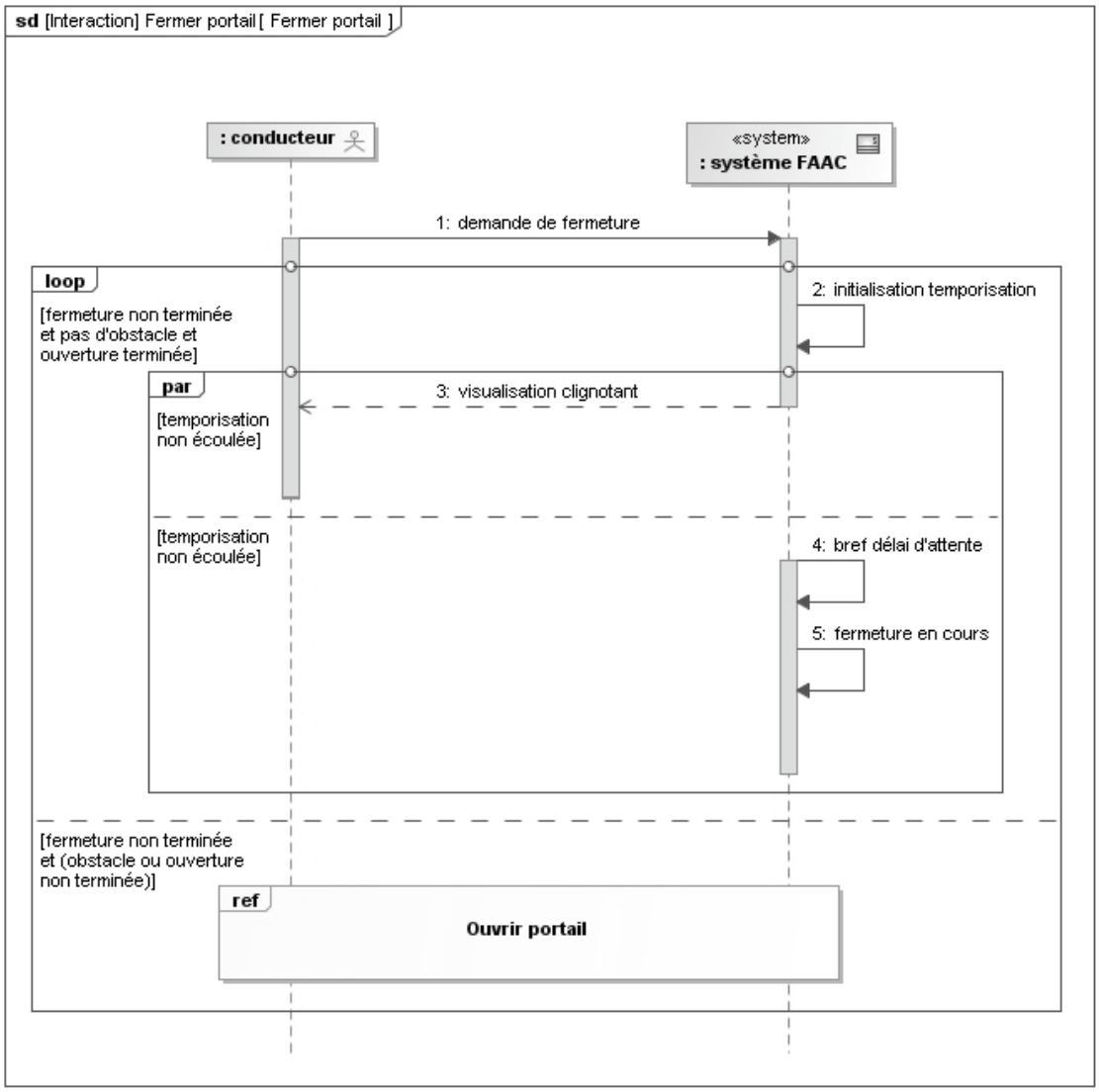
3. Le scénario modifié est le suivant :



⇨ *Méthode 1.4*

Corrigé

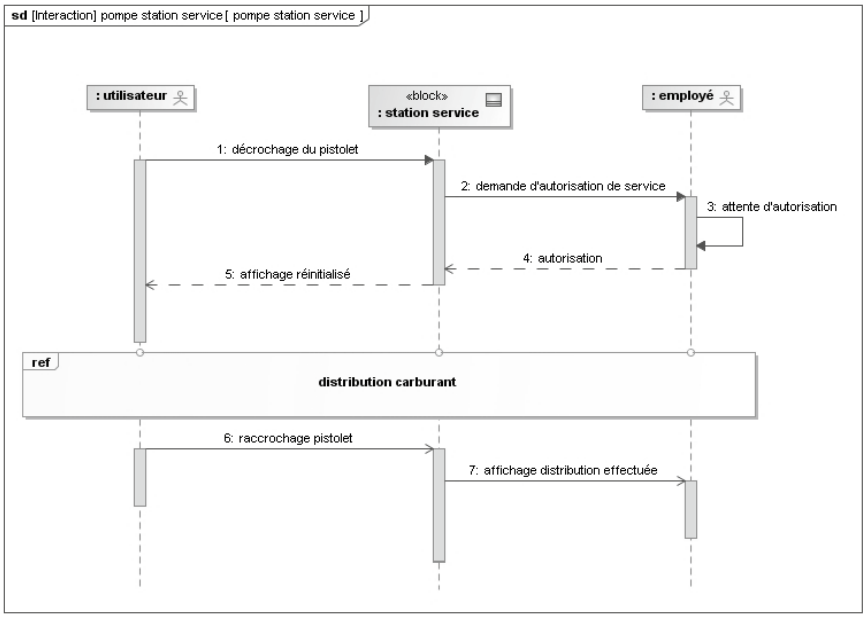
Exercice 1.6



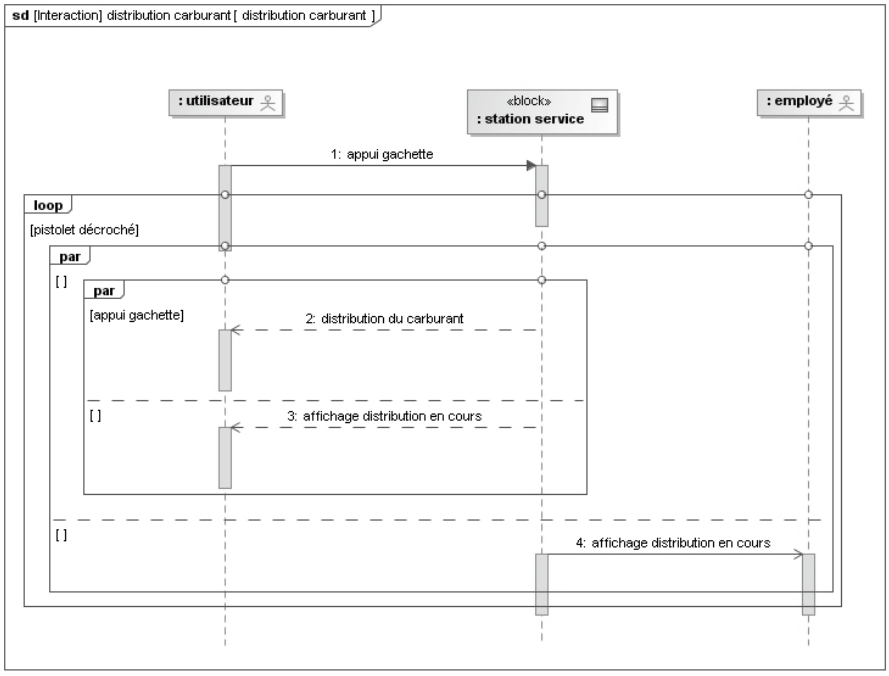
⇨ *Méthode 1.4*

Exercice 1.7

1.



2.



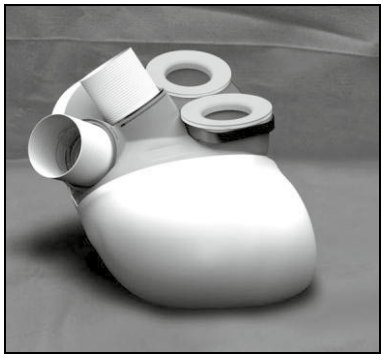
➪ *Méthode 1.4*

Corrigé

Chapitre 2

Architectures fonctionnelle et structurelle

Le 18 décembre 2013, le premier **cœur artificiel Carmat** est implanté chez un patient. La conception est le fruit de quinze années de recherche collaborative entre des équipes médico-chirurgicales et des ingénieurs de Matra. Il met en œuvre les technologies les plus récentes. Sa forme anatomique, son poids de 900 g et son volume de 0,75 l lui autorisent une implantation compatible avec au moins 65 % des patients. À l'aide des capteurs de pression et de position, l'électronique de contrôle, totalement embarquée, permet une régulation automatique en débit et en fréquence. Les matériaux sont biocompatibles pour toutes les surfaces en contact avec le sang. Ses tests fonctionnels et d'endurance drastiques garantissent une durabilité de 5 ans.



Objectifs

Ce qu'il faut connaître

- La décomposition structurelle d'un système en chaîne d'information et chaîne de puissance
- La fonction des différents constituants
- Le diagramme de définition de blocs
- Le diagramme de bloc interne

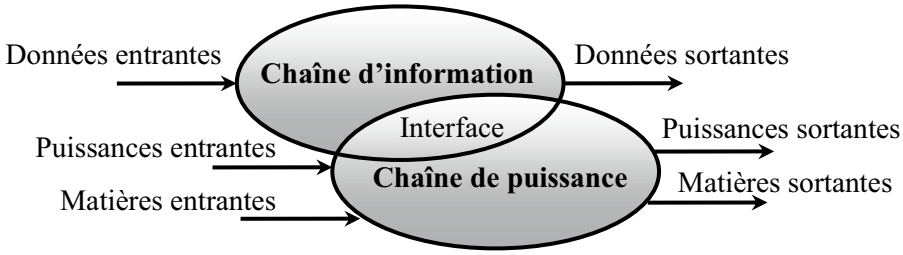
Ce qu'il faut savoir faire

- Analyser un système d'un point de vue fonctionnel et structurel
- Identifier les données entrantes et sortantes d'une chaîne d'information
- Identifier les matières et puissances entrantes et sortantes d'une chaîne de puissance
- Définir la fonction des différents constituants
- Décrire la structure interne du système en termes de parties, ports et connecteurs.

Architecture d'un système pluritechnique

Chaîne d'information / chaîne de puissance

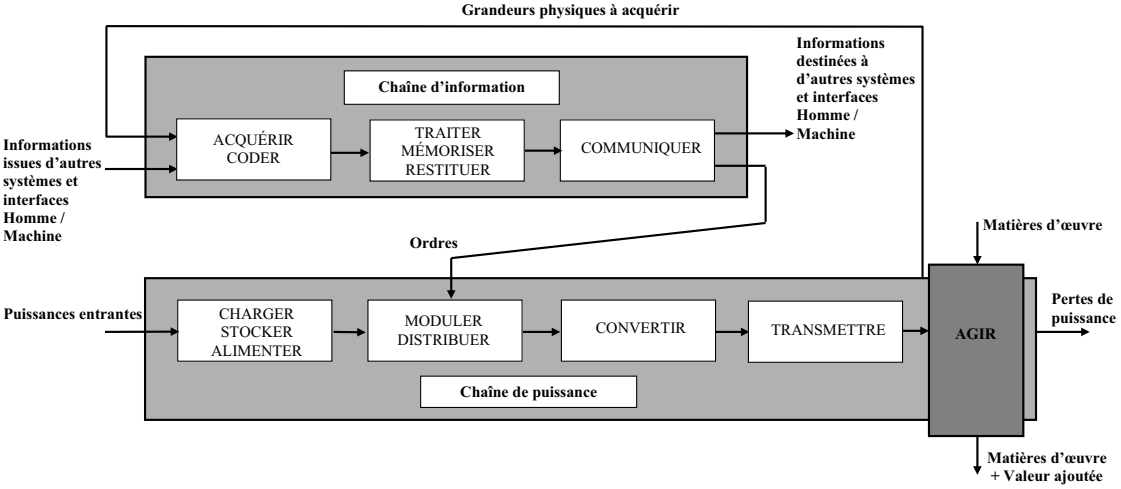
Au sein des systèmes pluri-techniques, on peut distinguer :
– la chaîne d'information agissant sur les flux de données,
– la chaîne de puissance agissant sur les flux de matières et de puissances.



⇨ Méthode 2.1. Détermination des données, des énergies et des matières entrantes et sortantes associées à un système

Fonctions génériques / schéma topo fonctionnel

À la chaîne d'information et à la chaîne de puissance, on peut en général associer les fonctions élémentaires suivantes :



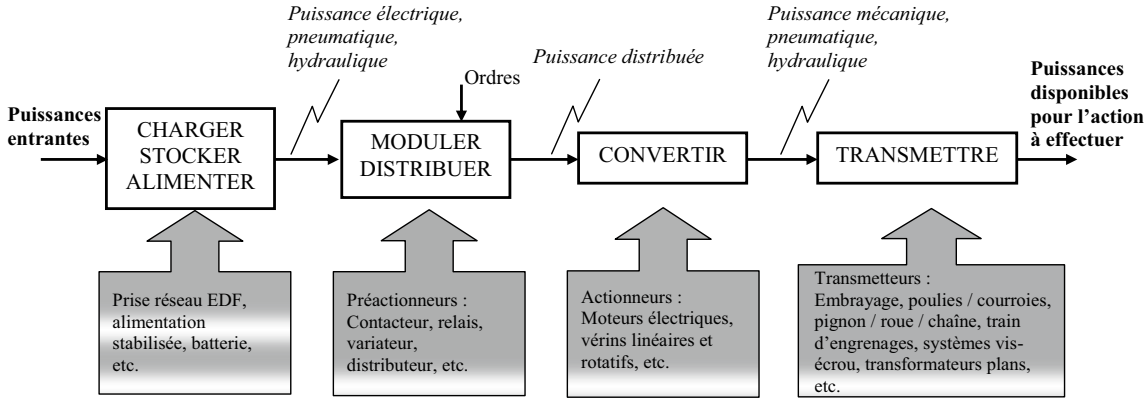
La chaîne de puissance

La chaîne de puissance contribue à la réalisation de la fonction de service globale, en agissant sur la (ou les) matière(s) d'œuvre.

La **puissance** P s'exprime en watt [W]. C'est une quantité d'**énergie** (exprimée en joule [J]) par unité de **temps** (1 W = 1 J/s).
La puissance est le produit d'une **grandeur d'effort** par une **grandeur de flux**.
La grandeur d'effort est la grandeur nécessaire pour mettre en mouvement un solide (effort ou couple), un fluide (pression), un électron (courant).
La grandeur flux est une grandeur qui perdure malgré la suppression de la grandeur d'effort. Ainsi, la vitesse d'un solide peut continuer à évoluer malgré la suppression de l'effort de mise en mouvement.

Domaine physique	Grandeur d'effort	Grandeur de flux	Puissance
Électrique	Tension u – Volt [V]	Courant i – Ampère [A]	$P = u \times i$
Mécanique de translation	Force F – Newton [N]	Vitesse v – [$m.s^{-1}$]	$P = F \times v$
Mécanique de rotation	Moment d'une force c – [N.m]	Taux de rotation ω – [$rad.s^{-1}$]	$P = c \times \omega$
Hydraulique et pneumatique	Pression p – Pascal [Pa]	Débit volumique q – [$m^3.s^{-1}$]	$P = p \times q$
Thermique	Température T – Kelvin [K]	Flux d'entropie s – [$J.K^{-1}.s^{-1}$]	$P = T \times s$

La chaîne de puissance est la partie du système qui utilise une très grande quantité de la puissance totale absorbée.

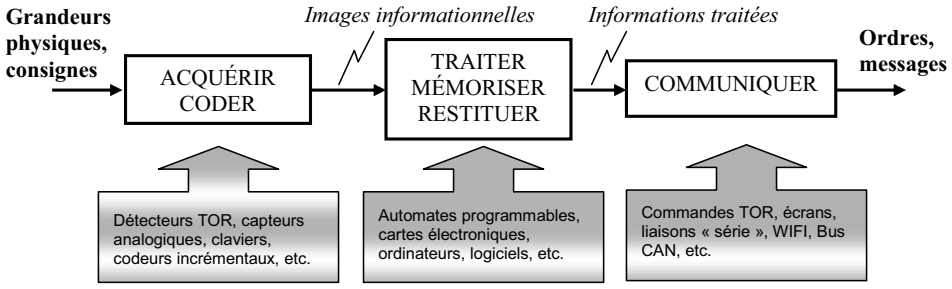


La puissance issue de la chaîne d'information est faible. Elle n'est pas suffisante pour être utilisable directement par les actionneurs.
La fonction d'un préactionneur est de distribuer une puissance importante en la modulant le cas échéant, sous l'action d'une puissance de commande (ordre) beaucoup plus faible.
Le transmetteur adapte la puissance en provenance de l'actionneur pour la fournir à l'effecteur.
L'effecteur est le dernier élément de la chaîne de puissance, il agit directement sur la matière d'œuvre (pince, convoyeur, ventouse, etc.).

⇨ Méthode 2.2. Définition de la chaîne de puissance d'un système

❑ La chaîne d'information

La chaîne d'information permet notamment :
- d'acquérir des informations :
  - sur l'état d'un produit ou de l'un des constituants de la chaîne d'énergie,
  - issues d'interfaces Homme/Machine,
  - élaborées par d'autres chaînes d'information ;
- de les coder si nécessaire ;
- de traiter ces informations ;
- de communiquer :
  - les ordres à la chaîne de puissance,
  - les messages destinés aux interfaces Homme/Machine,
  - les messages à d'autres chaînes d'information.



Pour acquérir une grandeur physique (force, température, etc.) ou une consigne, les constituants utilisés sont des capteurs. Ils restituent une image de la grandeur physique mesurée sous une sous forme logique, numérique ou analogique exploitable par l'unité de traitement.

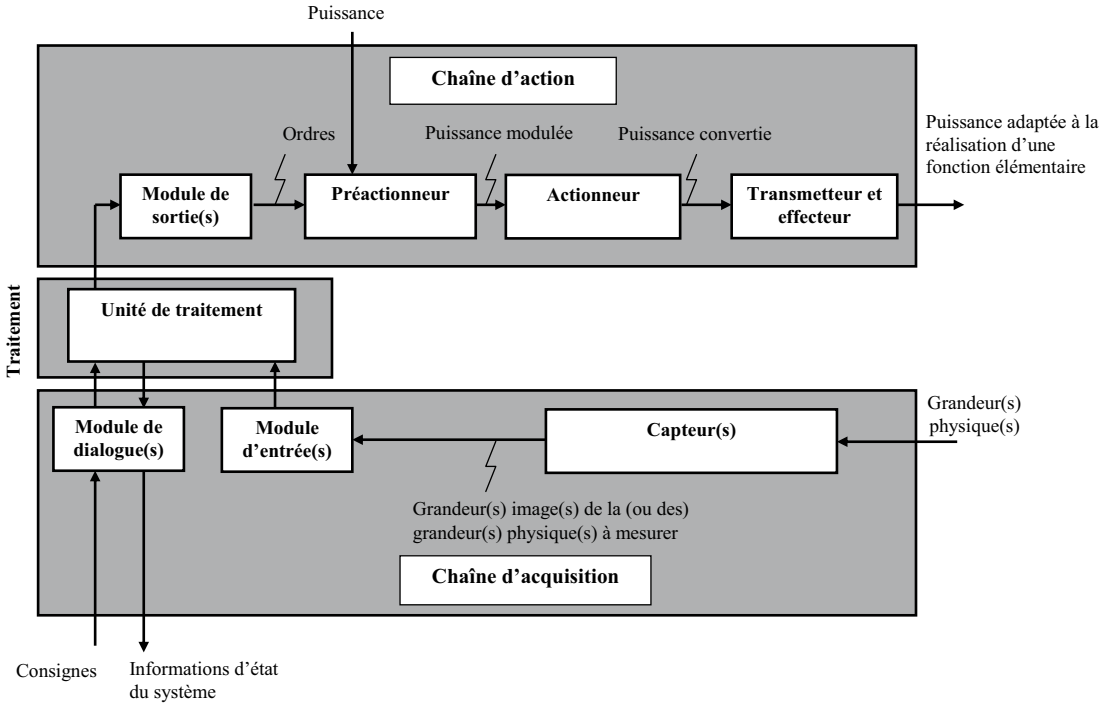
⇨ Méthode 2.3. Définition de la chaîne d'information d'un système

❑ Chaîne fonctionnelle d'un système technique

Une **chaîne fonctionnelle** (ou **axe**) est un sous-ensemble d'un système technique.
Elle permet de réaliser une des fonctions élémentaires (transférer, réguler, positionner, maintenir, transformer, etc.) participant à la réalisation de la fonction globale du système.
On lui associe un couple unique préactionneur/actionneur.

❑ Chaîne d'action / chaîne d'acquisition

Une chaîne fonctionnelle comporte en général :
- la **chaîne d'action**, du traitement à son effet ;
- la (ou les) **chaîne**(s) **d'acquisition** :
  - d'information(s) sur le produit ou le processus,
  - d'information(s) extérieure(s) (consigne(s) de l'opérateur, etc.) ;
- la partie traitement qui traite les informations pour élaborer les ordres à destination de la chaîne d'action.



⇨ Méthode 2.4. Identification des différents constituants associés à une chaîne fonctionnelle

■ Les outils de modélisation structurelle SysML

❑ L'élément de type bloc

La notion de **bloc** (block) est essentielle dans l'analyse des systèmes. C'est une entité qui peut être de nature matérielle (constituant, être humain, etc.) ou conceptuelle (algorithme, logiciel, etc.).

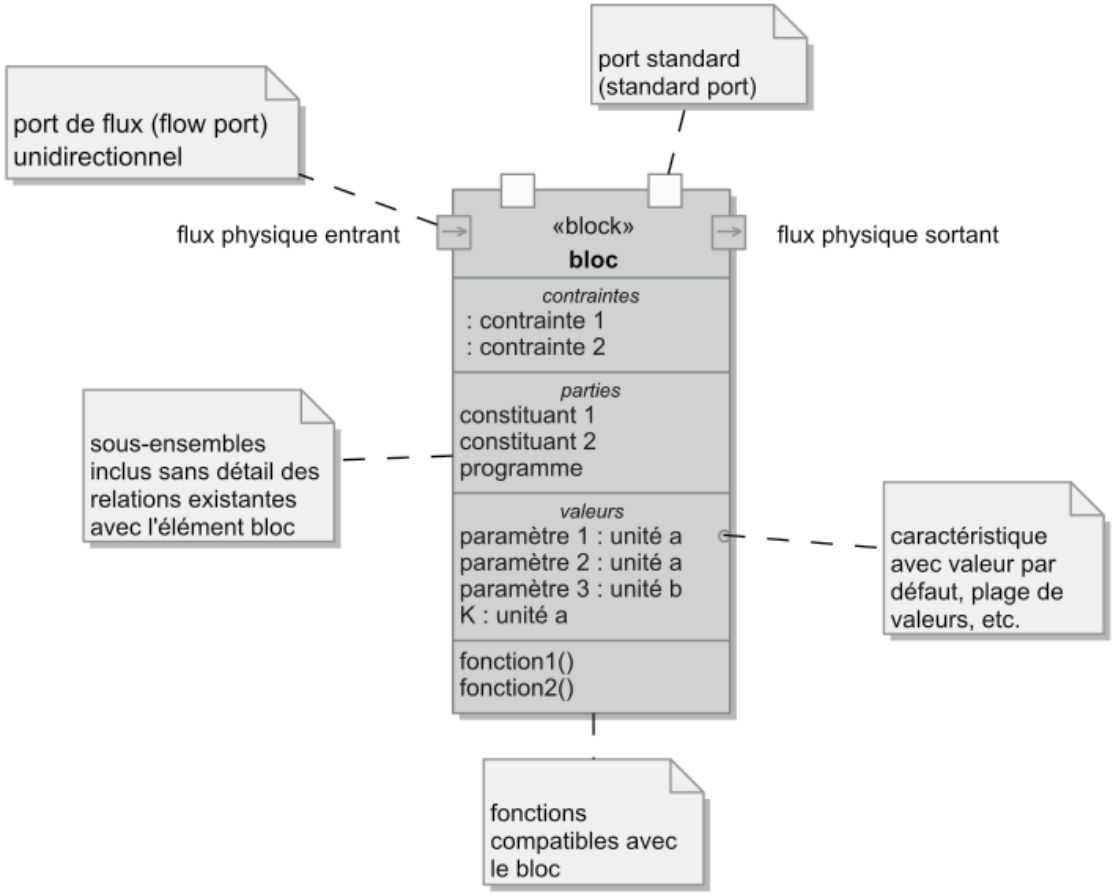
Avec le formalisme SysML, on peut associer à un bloc des **propriétés** (properties) structurelles et comportementales :

– **valeurs** (values) : caractéristiques avec valeur, dimension, etc. ;

– **parties** (parts) : sous-ensembles inclus obligatoirement ;

– **fonctions** (operations) : fonctionnalités disponibles. Les requêtes peuvent alors être synchrones (l'émetteur attend un retour pour poursuivre), ou asynchrone (pas d'attente de retour) ;

– **ports** (ports) : ils permettent de montrer des interactions bidirectionnelles ou unidirectionnelles, services (ordres et informations) ou flux (flow) physiques.



❑ Le diagramme de définition de blocs

Le diagramme de définition de blocs (*blocks definition diagram* ou **bdd**) est un diagramme normalisé SysML.

Il permet de décrire :

- les **caractéristiques structurelles** grâce aux propriétés structurelles ;
- les **caractéristiques comportementales** par le biais des fonctions ;
- les **relations** entre blocs, avec notamment :
  - l'**association** (trait plein simple) : indique une relation d'égal à égal entre blocs. Leur présence est simultanée ;
  - la **composition** (trait plein et losange plein) : représentation graphique équivalente aux propriétés de type « parts », c'est une relation d'inclusion obligatoire. Elle est très utilisée pour montrer la structure hiérarchique d'un système ;
  - l'**agrégation** (trait plein et losange évidé) : c'est une relation d'inclusion non obligatoire ;
  - la **généralisation**/**spécialisation** (trait plein et triangle évidé) : selon le sens de lecture, un bloc se généralise ou se spécialise en un autre. Dans ce dernier cas, il hérite alors des propriétés du bloc généralisé, il en a souvent des supplémentaires ;