

Robert Papanicola

MANUEL DE SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR



PCSI et MPSI

- Cours détaillé
- Exemples guidés
- Nombreux diagrammes et illustrations en couleurs
- Travaux pratiques et exercices
- Corrigés détaillés



MANUEL
DE **SCIENCES INDUSTRIELLES**
DE L'INGÉNIEUR

PCSI et MPSI

MANUEL DE SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

PCSI et MPSI

Robert Papanicola

Professeur de chaire supérieure
au lycée Charlemagne (Paris IV^e)



ISBN 9782340-053182
© Ellipses Édition Marketing S.A., 2019
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.

Avant-propos

Cet ouvrage s'articule autour du programme de sciences industrielles de l'ingénieur (SII) de première année des classes préparatoires aux grandes écoles.

Il développe dans un seul manuel les différents chapitres du programme, l'ingénierie des systèmes, la mécanique du solide (cinématique, modélisation cinématique et statique), l'automatique (systèmes linéaires et asservis, et systèmes à événement discret).

Chaque chapitre est construit autour du cours, ponctué de nombreuses illustrations, d'exemples guides traités et de schémas.

Plus de 40 exercices corrigés l'enrichissent et permettent d'appréhender les grandes méthodes de résolution des problèmes de sciences industrielles des concours.

Ce manuel est destiné en priorité aux élèves de MPSI, PCSI.

Ingénierie des systèmes

Problématique

La description des systèmes, qu'ils soient de simples mécanismes ou des systèmes industriels relativement complexes, nécessite d'utiliser un langage qui soit compréhensible par toutes les parties qui vont soit utiliser le système, le vendre, le maintenir, le fabriquer ou le concevoir. Nous allons dans ce premier chapitre commencer par définir cette notion de système et mettre en place un outil de description des systèmes.

Ce premier cours de l'année est donc une approche de l'ingénierie système et des outils de description associés.

1.1 Besoin, produit, système

La première question que l'on doit se poser lors de l'étude d'un système est : **À quoi sert ce système ?** Il est donc nécessaire de définir le **besoin**.

1.1.1 Le besoin

La norme NF X50-150 précise : « Un besoin est une nécessité, un désir éprouvé par un utilisateur ».

Tout produit, tout système naît de la volonté de satisfaire un besoin. Ce besoin peut être un simple rêve, une envie ou la réponse à un problème. De même, les besoins exprimés pour un même objectif ont évolué au cours du temps (figure 1.1) :

- d'une simple description d'un usage dans les premiers temps ;
- en précisant ensuite des contraintes :
 - de coûts,
 - de facilité d'utilisation,
 - d'affichage de l'innovation ;
- en précisant plus récemment :
 - l'impact environnemental,
 - l'impact social,
 - l'impact sur le développement,
 - ...

Le besoin initial correspond à **l'exigence principale** que doit satisfaire le système, **la mission** de celui-ci.

1.1.2 Le produit, système

C'est une réalisation humaine, il a été imaginé et réalisé pour satisfaire le **besoin**. Le produit est la réponse au besoin. Avec l'évolution des besoins, les produits ont suivi la même évolution vers plus de technologie et d'automatisation intégrée.

Un produit n'est pas obligatoirement un objet technique, cela peut tout aussi bien être un service ou un processus. Le terme « produit » est souvent remplacé par le terme « système » qui permet une signification plus riche et permet d'élargir à d'autres champs que les produits industriels.

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

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

FIGURE 1.1 – Évolution des produits et des besoins

Quelques définitions de systèmes

Les diverses définitions ci-dessous, sur lesquelles chacun peut s'accorder en raison de leur caractère descriptif, voire évasif, montrent, de façon non exhaustive, la difficulté d'unifier ces visions de la définition d'un système complexe.

- A « system » is a construct or collection of different elements that together produce results not obtainable by the elements alone. The elements, or parts, can include people, hardware, software, facilities, policies, and documents; that is, all things required to produce system - level results. The results include system-level qualities, properties, characteristics, functions, behavior, and performance. The value added by the system as a whole, beyond that contributed independently by the parts, is primarily created by the relationship among the parts; that is, how they are interconnected. (en. System, NASA (2007)).

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

- Construire ou utiliser un objet technique complexe fait appel à la notion de système. Cette notion, ancienne dans les sciences physiques et humaines, est maintenant courante dans les pratiques industrielles et opérationnelles. Par définition, tout système est constitué d'un ensemble d'éléments dont la synergie est organisée pour répondre à une finalité dans un environnement donné (AFIS, 2009).
- The systems are man-made, created and utilized to provide services in defined environments for the benefit of users and other stakeholders. These systems may be configured with one or more of the following : hardware, software, humans, processes (e.g., review process), procedures (e.g., operator instructions), facilities, and naturally occurring entities (e.g., water, organisms, minerals). In practice, they are thought of as products or services. The perception and definition of a particular system, its architecture and its system elements depend on an observer's interests and responsibilities. One person's system - of - interest can be viewed as a system element in another person's system - of -interest. Conversely, it can be viewed as being part of the environment of operation for another person's system - of - interest. Un système est un ensemble intégré d'éléments qui accomplissent un objectif défini. [INCOSE¹2004]

Nous nous restreindrons à caractériser les systèmes conçus par l'homme et nous les définissons par :

Un système est un ensemble de composants qui collaborent à la réalisation d'un ensemble de tâches en vue de fournir un ensemble de services, cet ensemble est soumis à un environnement donné et interagit ainsi avec un sous-ensemble des éléments de cet environnement.

1. The International Council on Systems Engineering (INCOSE) is a not-for-profit membership organization founded in 1990. Our mission is to share, promote and advance the best of systems engineering from across the globe for the benefit of humanity and the planet.

1.2 Ingénierie système

L'ingénierie système (ou ingénierie des 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, dans la démarche de conception, s'appuie à la fois :

- sur l'analyse de l'existant, pour cela (phase d'appropriation de l'existant), on essaie de répondre aux questions :
 - Pourquoi le système a-t-il été conçu ainsi ?
 - Comment peut-on le faire évoluer ?
- sur les possibilités d'innovation :
 - en essayant de mieux définir les souhaits des clients potentiels, c'est la phase de capture des besoins et de définition des exigences attendues,
 - en recherchant des nouvelles solutions technologiques.

1.3 Analyse fonctionnelle et le cahier des charges

D'après la norme AFNOR NF X 50-151, l'analyse fonctionnelle est une démarche qui consiste à rechercher, ordonner, caractériser, hiérarchiser et / ou valoriser les fonctions du produit attendu par l'utilisateur.

Elle permet donc de rechercher et caractériser les fonctions offertes par un produit placé dans un système pour satisfaire les besoins de son utilisateur.

L'objectif de l'analyse fonctionnelle est d'établir le **cahier des charges** du produit.

Pour établir le cahier des charges et analyser le produit nous allons utiliser un ensemble de diagrammes du langage de description SysML (Système Modeling Language).

Le cahier des charges doit permettre d'établir les différentes exigences que doit respecter le système.

1.4 Un langage de description des systèmes : SysML

Nous l'avons dit, il est difficile de décrire un système. La description littérale peut suffire pour décrire un système simple mais est généralement insuffisante pour décrire un système complexe.

La description littérale des systèmes étant souvent difficile et ambiguë, la description graphique est préférée. Le langage SysML est un langage graphique basé sur des diagrammes qui permet de décrire un système selon différents points de vue.

SysML est un langage d'étude et de description des systèmes.

Le langage est la capacité d'exprimer une pensée et de communiquer au moyen d'un système de signes (vocaux, gestuel, graphiques, tactiles, olfactifs, etc.) doté d'une sémantique, et le plus souvent d'une syntaxe. Plus couramment, le langage est un moyen de communication [wikipédia].

Le langage SysML (<http://fr.wikipedia.org/wiki/SysML>), correspond à cette définition, c'est un langage **graphique** qui comporte 9 diagrammes chacun décrivant le système selon un point de vue particulier.

C'est un langage basé sur UML², un langage de description des projets informatiques, il en reprend la symbolique et la syntaxe en ajoutant des diagrammes spécifiques à la description et l'analyse des systèmes et en supprimant ceux dédiés aux projets informatiques.

Le langage de description UML est utilisé par les plus grandes les sociétés informatiques, plusieurs logiciels dédiés à l'UML avec des plugins SysML existent³.

Les diagrammes SysML regroupent les différents diagrammes qui vont traduire les fonctionnalités, la structure, le comportement et les exigences du système.

2. http://fr.wikipedia.org/wiki/Unified_Modeling_Language

3. http://fr.wikipedia.org/wiki/Comparaison_des_logiciels_d'UML

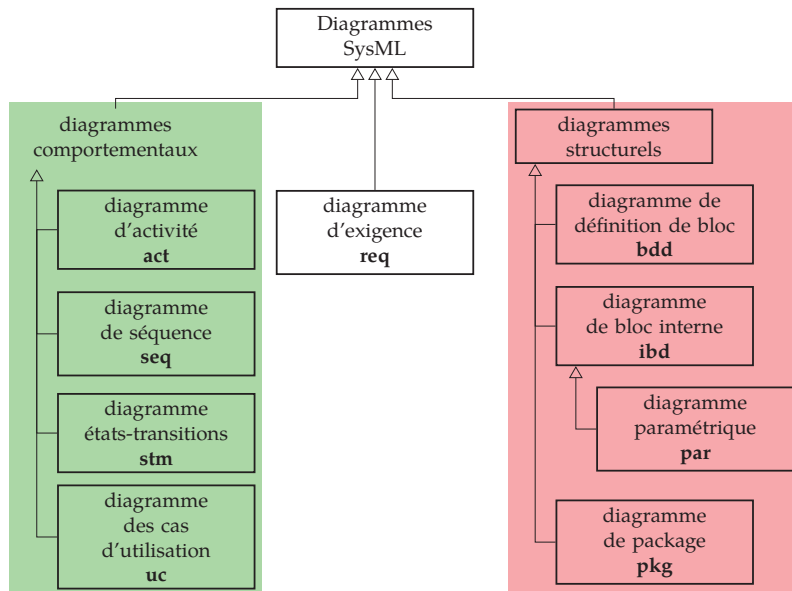


FIGURE 1.2 – Les diagrammes SysML

1.5 Exemple guidé : cafetière à capsules

1.5.1 Description commerciale

La cafetière LB est destinée aux petits espaces, aux bureaux, aux cabinets médicaux, Ses petites dimensions et ses lignes douces lui permettent de s'intégrer aussi bien sur un bureau que dans une cuisine. Elle est conçue pour une utilisation professionnelle.

Elle possède deux modes de fonctionnement principaux :

- un mode café court, espresso,
- un mode à volonté qui permet de déguster des cafés allongés, mais aussi des thés ou des chocolats.

Un mode de programmation facile d'accès permet de modifier le fonctionnement par défaut afin d'obtenir d'une simple pression sur la touche à volonté, la juste quantité de café.

Le bac à eau d'un volume de 1,2l est facile d'accès. le tiroir à capsules peut contenir 8 capsules usagées.

La cafetière LB est dotée d'une technologie qui procure un résultat parfait grâce à la pré-infusion et à l'extraction des arômes de café.



FIGURE 1.3 – Cafetière à capsules

Caractéristiques techniques :

- Alimentation électrique : 220-240 V – 50 Hz.
- Puissance nominale : 1300 W.
- Système électronique qui vérifie si le tiroir de capsules usagées est plein.
- Hauteur grille support de tasse réglable de 70 à 100 mm.
- Température de l'eau contrôlée électroniquement.
- Fonction économie d'énergie.
- Matériau de qualité : polycarbonate.
- Capacité du réservoir d'eau : 1,2 litre.
- Insertion manuelle de la capsule.
- Contrôle du niveau du réservoir d'eau par capteur flottant.
- Interface utilisateur 2 boutons de sélection.
- Doses programmables, arrêt automatique.
- Interface utilisateur d'alarme LED rouge.
- Éjection automatique des capsules usagées.
- Capacité du récipient à capsules usagées de 8 capsules Blue.
- Dimensions : 13 × 23,5 × 36 mm (L × H × P).
- Poids : 4,3 kg.

Utilisation

- Remplir le réservoir. Mettre sous tension.
- Placer une tasse sous la buse.
- Introduire une capsule, abaisser le levier.
- Un appui sur le bouton supérieur permet la délivrance d'un café court 40 ml (réglage usine) dès que la température est atteinte. La distribution s'arrête automatiquement à la fin de la distribution. Un nouvel appui pendant la distribution interrompt celle-ci.
- Le second bouton délivre de l'eau tant que le bouton est appuyé à condition que la température de l'eau soit suffisante.



FIGURE 1.4 – Pupitre de commande

- L'insertion d'une nouvelle capsule évacue automatiquement la capsule usagée.
- Si la quantité d'eau est insuffisante, la distribution ne débute pas.
- Le mode économie met en veille la cafetière après 30 minutes d'inactivité.
- Un simple appui sur un des deux boutons relance le chauffage et le cycle peut recommencer.

1.5.2 Décrire l'environnement : diagramme de contexte

Le diagramme de contexte va nous permettre de décrire l'environnement du système.

La première étape que se soit en phase de conception d'un nouveau produit ou de l'analyse de celui-ci consiste à capturer (recueillir) les besoins et le contexte. La définition du contexte commence par l'établissement de la frontière du produit étudié. Le produit est au centre et on trouve autour tous les intervenants, les acteurs du systèmes, c'est-à-dire :

- Définir le contexte général dans lequel le produit va être utilisé.
- Définir les acteurs humains ou non qui vont interagir avec le système.
- Définir les fonctionnalités attendues du système.
- Définir le contexte technique du produit.
- Définir le fonctionnement dynamique de chaque fonctionnalité.
- Définir les besoins en interface homme machine (IHM).
- Rédiger un cahier des charges fonctionnel et technique qui permettra à la fois de réaliser le produit et de le valider au fur et à mesure.

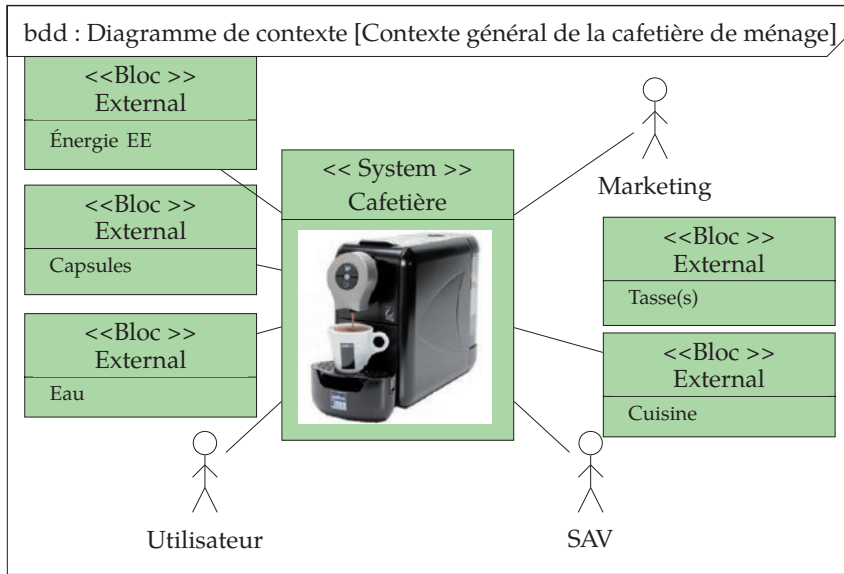


FIGURE 1.5 – Diagramme de contexte général

Le terme d'acteur (qui agit sur le système) est à prendre au sens large et pas uniquement au sens humain.

Dans ce diagramme, on retrouve les différents acteurs susceptibles d'avoir un rôle sur le système « Balance ».

On le limite ensuite à celui de l'utilisation courante avec l'acteur principal.

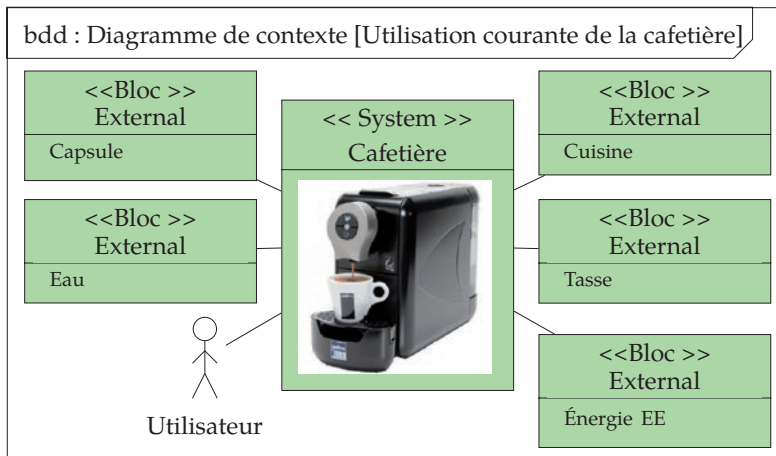


FIGURE 1.6 – Diagramme de contexte limité à l'usage principal

Remarque : le diagramme de contexte n'est pas un diagramme défini dans la norme SysML, il est construit à partir d'un diagramme de définition de bloc (bdd) ou d'un diagramme de blocs internes (ibd).

1.5.3 Identifier les cas d'utilisation : diagramme des cas d'utilisation

Le système étudié est toujours analysé au travers de différents point de vue ou en utilisant le vocabulaire des diagrammes SysML, au travers de différents cas d'utilisation (*use case* en anglais⁴).

diagramme	description
uc use case cas d'utilisation	Le diagramme de cas d'utilisation permet de représenter les fonctionnalités du système dans leur contexte

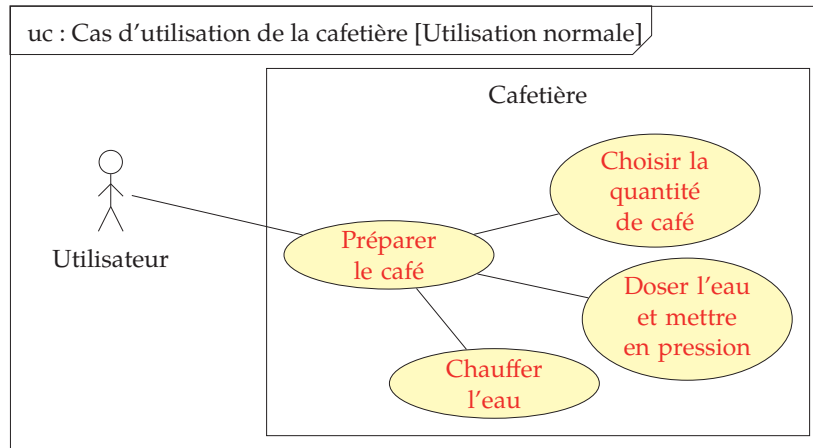


FIGURE 1.7 – Diagramme général des cas d'utilisation de la cafetière

Le diagramme de cas d'utilisation est un schéma qui montre les cas d'utilisation (représenté par des ovales) reliés par des associations (lignes) à leurs acteurs (icône d'un stick man). Chaque association signifie simplement « participe à ».

Les cas d'utilisation sont décrits par un verbe à l'infinitif.

On peut commencer par définir les différents acteurs du système et pour chacun définir les fonctions.

Du point de vue de l'utilisateur, on distingue 3 cas d'utilisation :

- Préparer le café.
- Chauffer l'eau.
- Doser l'eau et mettre en pression.
- Choisir la quantité de café.

Il est possible sur ce diagramme (figure 1.8) de préciser aussi la nature des liens entre les différents cas d'utilisation :

- un lien de type « include » entre « Préparer le café » et « Chauffer l'eau » et entre « Préparer le café » et « Doser l'eau et mettre en pression », ces deux services sont nécessaires pour obtenir un café expresso ;
- un lien de type « extend » entre « Préparer le café » et « Choisir la quantité de café » le choix de la quantité de café, une tasse courte ou longue n'est pas une option nécessaire à la réalisation d'un expresso.

4. Vous avez noté que les différents diagrammes et éléments sont notés en anglais, la norme actuellement n'est définie qu'en anglais.

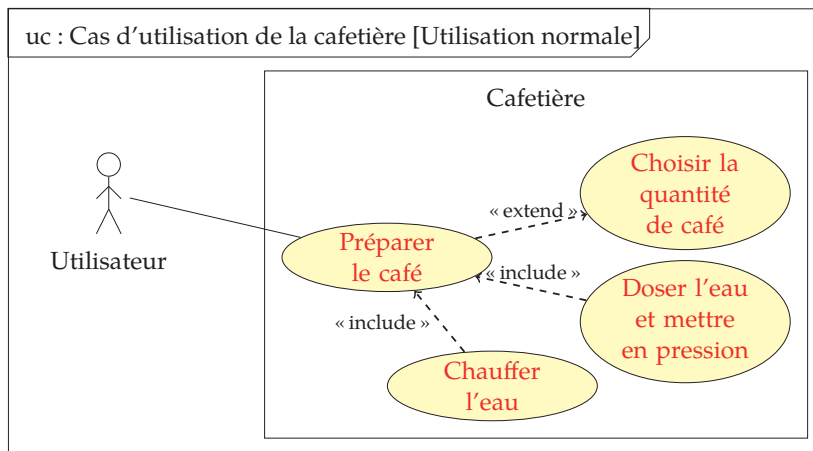


FIGURE 1.8 – Cas d'utilisation de la cafetière et liens

1.5.4 Décrire les exigences du système : diagramme d'exigence

En parallèle à la définition des cas d'utilisation, il faut se poser la question des capacités que doit posséder le système mais aussi les contraintes qu'il doit respecter. Dans la symbolique du langage de description SysML, ces contraintes et ces capacités sont les *exigences* que doit remplir le système.

Le diagramme d'exigence est le schéma associé à cette description.

L'objectif du *diagramme d'exigences* est de traduire graphiquement et hiérarchiquement les capacités et les contraintes que doit satisfaire le système.

Le (les) diagramme(s) d'exigences va (vont) permettre de décrire les besoins que doit satisfaire le système. Ils permettent de construire la hiérarchie des exigences en utilisant des mécanismes tels que la composition et la dérivation, ainsi que des relations avec d'autres éléments de modélisation pour tracer, raffiner, satisfaire ou vérifier ces exigences.

diagramme	description
req requirements exigences	Le diagramme des exigences permet de représenter les contraintes techniques ou non du système.

On peut commencer par définir les exigences générales du système.

L'exigence principale de la cafetière est bien sûr la **Préparation du café**. Le système doit pour cela :

- d'assurer un **Chauffage** suffisant de l'eau,
- de mettre en **Pression** l'eau,
- et permettre un **Dosage** en fonction du choix de l'utilisateur (court ou long).

Une dernière exigence, plus ergonomique que fonctionnelle peut être ajoutée :

- faciliter le transport et l'**Utilisation**.

On retrouve sur le diagramme les exigences principales de la cafetière, elles sont toutes les trois liées à l'exigence principale par un lien de contenance, en effet, ces trois exigences sont nécessaires pour réaliser un expresso. Par contre, la dernière exigence participe à l'amélioration de l'utilisation mais n'est pas nécessaire à la réalisation du café, cette exigence est précisée par un lien de dérivation d'exigence.

Cette analyse peut encore être affinée. Sur le diagramme d'exigences suivant (figure 1.10), un nouveau niveau d'exigence a été ajouté sous l'exigence **Utilisation** qui apporte des précisions sur les notions d'autonomie et d'utilisation.

Sur la figure 1.10 on distingue différents liens entre les exigences ou les autres éléments, la signification de ces liens est précisée dans le tableau 1.1.

En complément de l'exigence **Chauffage**, l'exigence de précision du cahier des charges a été ajoutée. Le lien entre les deux exigences est un lien qui affine la description, il est noté avec le mot clef « refine ».

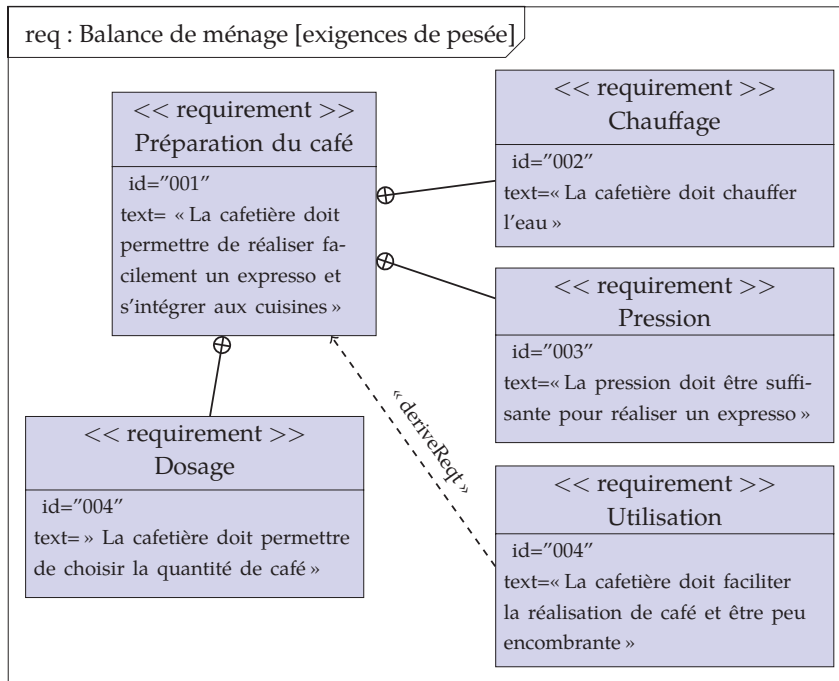


FIGURE 1.9 – Diagramme d'exigence de la cafetière expresso

On note aussi que le respect de l'exigence **Réservoir** est réalisé par un réservoir en polycarbonate. Cette solution est précisée dans un « block » et un lien noté « satisfy » lie l'exigence au bloc.

Contenance	précise la décomposition d'une exigence en exigences unitaires (l'exigence principale est cotée cercle avec la croix)	
Raffinement refine	l'exigence pointée par la flèche est précisée par celle à l'autre extrémité	
Derivation deriveReqt	indique que l'exigence pointée par la flèche induit l'exigence en queue de flèche	
Satisfaction satisfy	l'exigence pointée par la flèche est satisfaite par l'élément (en général un bloc) en queue de flèche	

TABLE 1.1 – Les différents liens du diagramme d'exigence

Il est possible d'aller plus loin dans la description des exigences en précisant la nature des exigences.

- Exigences fonctionnelles - **functionalrequirement** - elles précisent les exigences qui découlent d'une caractéristique fonctionnelle que doit posséder le produit.
- Exigences physiques - **physicalrequirement** - elles décrivent les exigences qui découlent d'une propriété physique du produit.
- Exigences de performance - **performancerequirement** - décrivent le niveau de qualité d'une exigence.
- Exigences d'usage - **usabilityrequirement** - décrivent les critères d'utilisation (d'usage) que doit posséder le produit.

Le diagramme des exigences de la figure 1.10 précise pour la cafetière expresso la décomposition de ces exigences.

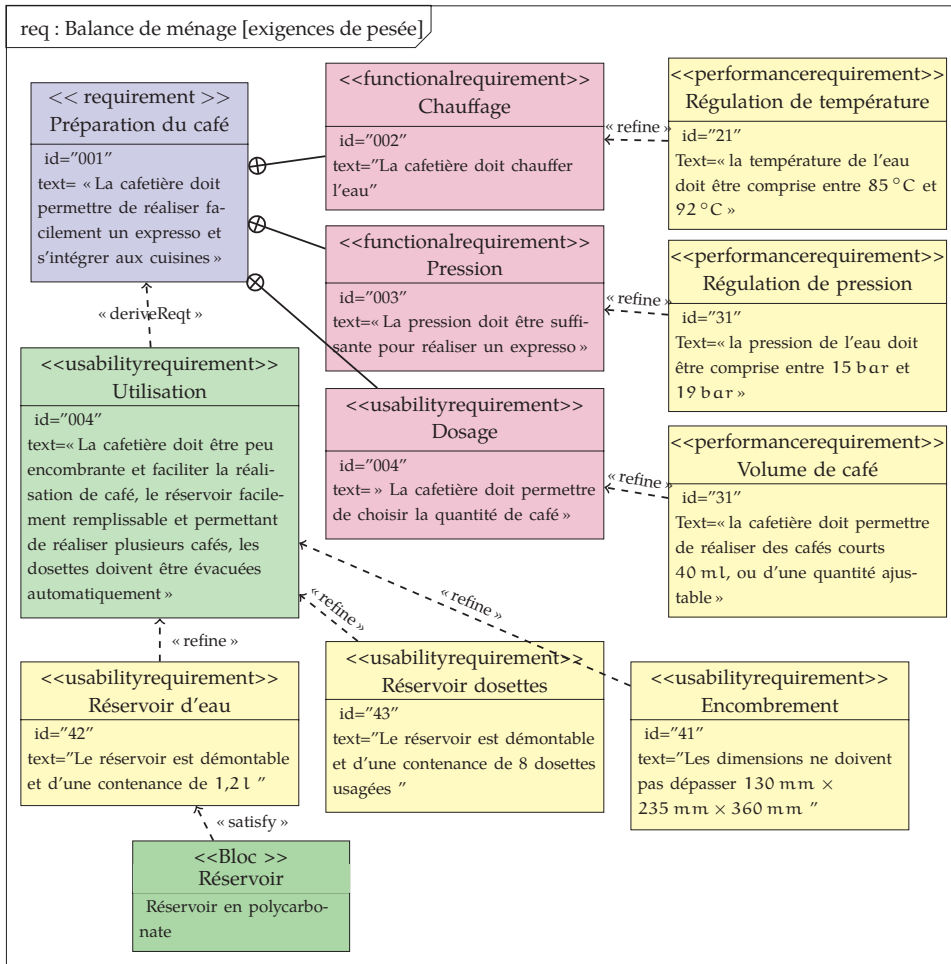


FIGURE 1.10 – Diagramme d'exigence avec nature des exigences

Il est aussi possible de décrire des exigences qui ne sont pas directement fonctionnelles comme des exigences commerciales, de marketing ou du design.

Le diagramme des exigences ne sert pas seulement à placer des contraintes dans le modèle. Il permet aussi de ramener des éléments venant d'autres diagrammes du modèle et ainsi de vérifier qu'une exigence a bien été prise en compte. Le « block » **Réservoir** est un élément qui vient du diagramme de définition de bloc qui satisfait une des exigences du système (lien **satisfy**).

1.5.5 Préciser la constitution du système : diagramme de définition de blocs

L'étape suivante de l'analyse du système doit décrire les éléments constituant le système. Le diagramme de définition de blocs (bdd) est utilisé pour préciser les éléments constituant le système.

type abrégé diagramme	description
bdd : definition de bloc	Le diagramme de définition de blocs représente la structure globale du système. il montre les constituants de base statiques (voir 1.5.5) : blocs, compositions, associations, attributs, opérations, généralisations,...

Ce diagramme est construit en respectant la structure physique et logicielle du système. Les liens (voir tableau 1.2) entre les différents constituants sont indiqués par des liens précisant la dépendance de chacun des constituants.

Composition	le bloc conteneur a nécessairement besoin du bloc contenu pour fonctionner	conteneur → contenu
Agrégation	le bloc conteneur n'a pas nécessairement besoin du bloc contenu	conteneur ◊ → contenu
Association	les blocs ne sont pas hiérarchiquement liés	← →

TABLE 1.2 – Les différents liens du diagramme de définition de bloc

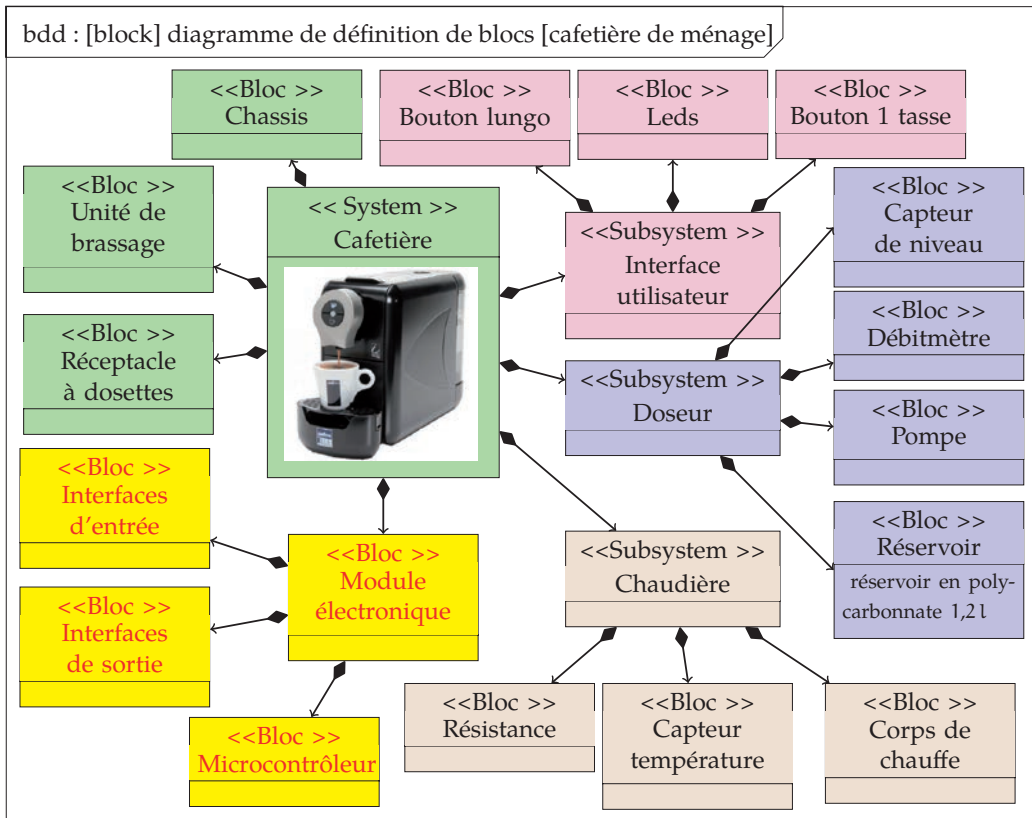


FIGURE 1.11 – Diagramme de définition de blocs de la cafetière de ménage

Sur le diagramme de la figure 1.11 on distingue les constituants principaux (le châssis, l'unité de brassage, le réceptacle à dosette) et les différents sous systèmes (le module électronique, la chaudière, l'interface utilisateur, le doseur), tous ces éléments sont nécessaires au fonctionnement de la cafetière, ce qui est précisé par les liens de composition.

Chaque bloc peut être plus ou moins détaillé en fonction de la finesse de l'étude. Un bloc peut ainsi comporter plusieurs éléments complémentaires :

- *values* : précisent quantitativement les valeurs caractéristiques du bloc;
- *constraints* : les contraintes précisent des relations entre les paramètres du bloc;

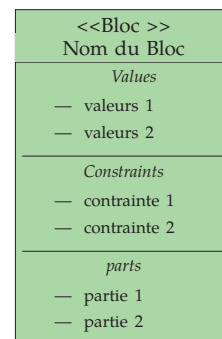


FIGURE 1.12 – Détails

- *params* : les paramètres ;
- *parts* : précisent les parties (sous-parties) constituant le bloc.

1.5.6 Préciser les liens et les flux : diagramme de blocs interne

Le diagramme de blocs interne (ibd) permet lui de préciser les flux qui transitent entre les différents blocs du système.

type abrégé diagramme	description
ibd : internal block bloc interne	Le diagramme de bloc interne montre l'organisation interne d'un bloc et les flux qui relient les blocs le constituant (voir 1.5.6)

Les flux peuvent être de toute nature : matière, énergie, information. Sur chaque bloc, les ports précisent la nature des flux échangés.

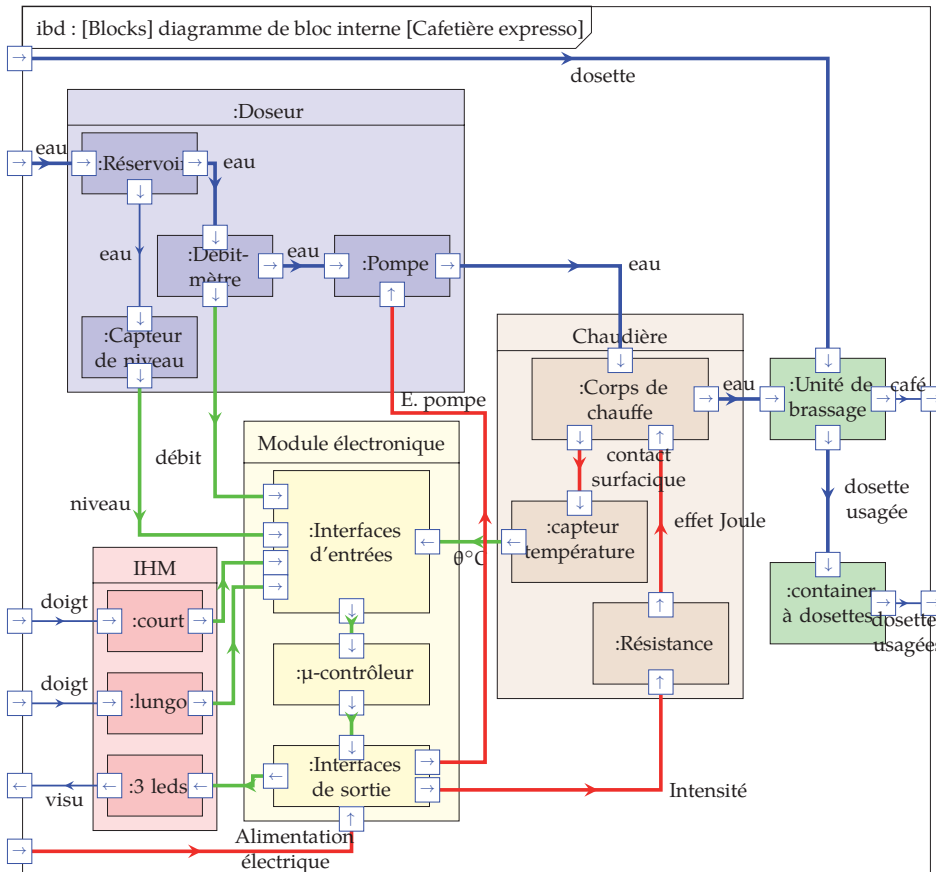


FIGURE 1.13 – Diagramme de bloc interne

On retrouve ainsi sur la figure 1.13 le diagramme de bloc interne de la cafetière de ménage, on y distingue :

- Le flux d'énergie électrique qui va de l'extérieur au module électronique puis alimente les différents composants.

- Le flux d'eau qui traverse le doseur puis la chaudière puis l'unité de brassage pour obtenir finalement le café.
- Le flux de dosette, vers l'unité de brassage puis vers le container à dosettes qui doit ensuite être évacué.
- Les différents flux d'informations des capteurs et des boutons vers les interfaces d'entrées du module électronique. Ces différentes données sont utilisées par le microcontrôleur pour piloter via les interfaces de sorties la pompe et la résistance de chauffage et informer l'utilisateur via les 3 leds.

Le logiciel n'apparaît pas, il est inclus dans le bloc du microcontrôleur.

Nous utiliserons ce diagramme pour décrire les chaînes d'énergie et d'information d'un système en l'associant avec d'autres représentations.

1.5.7 Décrire la succession des états : diagramme d'états-transitions

Le diagramme d'états-transitions (*State machine diagram*) permet de décrire la suite des états d'un système ou d'un sous-système. Chaque état décrit une situation dans laquelle se trouve le bloc, les liens entre les différents états représentent les différentes évolutions possibles d'un état en un autre. Le passage d'un état à un autre se fait en franchissant la transition liée au lien.

diagramme	description
stm state machine état-transition	Le diagramme d'états illustre les changements d'états d'un système ou d'un sous-système. Il décrit les transitions entre états et les actions qu'un système réalise en réponse à des événements.

L'objectif du diagramme état-transition est de décrire le fonctionnement et la succession des différentes actions que réalise le système.

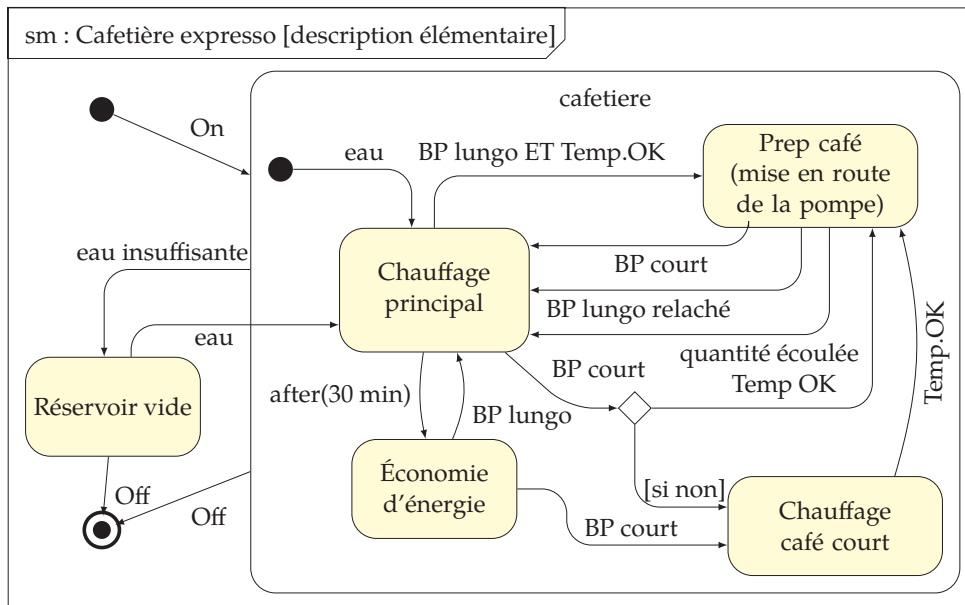


FIGURE 1.14 – Diagramme états-transitions de la cafetière espresso [description élémentaire]

Le diagramme de la figure 1.14 décrit les différents états que prend la cafetière et la succession de ces états en fonction de l'évolution des entrées. Le fonctionnement peut être décrit à partir de 4 états principaux.

La mise en route lance le fonctionnement, si de l'eau est présente en quantité suffisante, le chauffage est mis en route.

L'appui du bouton poussoir pour obtenir un café court lance la distribution d'un café court, si la température est suffisante, dans le cas contraire, elle commence dès que la température minimale est atteinte. La distribution s'arrête dès que la quantité prévue est délivrée, un nouvel appui sur le même bouton arrête aussi la distribution.

Un café long s'obtient en appuyant et maintenant le bouton correspondant appuyé à condition que la température minimale soit dépassée. La distribution s'arrête dès que l'on relâche le bouton.

La cafetière se met en économie d'énergie dès qu'elle n'est pas utilisée pendant 30 min, un appui sur un bouton la réveille.

En l'absence d'eau, le fonctionnement en cours s'interrompt et ne peut redémarrer qu'après avoir rempli le réservoir.

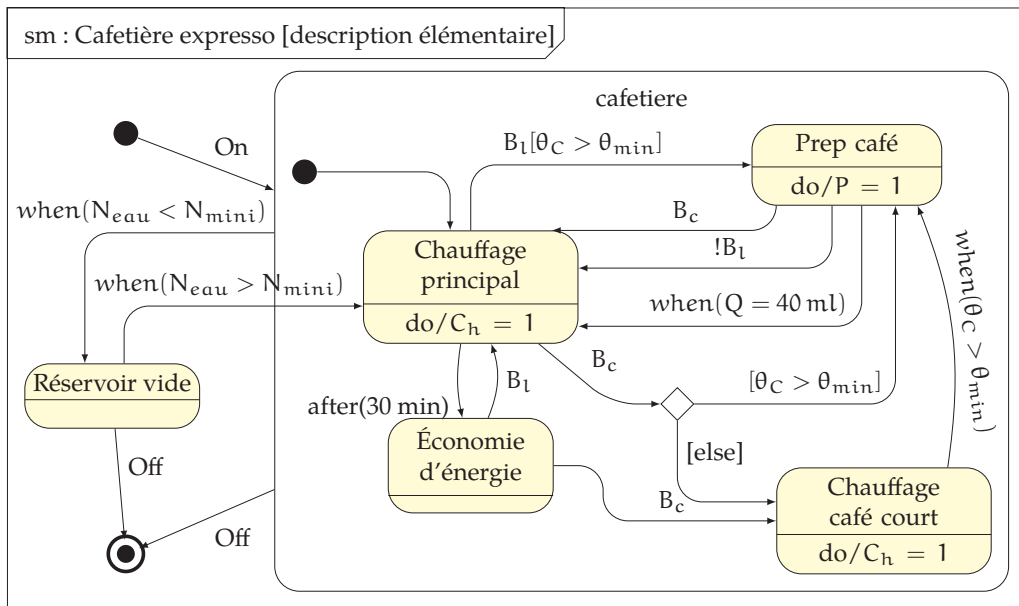


FIGURE 1.15 – Diagramme états-transitions de la cafetière expresso

Les actions associées aux états peuvent être réalisées à trois instants particuliers :

- à l'entrée dans l'état, cet instant est identifié par le mot clef : *entry*, la tâche associée est effectuée à chaque fois que l'état est activé ;
- à la sortie de l'état, cet instant est identifié par le mot clef : *exit*, dès qu'une transition peut être franchie, l'action associée à la sortie de l'état est réalisée ;
- pendant la durée de l'état : le mot clef *do* précise les actions qui seront réalisées pendant la durée d'activité de l'état.

La syntaxe complète des transitions s'écrit : *événement*[*garde*]/*action* et comporte trois éléments.

- L'*événement* est l'élément déclenchant la transition, dès qu'il est vrai (état logique vrai) le franchissement peut avoir lieu.
- La *condition de garde*, est une condition logique optionnelle qui, lorsqu'elle est présente doit être vraie pour que la transition soit franchie.
- L'*action*, est réalisée, si elle est présente, dès que la transition est franchie.

Un état peut inclure lui-même un diagramme état-transition.

Le diagramme état-transition sera décrit plus complètement à la suite lors de l'étude des systèmes à événements discrets.

1.5.8 Décrire le comportement : diagramme de séquence

À chaque cas d'utilisation correspond un diagramme de séquence, ce diagramme décrit les interactions entre les différents éléments qui participent à la réalisation du cas d'utilisation (les acteurs et le système). Il répond à la question : « Comment est réalisé ce cas d'utilisation ? ».

diagramme	description
sd sequence séquence	Le diagramme de séquence permet de représenter les échanges entre différentes parties d'un système, et avec des systèmes ou acteurs externes au système. Il décrit, en particulier, les cas d'utilisation.

Le diagramme ci-dessous décrit une partie des échanges d'information entre les différents acteurs du système.

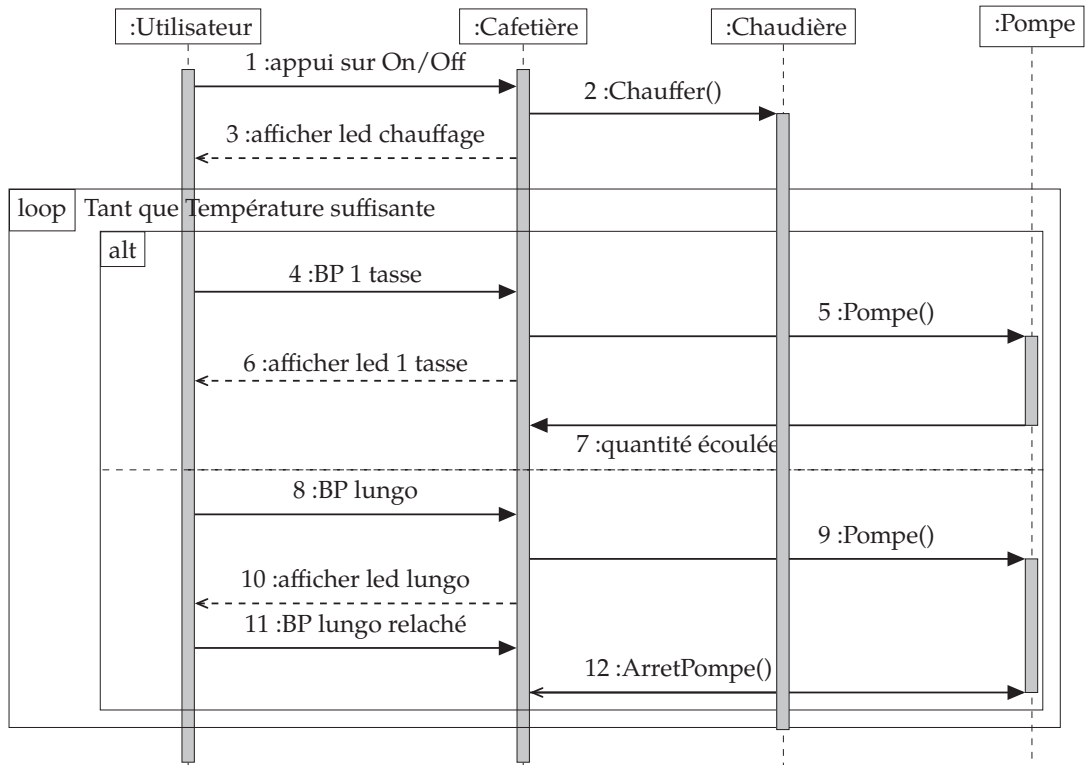


FIGURE 1.16 – Diagramme de séquence de la cafetière expresso

On retrouve sur le diagramme de séquence de la cafetière (figure 1.16) les principaux éléments :

- Les acteurs et le système : chaque élément est représenté dans un cadre, une ligne de vie en pointillé verticale, montre le déroulement du temps.
- Les 3 types de messages échangés :

Message synchrone

Ce message est émis par un des éléments vers un autre. Le message émis est précisé sur la flèche. Ce type de message attend une réponse.

1 : message synchrone

Réponse à un message synchrone

La réponse est précisée sur la flèche.

2 : réponse

Message asynchrone

Ce message est émis sans attendre de réponse.

Quelques structures de description de ce diagramme :

loop : le contenu de la structure *loop* est exécuté en boucle tant que la condition n'est pas vraie (structure Tant Que cond. Faire ...);

alt : la structure *alt* précise les évolutions alternatives (structure Si cond Alors cas vrai Sinon ...);

opt : la structure *opt* précise les évolutions optionnelles (structure Si cond Alors Faire ...).

1.5.9 Simuler et valider le comportement : diagramme paramétrique

Le diagramme paramétrique est construit à partir du diagramme des blocs internes, en complétant celui-ci à l'aide des équations de comportement, il est possible alors de valider le comportement du système.

type abrégé diagramme	description
par : parametric paramétrique	Le diagramme paramétrique modélise le comportement d'un bloc ou plusieurs dans le temps à partir des équations qui le régissent

1.5.10 Décrire l'organisation matérielle et logicielle : diagramme de package

Le diagramme de package n'est pas explicitement au programme. Il permet de structurer l'ensemble des diagrammes.

type abrégé diagramme	description
pkg : package package	Le diagramme de packages montre l'organisation logique du modèle et les relations entre packages

1.6 Classification des systèmes

1.6.1 Selon la nature de la commande et de l'énergie

Les systèmes peuvent être classés dans trois grandes catégories selon la nature de la commande et de l'énergie :

Systèmes non mécanisé : ces systèmes regroupent tous les systèmes pour lesquels l'utilisateur contribue à la fois à la commande et à l'énergie. Un vélo est un bon exemple de cette famille de système.

Systèmes mécanisés : l'utilisateur ne fournit plus l'énergie nécessaire au fonctionnement, son rôle est de commander le système. L'utilisateur est nécessaire, le système n'étant pas capable de décider. Une moto, une voiture, un aspirateur, sont des exemples de système mécanisé.

Systèmes automatisés : l'algorithme de décision est implémenté dans la partie commande du système, à partir des consignes de fonctionnement indiquées par l'utilisateur, le système peut évoluer seul. Un robot aspirateur, est un exemple de l'évolution de l'aspirateur. La voiture sans conducteur est un modèle du futur de la voiture automatisée.

1.6.2 Selon la nature des informations

Une autre possibilité de classification est de s'intéresser à la nature des informations échangées :

Systèmes tout ou rien : les systèmes tout ou rien sont les systèmes pour lesquels l'évolution du comportement ne dépend que de l'évolution de variables binaires (marche/arrêt, ouvert/fermé, présent/absent, 5 V/ 0 V, ...). Dans un système tout ou rien, les grandeurs physiques ne sont prises en compte que lors du franchissement des seuils ($\text{température} > T_{\text{seuil}}$).

Systèmes continus : dans un système continu, on ne s'intéresse pas uniquement au franchissement de seuils des grandeurs physiques, mais à l'évolution temporelle des signaux analogiques que manipule le système.

Systèmes numériques échantillonnés : l'informatisation des parties commandes (automate, microprocesseur, microcontrôleur, ...) qui, même si elle a une capacité de calcul et une fréquence de fonctionnement de plus en plus grande, ne peut prendre en compte l'évolution d'une grandeur physique qu'à des instants particuliers. Il est donc nécessaire d'échantillonner le signal physique, c'est-à-dire le prélever à des instants T_e et de numériser ce signal afin de le rendre compatible avec les unités de traitement numérique.

1.7 Description générique d'un système automatisé

On peut représenter la structure générale d'un système automatisé par le schéma de la figure 1.17.

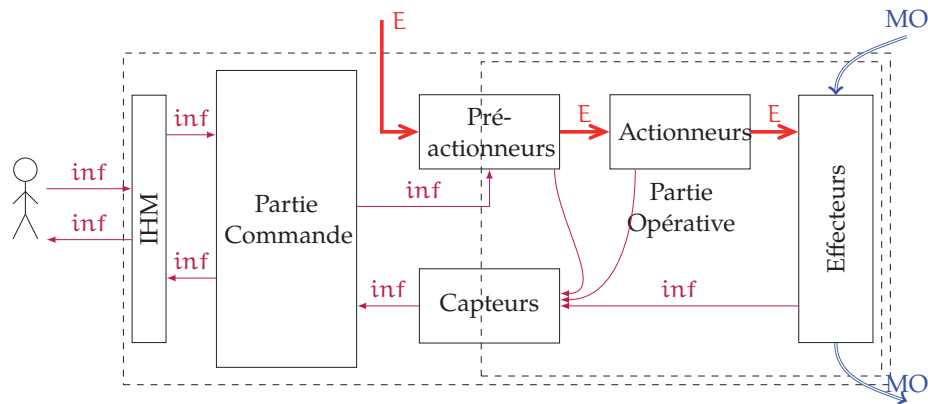


FIGURE 1.17 – Décomposition structurelle d'un système automatisé

On retrouve sur ce schéma, les principaux constituants d'un système :

- une partie commande : elle communique avec l'opérateur mais aussi les autres systèmes, elle émet vers la partie opérative les signaux de commande des actionneurs, elle reçoit des capteurs les informations sur le système;
- une partie opérative : elle comporte les différents constituants qui agissent sur la **matière d'œuvre** pour la modifier, les actionneurs nécessaires à ces actions;
- une interface avec l'opérateur : le pupitre ou IHM comporte les constituants qui facilitent le dialogue avec l'utilisateur;
- les capteurs prélèvent sur la partie opérative l'état des différents constituants;
- les pré-actionneurs ou modulateurs, autorisent le passage de l'énergie vers les actionneurs.

Une représentation usuelle de ces chaînes fonctionnelles est de les décrire à partir des fonctions réalisées par les différents constituants (figure 1.18).

Cette décomposition fait apparaître deux chaînes :

- la chaîne d'énergie (ou d'action)
- la chaîne d'information.

1.7.1 Chaîne d'information

Cette chaîne est constituée des éléments qui manipulent les informations sous ses diverses formes. On retrouve ainsi :

- un constituant chargé de gérer le système : en général ce constituant est construit autour d'un microprocesseur ou d'un microcontrôleur (PC, automate programmable, carte micro programmable, ...) mais peut aussi être réalisé à partir de constituants élémentaires à base d'amplificateurs opérationnels et de composants logiques ou séquentiels ;
- une interface avec l'utilisateur (IHM : interface Homme Machine) chargé de communiquer avec l'opérateur aussi bien en entrée qu'en sortie (clavier, écran, HP,...) ;
- de capteurs prélevant sur le système des informations physiques (pression, température, vitesse, position,...) ;
- des codeurs/convertisseurs chargés de traiter les signaux issus des capteurs (Convertisseur Analogique Numérique, Convertisseur Numérique Analogique, filtre, ...);
- des interfaces et différents constituants de communication.

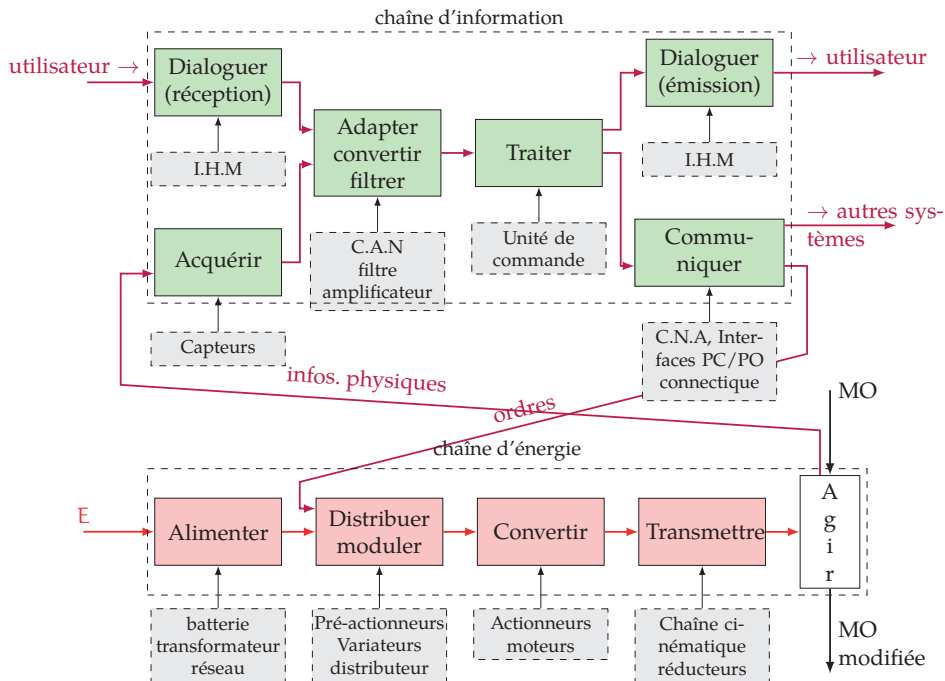


FIGURE 1.18 – Description fonctionnelles des chaînes d'information et d'énergie

1.7.2 Chaîne d'énergie

Cette chaîne est constituée des éléments qui participent à la transformation de l'énergie, de l'énergie brute du réseau aux constituants agissant réellement sur le produit :

- l'alimentation regroupe les constituants participant à la conformation de l'énergie du réseau en une énergie utilisable par le système (transformateur, régulateur,...) ;
- le modulateur autorise le passage de l'énergie vers les actionneurs et module celle-ci en fonction des ordres de commande envoyés par la chaîne d'information ;
- les convertisseurs regroupent les constituants capables de transformer l'énergie en une autre énergie, les moteurs, les vérins, les radiateurs, ... sont des éléments de cette famille ;

- transmetteurs : boîte de vitesse, engrenage, poulie courroie, ... ;
- effecteurs : les éléments agissants.

1.7.3 Description SysML

Cette description usuelle de la structure d'un système automatisé peut être décrite à partir des diagrammes SysML.

Le diagramme des blocs internes (ibd) est un diagramme pertinent pour décrire ces deux chaînes et les différents flux entre les constituants et l'extérieur.

De manière générale, un système automatisé peut être décrit par le diagramme SysML de la figure 1.19. Il comporte une partie commande (régulateur, contrôleur, ...) et une partie opérative (système régulé, système asservi,...). Le second diagramme (figure 1.20) précise les constituants et les flux entre ceux-ci.

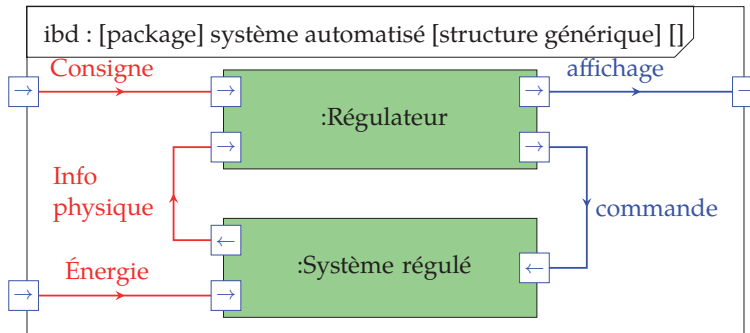


FIGURE 1.19 – Structure générique d'un système automatisé

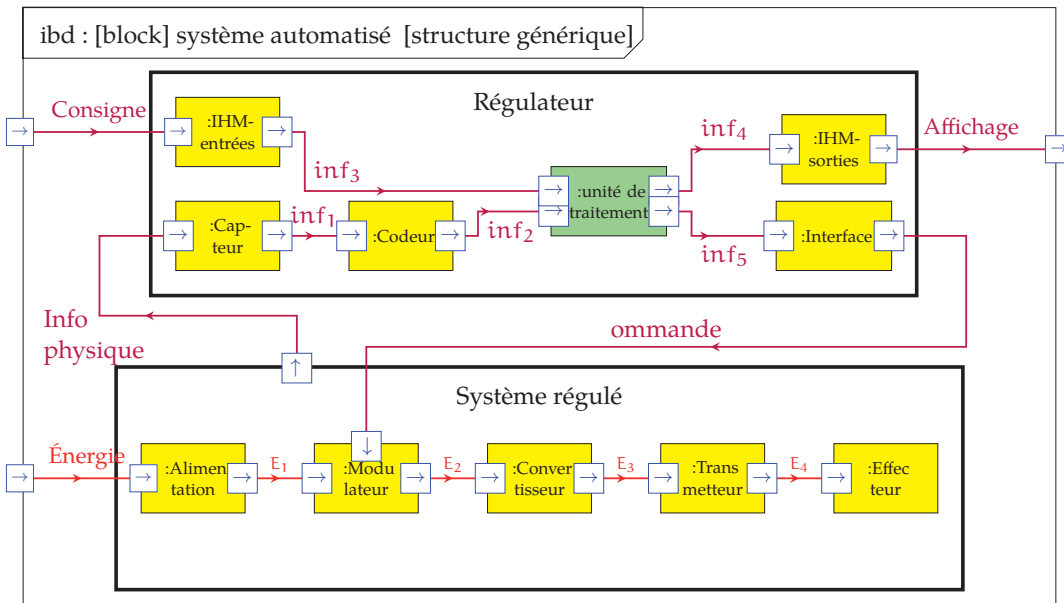









FIGURE 1.20 – Structure générique d'un système automatisé - Détails




1.7.4 Les constituants de la chaîne d'énergie

Les exemples ci-dessous ne sont bien sûr pas exhaustifs, il existe un très grand nombre de solutions technologiques pour ces différentes fonctions. Je vous invite à chaque fois que vous rencontrez un nouveau constituant à chercher sur internet le fonctionnement de ce constituant afin d'améliorer votre culture technologique.





a) Alimenter

<p>Pile électrique</p> 	<p>Réseau électrique</p> 	<p>Éolien</p> 	<p>Solaire</p> 
<p>Carburant</p> 	<p>Pneumatique</p> 	<p>Pile à hydrogène</p> 	<p>Autres</p> <p>...</p>

b) Distribuer

Énergie électrique		Énergie pneumatique
Relais électrique	Variateur électrique	Distributeur pneumatique
		

c) Convertir

Énergie électrique		Énergie pneumatique
Moteur rotatif	Moteur linéaire	Pompe
		
		Vérin
		

d) Transmettre





Énergie mécanique		
Poulie-courroie	Pignon-crémaillère	Engrenages
		

1.7.5 Constituants des chaînes d'information





a) Détecter

Il existe des capteurs à peu près pour tous les phénomènes physiques à détecter :



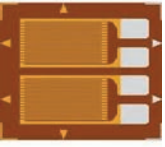
Détection de présence

capacitif	inductif	optique	à contact
			

Détection de position




capteur optique incrémental	capteur optique absolu	capteur angulaire potentiométrique	capteur de distance à ultrasons
			

Autres

génératrice tachymétrique	thermocouple	jauge de déformation
		

N'hésitez pas à rechercher sur Internet d'autres technologies de capteur.

b) Traiter

micro-ordinateur	micro-contrôleur	automate programmable
		

1.8 Feuille de travaux dirigés n°1

Exercice 1 - Activités du cours

Corrigé page 33

A. Du télégraphe au smartphone

Q1. Préciser en quelques mots les besoins satisfaits par : télégraphe, téléphone, mobile de première génération, les smartphones actuels.

Q2. Quels besoins pourraient aussi satisfaire nos futurs smartphones ?

B. Aspirateur

Q3. Décrire l'aspirateur automatique de la figure 1.1. en précisant les différentes exigences qu'il doit satisfaire.

Exercice 2 - Hydroplaneurs

Corrigé page 33

Les hydroplaneurs sont développés et utilisés par des équipes de scientifiques, comme celles de l'IFREMER (institut français de recherche pour l'exploitation de la mer) pour mesurer certaines caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer, en surface et en profondeur. Pour capter et enregistrer ces caractéristiques, on peut utiliser différents systèmes, comme des bouées, des stations sous-marines fixes ou des bateaux. Les hydroplaneurs complètent ces systèmes classiques.

L'hydroplaneur étudié est conçu pour naviguer en plongée la majeure partie de son temps.

Comme les planeurs aériens, ces engins ne sont pas équipés de système de propulsion et utilisent la portance de leurs ailes et les courants marins pour naviguer sous la mer.

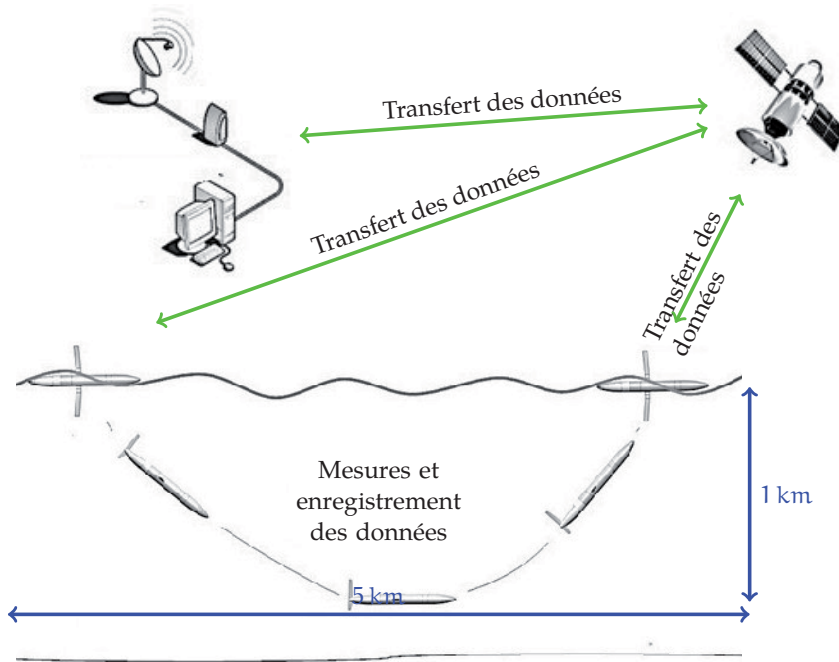


FIGURE 1.21 – Schéma de principe du fonctionnement d'un hydroplaneur

Pour transmettre l'ensemble des informations acquises durant la phase de plongée, il remonte régulièrement à la surface pour communiquer avec des bases terrestres spécialisées dans l'acquisition et le traitement de ces données.

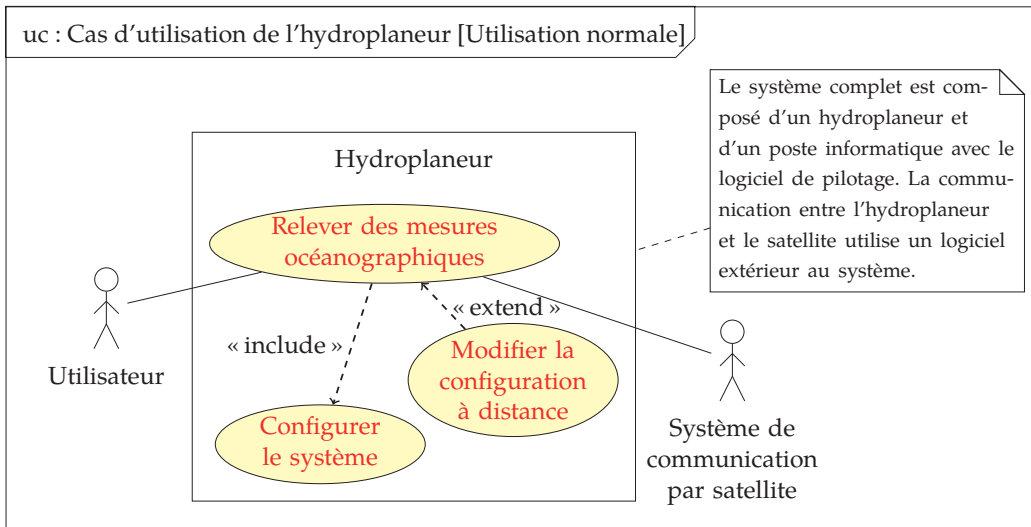


FIGURE 1.22 – Cas d'utilisation principal de l'hydroplaneur

L'hydroplaneur étudié embarque son énergie dans un nombre limité de batteries sans qu'il soit prévu de les recharger. Ses concepteurs sont donc soumis à de fortes contraintes de consommation et ils cherchent les solutions techniques les plus économiques pour permettre à l'appareil de passer plusieurs mois en mer avant d'être repêché.

L'autonomie de fonctionnement recherchée est de 140 jours de navigation, correspondant à 500 cycles de descente/montée (soit environ 3 000 km parcourus).

A. Principes de fonctionnement

A.1. Acquisition des données océanographiques

L'engin est muni de différents capteurs, comme le capteur CTD permettant d'acquérir en temps réel 3 grandeurs physiques : la température de l'eau, sa salinité et sa densité (relevé type figure 1.23).

Dans la mer, les mouvements des masses d'eau sont régis par trois facteurs principaux : les vents de surface, la température, la salinité.

Une masse d'eau chaude est moins dense qu'une masse d'eau froide ce qui entraîne un mouvement ascendant de cette eau plus chaude. Une eau salée est plus dense qu'une eau douce ce qui entraîne un mouvement descendant de cette eau plus salée. Les mesures de salinité sont effectuées en mesurant la conductivité de l'eau, qui dépend directement de sa charge en sel, à une certaine température et pression.

Les données analogiques sont recueillies, converties, numérisées et stockées dans les mémoires actives de l'hydroplaneur.

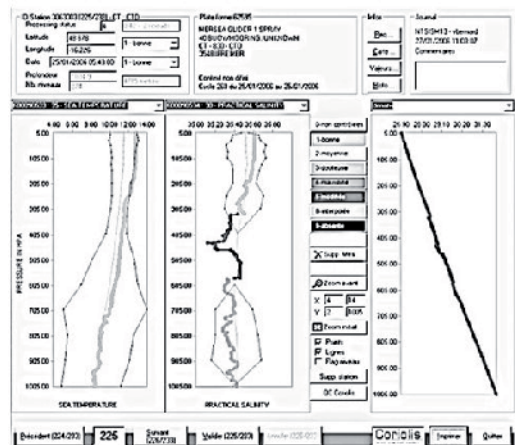


FIGURE 1.23 – Exemple de relevé

A.2. Transmission des données et connexion de l'hydroplaneur aux réseaux sans fil

À chaque remontée en surface, l'hydroplaneur se connecte à un réseau sans fil (IRIDIUM) afin de transmettre les données enregistrées.

L'hydroplaneur dispose de trois antennes logées dans la dérive et dans chaque aileron stabilisateur. Cette solution implique que, pour émettre en surface, l'engin pivote sur lui-même d'un quart de tour pour faire émerger une des deux antennes dédiées au réseau IRIDIUM.

Ce mouvement est obtenu par le déplacement d'une masse excentrée autour de l'axe longitudinal du planeur.

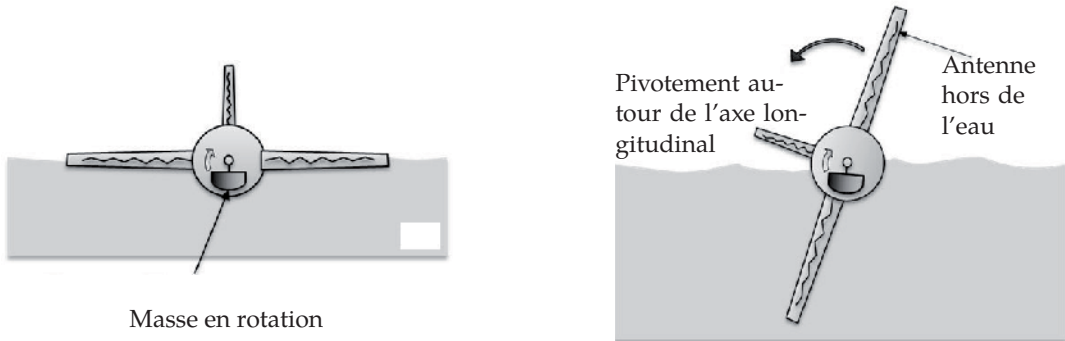


FIGURE 1.24 – Principe de la rotation de l'hydroplaneur

A.3. Récupération de l'hydroplaneur

En fin de charge des batteries ou en cas de souci technique, l'hydroplaneur dispose d'une balise ARGOS (dont l'antenne est dans la dérive verticale) qui permet de le localiser et d'envoyer un navire pour le récupérer.

A.4. Déplacement sous-marin

L'appareil utilise le principe de la poussée d'Archimède.

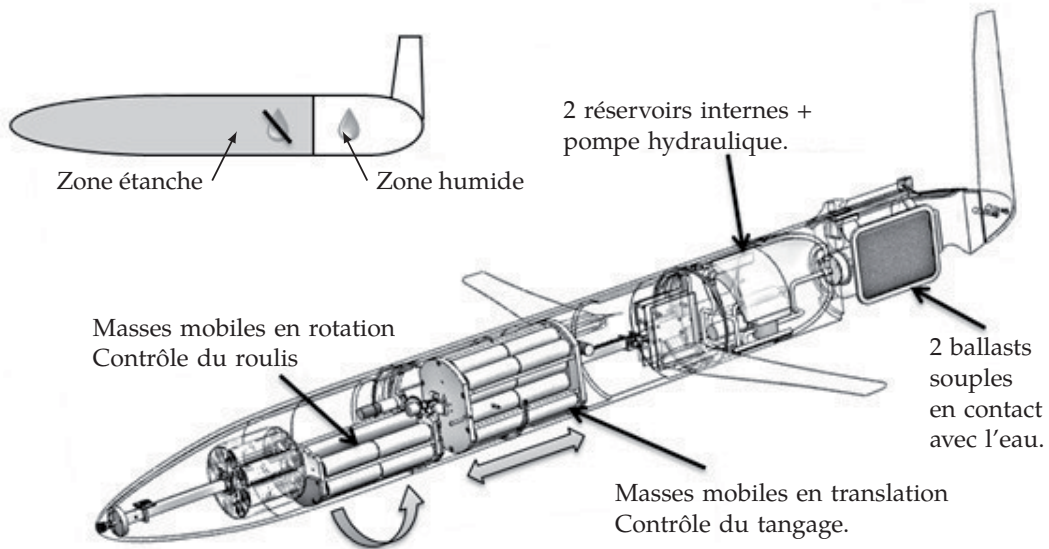


FIGURE 1.25 – Architecture générale

La poussée varie en fonction du volume de liquide déplacé. Elle s'applique au centre de poussée (centre de gravité du volume de liquide déplacé) et est dirigée du bas vers le haut.

MANUEL DE SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Cet ouvrage s'articule autour du programme de sciences industrielles de l'ingénieur (SII) de première année des classes préparatoires aux grandes écoles.

Il développe dans un seul manuel les différents chapitres du programme, l'ingénierie des systèmes, la mécanique du solide (cinématique, modélisation cinématique et statique), l'automatique (systèmes linéaires et asservis, et systèmes à événement discret).

Chaque chapitre est construit autour du cours, ponctué de nombreuses illustrations, d'exemples guidés et de schémas. Plus de 40 exercices corrigés l'enrichissent et permettent d'appréhender les grandes méthodes de résolution des problèmes de sciences industrielles des concours.

Ce manuel est destiné en priorité aux élèves de PCSI et de MPSI.

L'auteur, Robert Papanicola, professeur de chaire supérieure, enseigne depuis de nombreuses années en classes préparatoires scientifiques au lycée Charlemagne à Paris.

www.editions-ellipses.fr

