



C1 – Outils d'analyse et de description des systèmes (Fonction et Structure)

Compétences à acquérir	1
Exemples de systèmes complexes et d'outils de description.....	2
1.1. Exemple 1 : Sonde Curiosity.....	2
1.1.1. Aspects structurel et fonctionnel.....	2
1.1.2. Exigences et Cahier des Charges fonctionnel (CdCF)	3
1.1.3. Des diagrammes normalisés pour nous aider dans l'étude de systèmes existants ou la conception de produits nouveaux : System Modeling Language.....	4
1.1.4. Description par une chaîne fonctionnelle et sa décomposition en chaîne d'information et chaîne d'énergie7	
1.2. Exemple 2 : Autoguidage de tracteur agricole.....	12
1.2.1. Présentation du besoin.....	12
1.2.1. Application	14

Compétences à acquérir

Connaître les définitions de bases et le vocabulaire propres aux systèmes complexes (multi-physiques)

Traduire un besoin fonctionnel en **exigences** (grandeurs physiques, critères, niveaux, ...) dans un **Cahier des charges fonctionnelles**

Lire un diagramme uc, bdd et req de la **modélisation SysML**

Identifier la **frontière** d'isolement d'un système ou sous-système (composants faisant partie du système) et les flux échangés avec l'extérieur

Identifier les composants de la **chaîne d'information** (noms, fonction, grandeurs d'entrée et de sortie (flux, homogénéité))

Identifier les composants de la **chaîne d'énergie** (noms, fonction, grandeurs d'entrée et de sortie (flux, homogénéité))

Identifier les liens entre la chaîne d'énergie et la chaîne d'information

Compléter ou construire la **chaîne fonctionnelle** du système donné

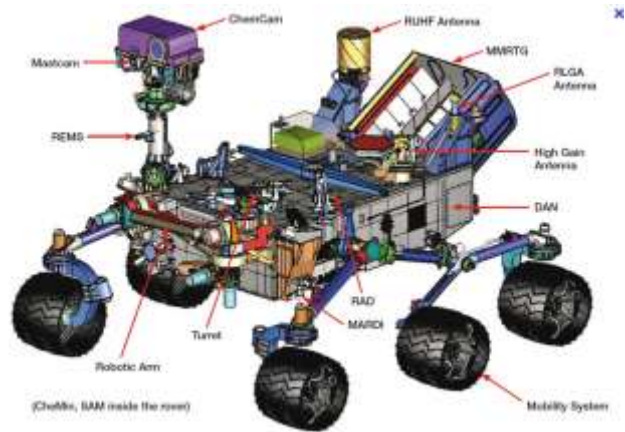
Exemples de systèmes complexes et d'outils de description

1.1. Exemple 1 : Sonde Curiosity

1.1.1. Aspects structurel et fonctionnel

Si on **observe** la sonde Curiosity, on voit qu'elle est composée de nombreux éléments (composants qui sont des choix techniques des concepteurs). On trouve des capteurs, caméras, panneaux solaires, microcentrale énergétique, roues, moteurs, calculateurs, émetteur, récepteur, analyseur, ...

Les systèmes complexes résultent d'une longue évolution technologique. Ils sont caractérisés par un fort développement de leur **chaîne d'information** (commande-asservissements) et l'amélioration des performances de leur **chaîne d'énergie** (dynamique-énergétique des mécanismes, motorisation).



Cette sonde a été conçue pour répondre à un **besoin** exprimé par un demandeur. **Elle constitue donc un système complexe vu son degré de technicité.**

On parle de :

Fonction globale: Explorer la planète Mars de manière semi autonome en communiquant avec les équipes terrestres.

Pour cela, elle doit pouvoir assurer différents services ou **exigences** :

- réaliser des analyses géologiques, météorologiques, ... ;
- saisir des matériaux martiens ;
- se déplacer sur Mars ;
- communiquer avec les équipes terrestres
- ...

Ces multiples fonctions seront développées technologiquement au sein d'un grand nombre d'entreprises, prestataires de service ayant répondues à un appel d'offre et appelées à communiquer entre elles.

*Les exigences énumérées au-dessus sont centrées sur la mission principale de Curiosity. Il faudra aussi prendre en compte les exigences liées au décollage, voyage interplanétaire, à la production des composants, leur transport, stockage, assemblage, ...L'ensemble de ces problématiques doit être résolu par les **prestataires de services**. On est dans le cadre de **l'Ingénierie système**. Ces problèmes ne concernent en aucune façon le demandeur (commanditaire).*

Définitions :

Besoin : *Un besoin est une nécessité ou un désir éprouvé par un utilisateur (norme AFNOR X 50-150).*

Il peut être exprimé directement par un utilisateur, ou anticipé par les services de veille technologique mais aussi imposé par l'évolution des normes (demandes sociales et sociétale). Nous reviendrons sur le rôle des normes plus loin dans ce cours.

Utilisateur : C'est un sens large. On définit par ce vocable, un individu, un service, une entreprise, une association, une structure d'état (l'utilisateur n'est toujours le commanditaire).

Fonctions :

Ce sont les services qu'on attend d'un système. Elles sont exprimées par des verbes d'action à l'infinitif sans à priori sur les technologies qui permettront de les assurer. Elles sont exprimées au niveau qualitatif et quantitatif dans le **cahier des charges fonctionnel CdCF**.

On différencie :

- Les fonctions de services ou **exigences** qui sont attendues par l'utilisateur sans préjugé des solutions technologies retenues ;
- des **fonctions techniques** qui sont connues des concepteurs du système (utilisation de technologies préexistantes et/ou **innovation**).

Remarque : La mesure de l'écart entre la performance attendue et la performance réelle est une indication sur l'efficacité de système conçu ou de son état (panne) à un instant donné.

Système complexe : On peut tenter la définition suivante

C'est un ensemble de parties (composants) en interaction entre elles, capable d'une autonomie décisionnelle plus ou moins large dont l'objet est de répondre à un besoin. Un système complexe est le lieu de flux de matière, d'information et d'énergie. Par ailleurs, on note sa capacité à interagir avec d'autres systèmes (éventuellement complexes) en particulier sur le plan informationnel.

Remarque : Un être humain est un système complexe.

Frontière du système :

Un système complexe et le lieu de multiples interactions. Il est donc nécessaire de définir les éléments qui le constituent de ceux qui lui seront extérieur. C'est le sens de la frontière. Celle-ci peut être représentée à l'aide du **diagramme d'utilisation**.

1.1.2. Exigences et Cahier des Charges fonctionnel (CdCF)

Aux exigences (qualitatif) sont associées des **critères d'appréciations, leurs niveaux et leur flexibilité** (quantitatif).

Le document par lequel un demandeur exprime son besoin est le Cahier des charges fonctionnel (norme AFNOR X 50-150).

L'exigence **1 se déplacer** est une exigence composite qui peut être décomposée en exigences **1.1 Se translater** et **1.2 se diriger, effectuer une rotation**.

Exigences		Critères	Niveaux	Flexibilité
Se déplacer « 1 »	Se translater « 1.1 »	Vitesse avant	0 à 5 km/h	+/- 10 %
		Vitesse arrière	0 à 1 km/h	+/- 10 %
		Pente	+/- 10 %	+/- 5 %
	Se diriger, effectuer une rotation « 1.2 »	Cap suivi	0 à 360°	+/- 1°
		Rayon de braquage	2 m	+/- 5 %

(non limitatif)

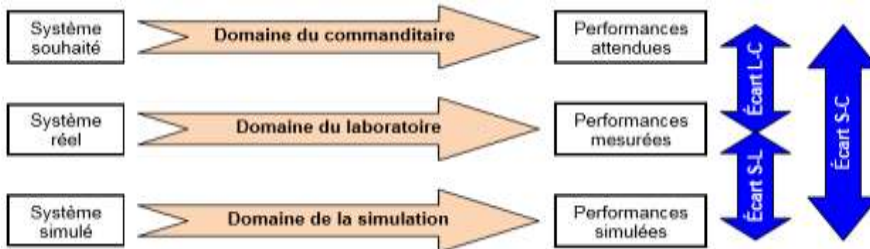
Grandeur physique
à maîtriser

Ecart maximal
autorisé par le CdCF

Pour un système complexe complet (frontière à définir), on définit :

- des dizaines d'exigences d'où découleront,
- des milliers de critères.

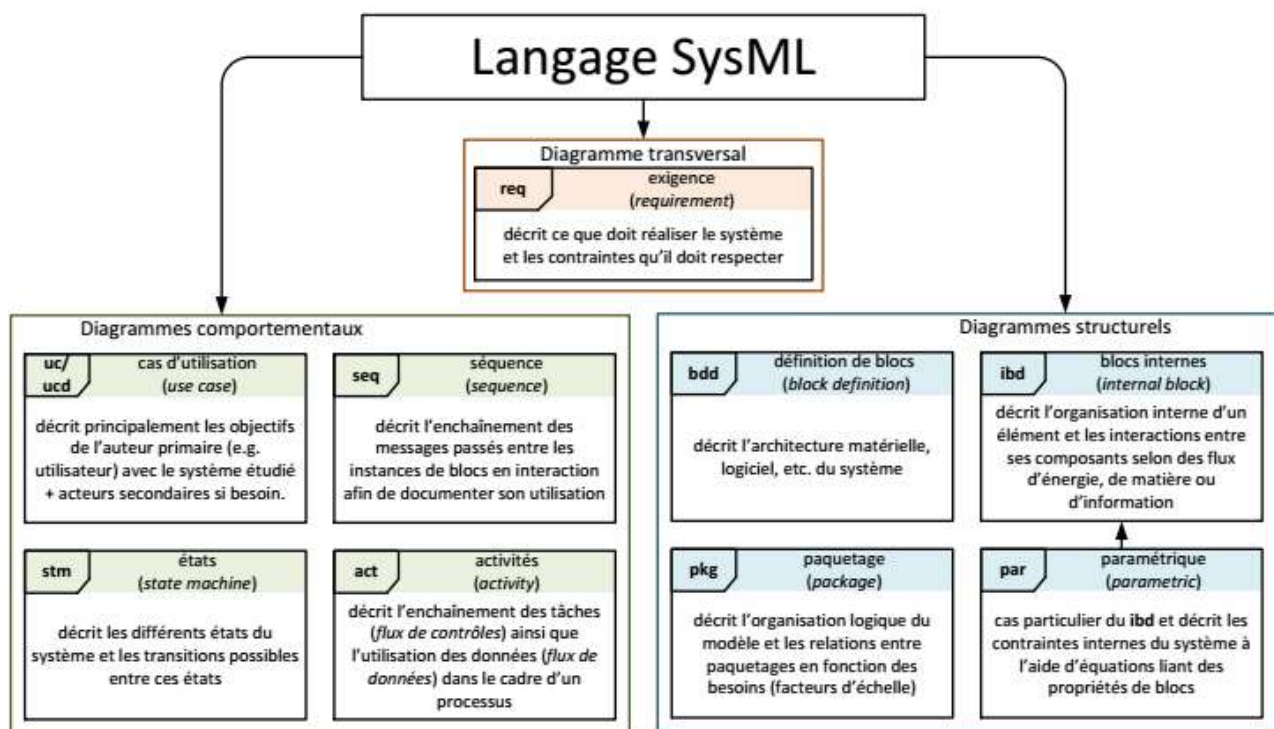
Votre formation met l'accent sur les différents écarts au cours de la phase de conception d'un système :



Pour qu'un système conçu soit **validé**, il est nécessaire que le **CdCf** soit respecté. Autrement dit, les écarts maximaux L-C sont respectés.

Par ailleurs, des centaines d'équipe travaillent et communiquent sur le **Projet** de manière coordonnées. Un critère et son niveau et flexibilité doit donc être sans ambiguïté. Est-ce le cas pour tous les critères de l'exigence 1.1 ?

1.1.3. Des diagrammes normalisés pour nous aider dans l'étude de systèmes existants ou la conception de produits nouveaux : System Modeling Language.

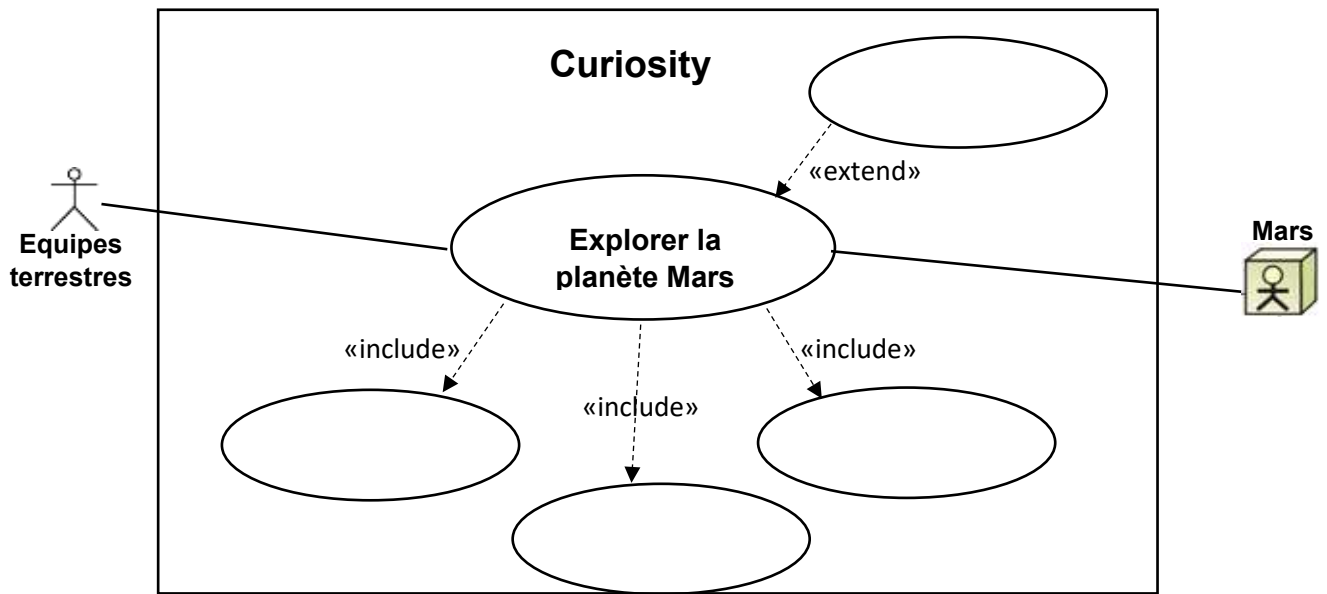


Le but de ces diagrammes normalisés est d'aider à la définition du besoin, des exigences, des critères, à mettre en évidence leur structure (composants) et les liens entre ces composants ... mais aussi de fractionner la complexité en parties pour la rendre plus abordable pour l'entendement tout en gardant les interactions entre les parties.

Ils sont mis en œuvre par des logiciels qui permettent de les relier les uns aux autres afin de faire apparaître d'éventuelles incohérences dans les raisonnements des concepteurs.

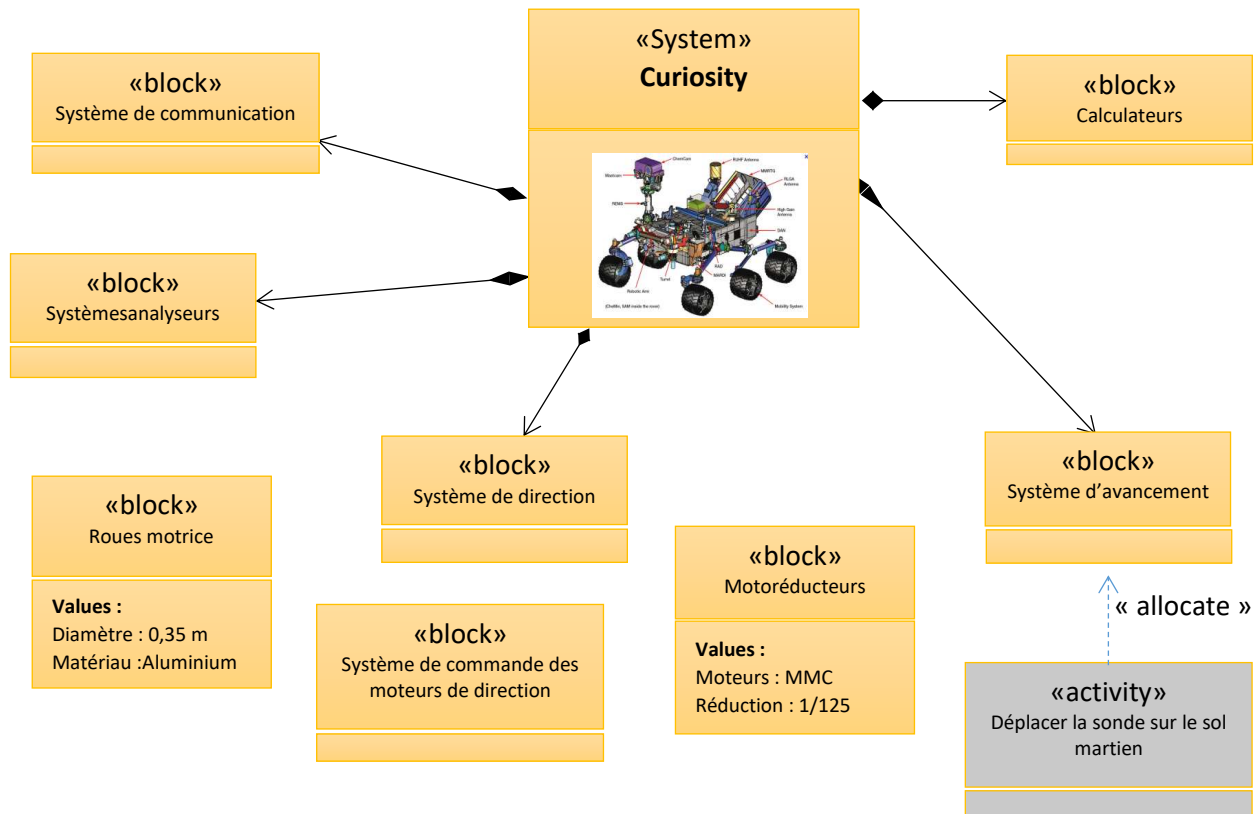
1.1.3.1. Diagramme de cas d'utilisation de Curiosity

uc : [Curiosity] Fonction globale [Exploration de Mars]



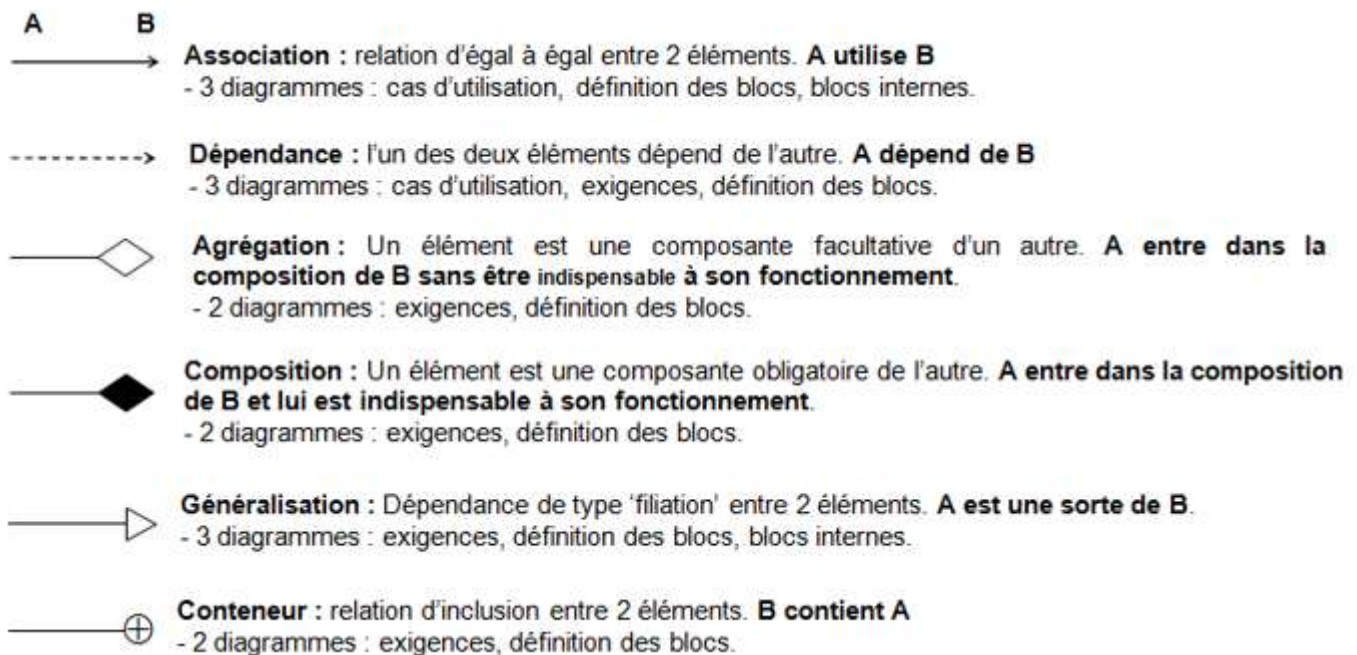
1.1.3.2. Diagramme de définition de bloc bdd

bdd [Curiosity] Structures principales [Exploration de Mars]

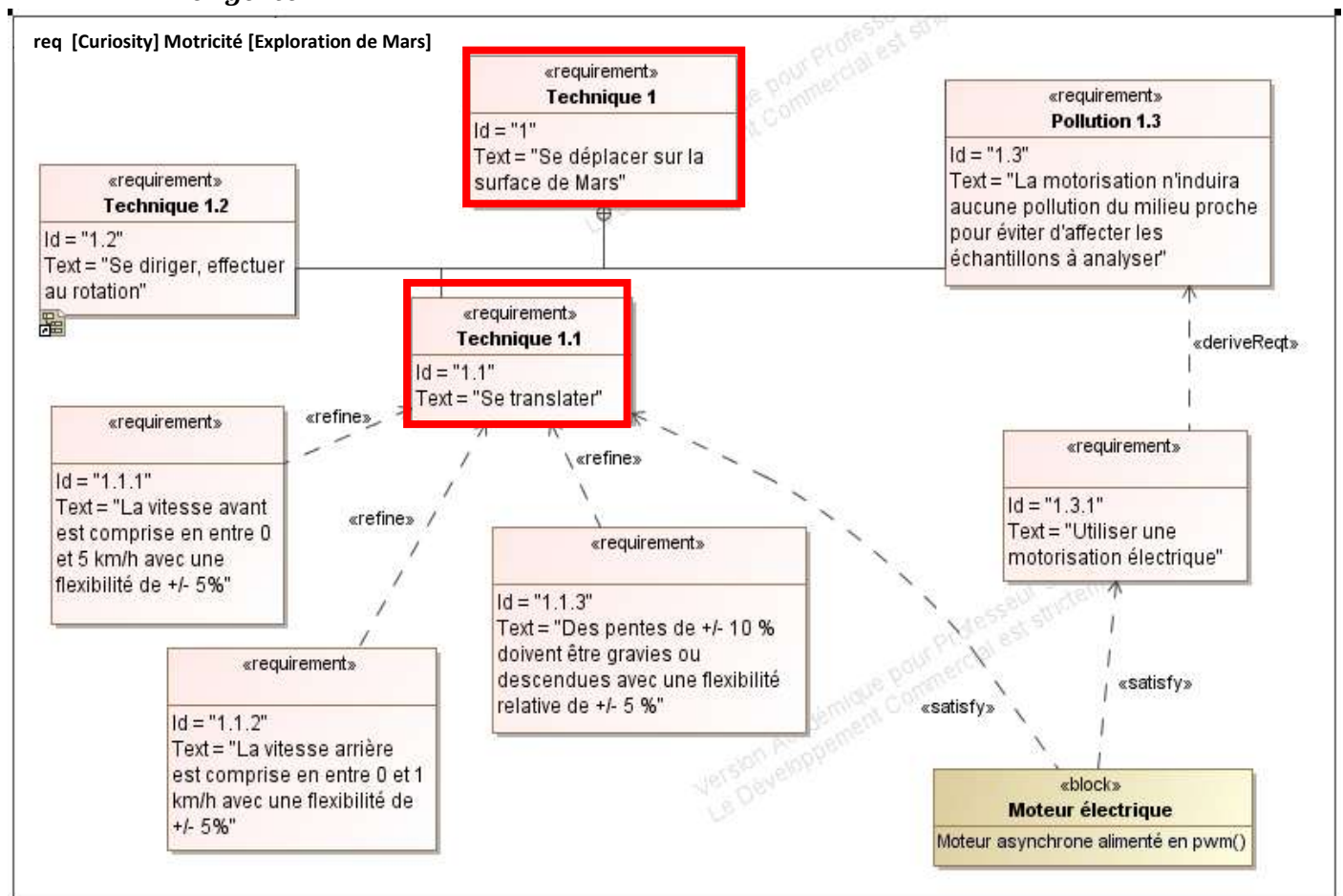


Formes géométriques et liens

Les neuf diagrammes du langage SysML sont composés des mêmes types de formes géométriques : des rectangles à coins droits ou arrondis, des ellipses et des lignes. Selon les diagrammes, tout ou partie de ces formes géométriques seront utilisées. Plusieurs types de relations peuvent être rencontrés entre les formes géométriques dans les diagrammes SysML : le tableau suivant regroupe les liens les plus classiques.



1.1.3.2. Diagramme des exigences pour l'exigence « se déplacer 1 » avec développement de la sous-exigence 1.1



Commentaires :

On retrouve sous une autre forme le tableau du paragraphe 1.1.2 avec ses **exigences, critères, niveaux et flexibilité**.

D'autres diagrammes SysML (ibd, par, stm, seq) existent et seront abordés en TD par la suite.

1.1.4. Description par une chaîne fonctionnelle et sa décomposition en chaîne d'information et chaîne d'énergie

Un système complexe est traversé par des flux de matière, d'énergie, et d'information (flux MEI).

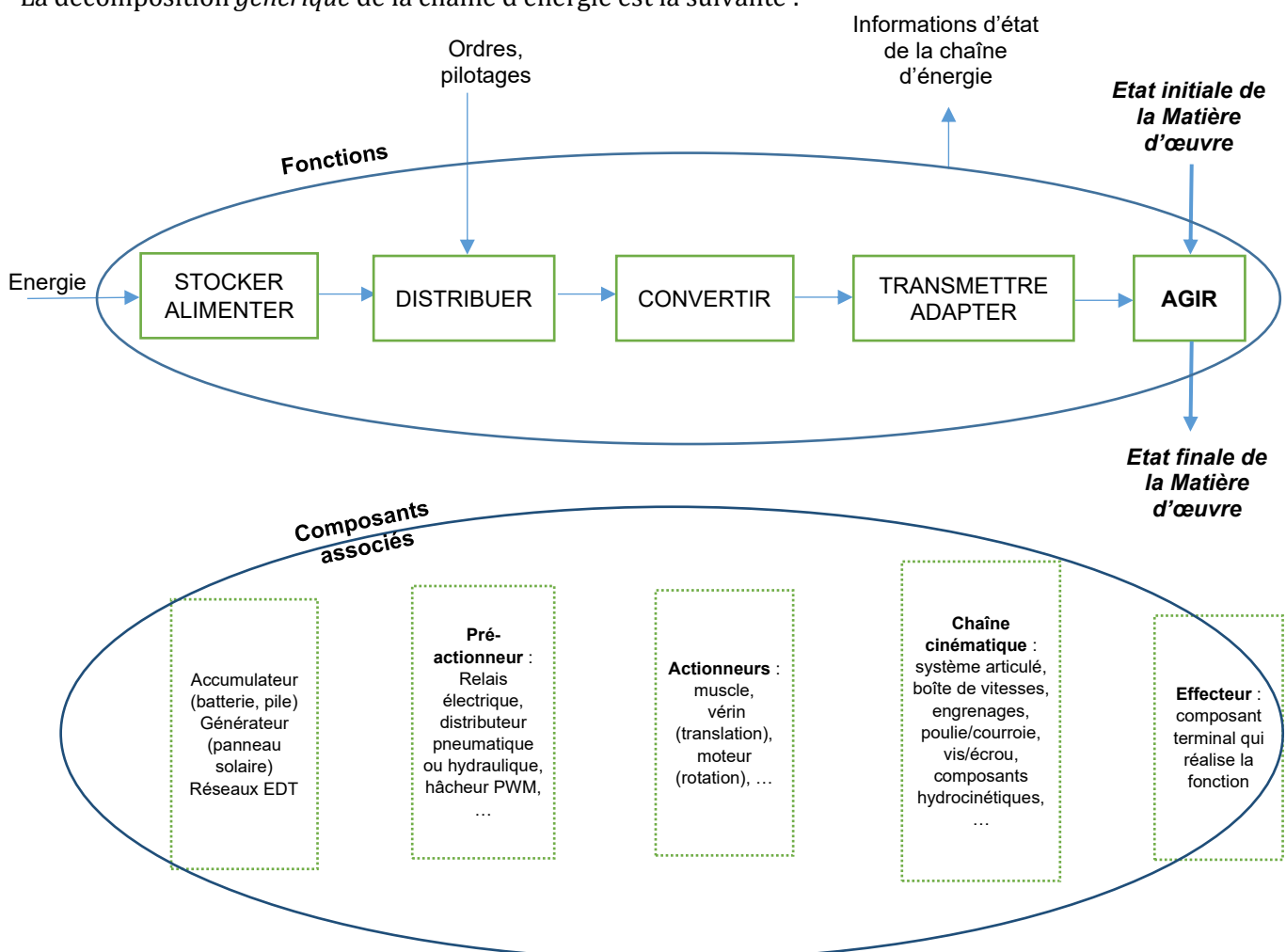
Chacune des fonctions qu'il doit assurer peut-être décrite par une **Chaîne fonctionnelle** qui se décompose elle-même en une **chaîne d'énergie** (souvent traversée par un flux de matière) et une **chaîne d'information**.

• Chaîne d'énergie :

La **chaîne d'énergie** est la structure fonctionnelle primitive du système technique assurant la fonction.

Par exemple, pour *se déplacer*, nous avons besoin d'énergie disponible dans notre corps et apportée par des flux de matière, de muscles pour transformer cette énergie chimique en travail mécanique agissant sur notre ossature. Notre structure osseuse, par sa configuration (**sa cinématique**), autorise la transformation du mouvement de contraction du muscle en des mouvements plus élaborés et adaptés à la marche.

La décomposition *générique* de la chaîne d'énergie est la suivante :



Remarque de fond : Pour réaliser une même fonction, on dispose donc de différents composants technologiques dont il faut connaître les caractéristiques (datasheet) et le comportement pour effectuer un choix judicieux. *Il ne faut pas confondre la fonction à assurer et le composant choisi.*

La chaîne d'énergie, associée à sa commande, assure la réalisation des services dont les caractéristiques sont spécifiées dans le cahier des charges. Elle permet **d'agir** sur l'effecteur grâce à des actions mécaniques (force ou couple) générées par l'actionneur afin de faire évoluer la matière d'œuvre. Les puissances sont élevées.

Fonction	Description	Exemples
Famille de composants		
Stocker	Emmagasiner l'énergie pour la restituer ultérieurement	Batterie, pile, accumulateur fluide (air comprimé ou fluide hydraulique), ressort, ballon d'eau chaude
Unités de stockage d'énergie		
Alimenter	Générer ou transporter l'énergie nécessaire au système	Panneau solaire, fil électrique, transformateur, adaptateur, unité de conditionnement pneumatique (filtre, régulateur de pression, lubrificateur)
Unités d'alimentation		
Moduler	Distribuer, moduler l'énergie vers l'actionneur	Relais électromagnétiques, contacteur, hacheur, variateur de vitesse, distributeur pneumatique, vanne hydraulique
Préactionneurs		
Convertir	Convertir une énergie d'entrée non utilisable directement par les mécanismes en une autre énergie ou en travail mécanique	Moteur thermique, électrique, hydraulique (rotation) Vérin (translation)
Actionneurs		
Transmettre	Modifier et/ou adapter les caractéristiques de l'énergie délivrée par l'actionneur à l'effecteur	Réducteur de vitesse à engrenages, embrayages, accouplements, structures articulées, ...
Transmetteurs		
Agir (avancer, orienter, chauffer, ...)	Transmettre l'énergie à l'extérieur du système, agir sur la matière d'œuvre	Préhenseur pneumatique, tapis roulant, gouverne d'avion, aileron, volet, vanne (barrage), ...
Effecteurs		

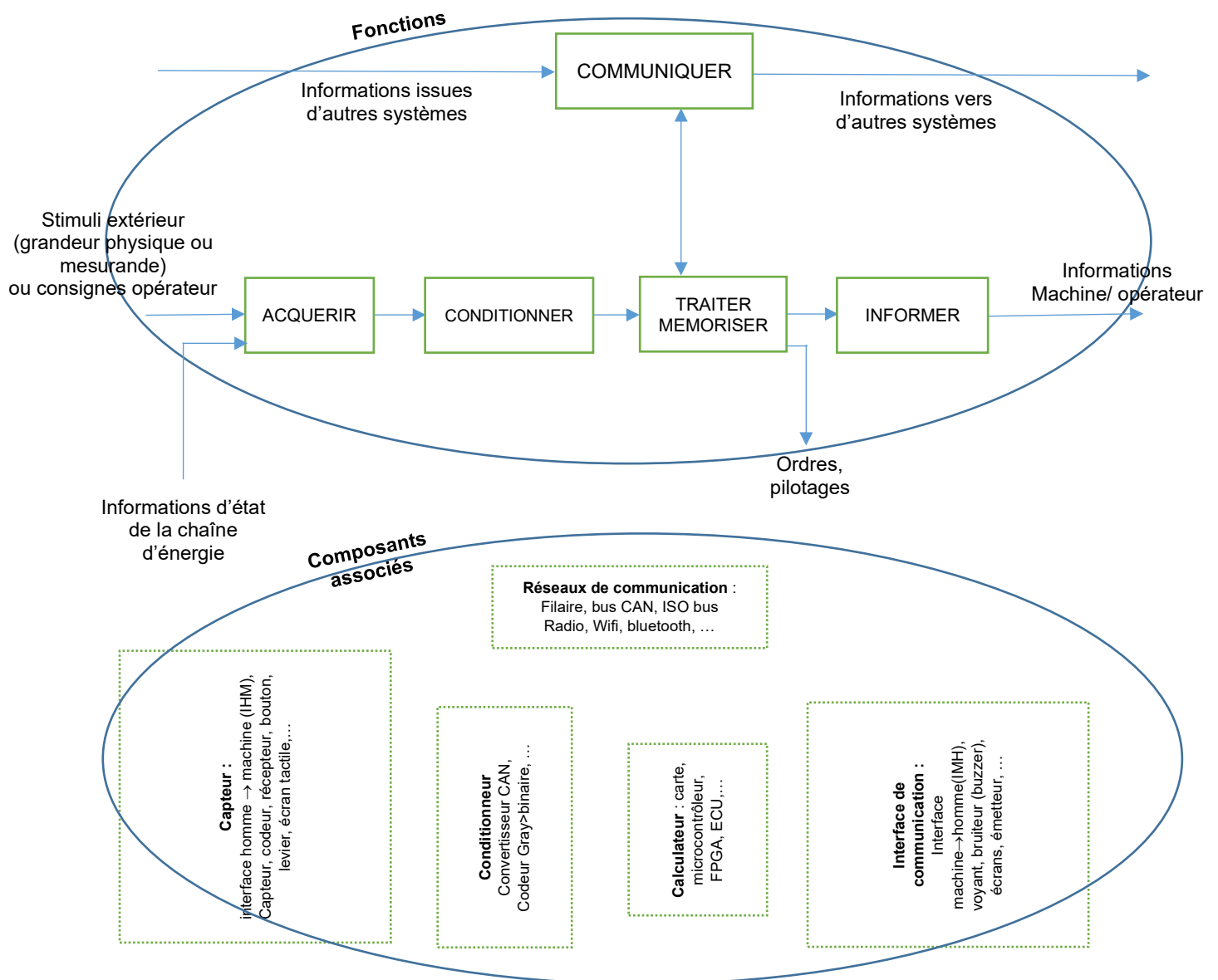


• Matière d'œuvre

La **matière d'œuvre** est en fait la **grandeur physique** sur laquelle il faut agir pour réaliser la fonction. Par exemple, pour la **fonction** : *diriger un véhicule sur pneumatiques*. La **matière d'œuvre** est classiquement l'*angle de rotation* des roues directrices (effecteurs), autour d'un axe vertical (mesuré par rapport à un repère de référence) : par exemple $\theta_{roue/ch\grave{a}ssis}(t) \rightarrow \theta_{roue/ch\grave{a}ssis}(t + dt)$.

• Chaîne d'information

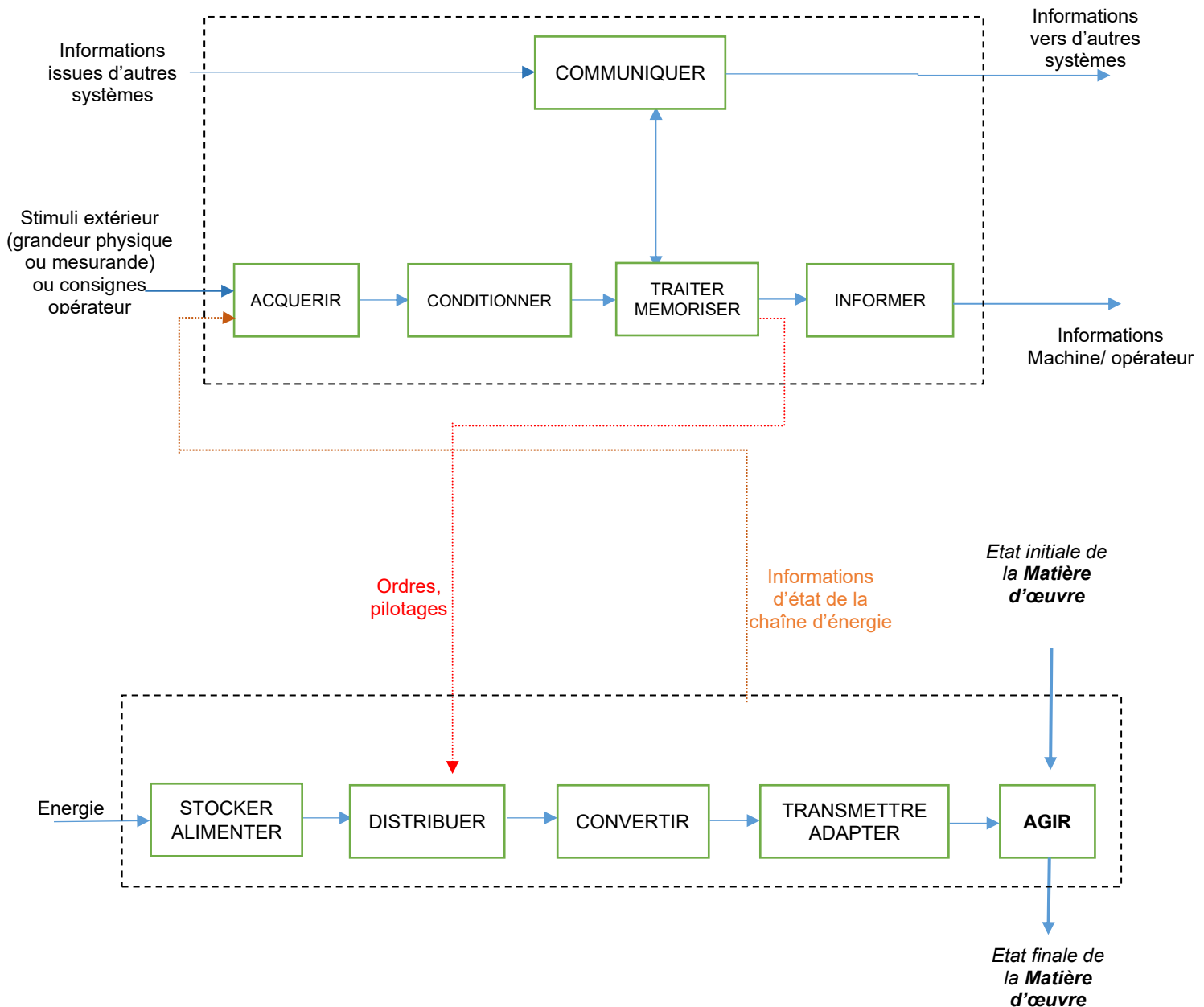
La chaîne d'information, comme son nom l'indique, est traversée par un flux d'informations. L'énergie n'est, dans cette chaîne, que le support matériel du signal. Les puissances y sont faibles.



La chaîne d'information est la partie « intelligente » du système. Elle permet de **communiquer** avec le milieu extérieur (avec l'utilisateur, ou avec d'autres systèmes et leur propre chaîne fonctionnelle) et de **commander** les éléments de la chaîne d'énergie.

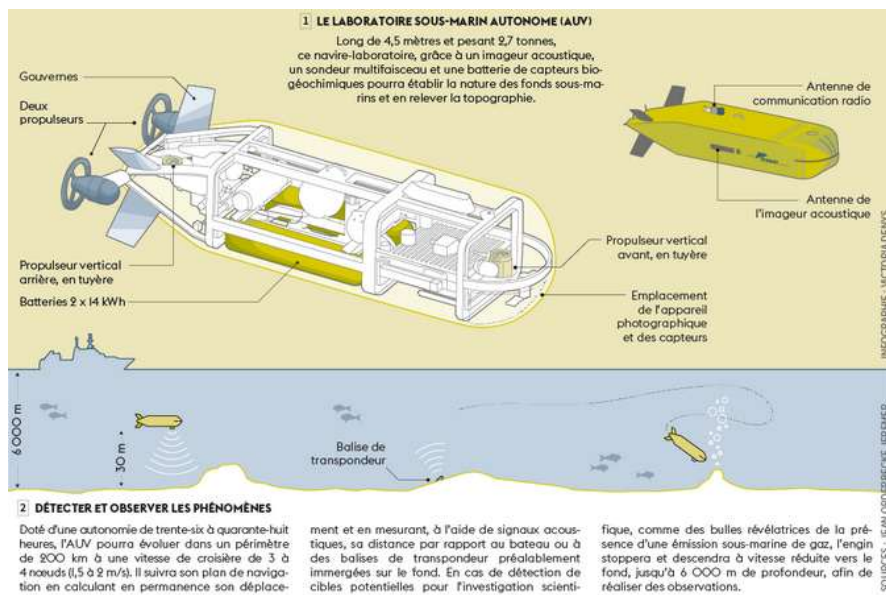
Fonction	Description	Exemples	
Famille de composants			
Acquérir	Acquérir les informations issues du système du milieu ou provenant de l'utilisateur	Capteur, détecteur, dispositif d'acquisition son / image, IHM (bouton poussoir, sélecteur, écran tactile, ...)	
Capteur / Interface Homme Machine (IHM)			
Coder	Conditionner (amplifier, filtrer) et convertir l'image informationnelle issue du capteur ou de l'IHM en une grandeur utilisable par la partie commande (grandeur généralement numérique)	Capteur, codeur Analogique Numérique, ...	
Codeur / Conditionneur			
Traiter	Gérer le fonctionnement du système : traiter les informations issues des capteurs, IHM, d'autres systèmes et générer des ordres et des informations,	Carte électronique, circuit logique à câblage programmable ou permanent, microcontrôleur, carte mère	
Partie commande (PC), unité de traitement			
Mémoriser	Enregistrer, sauvegarder les informations du système	Mémoires permanentes (contacteur bistables, disque dur, CD), mémoires volatiles (relais monostable, RAM)	
Mémoire			
Communiquer	communiquer avec l'extérieur (réseaux)	Carte Entrée / Sortie industrielle, WiFi, ports de communication, bus CAN, commande TOR, interface réseau Ethernet / Internet,	
Interface de communication			
Informer, Restituer	Convertir les informations issues du système en une information compréhensible par l'utilisateur	IHM (led, buzzer, écran, afficheur, ...)	
Interface Machine Homme IHM			

Une chaîne fonctionnelle par exigence attendue



Autres exemples de systèmes complexes

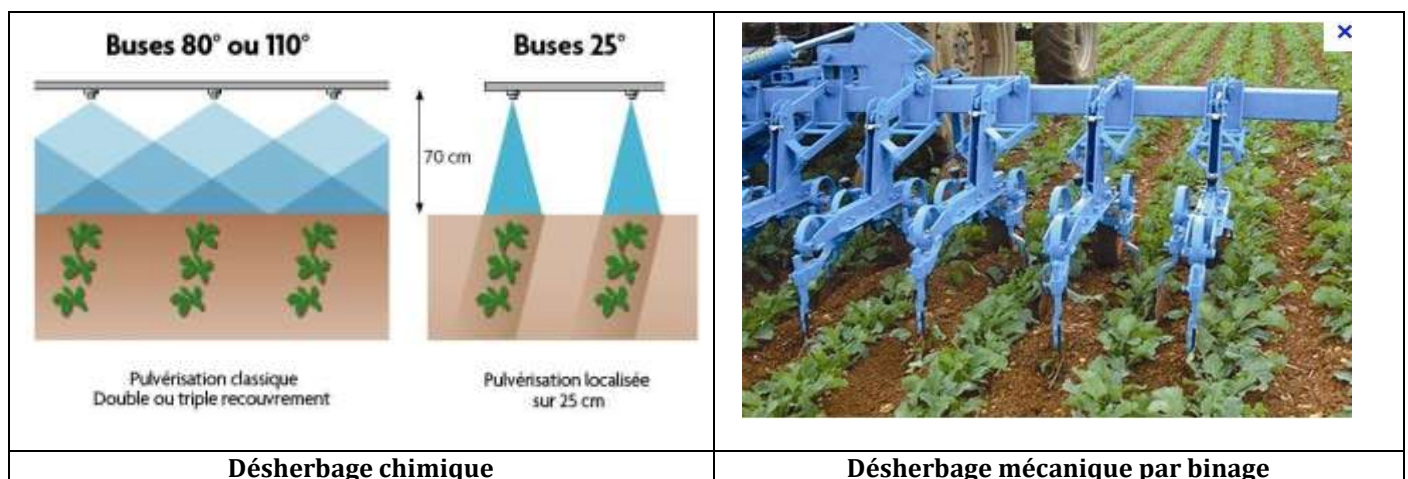
Robot humanoïde



Sous-marin autonome

1.2. Exemple 2 : Autoguidage de tracteur agricole

1.2.1. Présentation du besoin



Le désherbage des cultures évolue sous l'influence des contraintes économiques, sociales (sanitaires) et sociétales (environnement).

De la pulvérisation sans discrimination d'un herbicide chimique avec double ou triple recouvrement, on passe à une **pulvérisation localisée**, sur les rangs de culture, associée à un désherbage mécanique (binage) entre les rangs.

Cela suppose une précision de conduite du tracteur difficilement envisageable pour un être humain sur une journée de travail. Par ailleurs, le milieu agricole est d'un haut niveau technologie et les exploitations agricoles de véritablement entreprises industrielles.

Illustration vidéo de l'autoguidage 1 : <https://youtu.be/-wvMERdfyhM>

Illustration vidéo de l'autoguidage 2 : <https://youtu.be/qOjepEPyySU>

Un marché s'appuyant sur la robotisation de la direction du tracteur pour certains travaux agricoles est envisageable.

Un certain nombre de problématiques sont dès lors à résoudre :

- Déterminer précisément la position des rangs de cultures dans le champ
- Déterminer les trajectoires que doit suivre le tracteur pour assurer les désherbages chimique et mécanique sans gaspillage de produit ni destruction de plants.
- Dimensionner un asservissement de la direction d'un tracteur dans son environnement réel.

Les technologies de positionnement (type GPS) n'étant pas suffisamment précises, les constructeurs d'équipements agricoles ont développé le système RTK (Real Time Kinematic).

La précision du système RTK est de +/- 2 cm et sa portée supérieure à plusieurs dizaines de km.

Présentation partielle du dispositif Trimble Autopilot défini par la frontière d'isolement retenue dans ce cours :

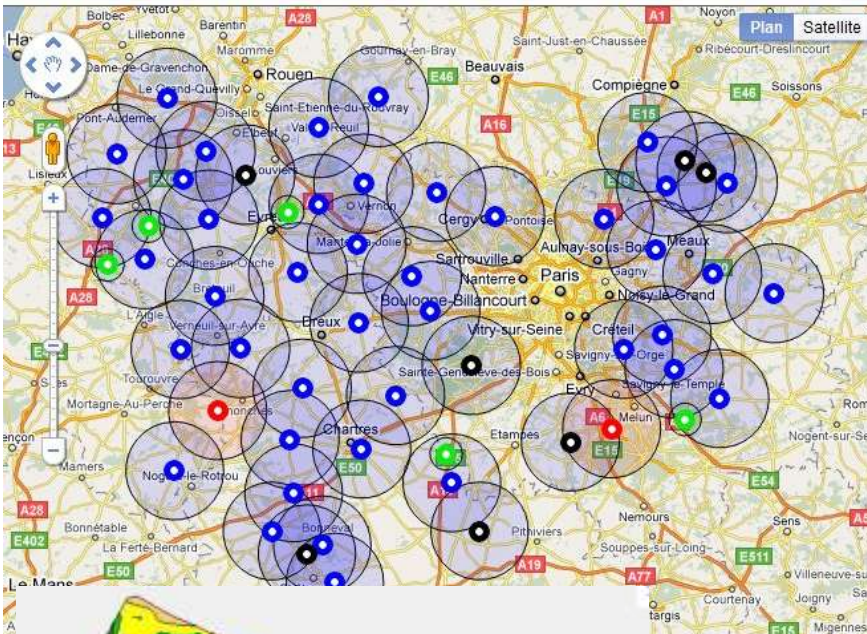


Fonctionnement

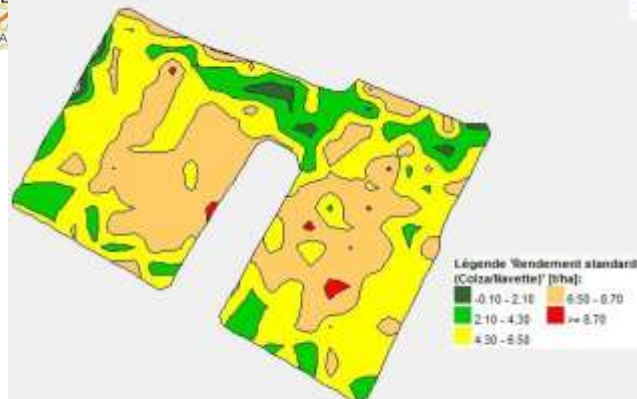
Le moteur thermique du véhicule entraîne une pompe hydraulique qui alimente des distributeurs. Selon les pilotages élaborés par le calculateur et sa programmation, les distributeurs modulent l'énergie hydraulique à destination des vérins actionnant les roues de dispositif de direction (essieu avant).

Exemple d'implantation de balises sur le territoire français :

Légende :
● Balise en fonctionnement ● Répéteur en fonctionnement ● Balise partenaire
● Balise en maintenance ● Répéteur en maintenance



Le positionnement en agriculture n'est pas un problème récent, on utilise aujourd'hui largement le positionnement GPS pour l'épandage de l'engrais en tenant compte du rendement mesuré lors de la récolte. En effet, si on prend l'exemple du colza, lors de sa récolte par une moissonneuse équipée d'un système GPS, on mesure en temps réel la masse récoltée en t/ha selon les coordonnées terrestre (Latitude, Longitude).



Une cartographie donnant le rendement est alors éditée et servira à définir les doses d'engrais de consigne lors du passage de l'épandeur à engrais pour la moisson suivante. La précision donnée par le GPS peut être considérée comme suffisante pour ce type de travaux agricoles.

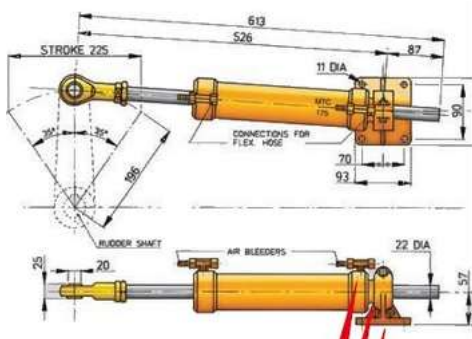


1.2.1. Application

Identifier l'effecteur et la matière d'œuvre (grandeur physique contrôlée par le système)

L'effecteur est composé des roues directrices avant et la matière d'œuvre est l'angle de braquage de ces roues $\theta_{roue/châssis}(t)$.

Identifier les composants du système Trimble Autopilot et indiquer leurs noms, fonctions et leur chaîne d'appartenance, grandeurs d'entrée et de sortie (unités).

Nom du composant et (nom générique)	Fonction	Chaîne	Grandeur d'entrée	Grandeur de sortie
Vérin hydraulique (actionneur) 	Convertir (L'actionneur convertit l'énergie hydraulique en travail mécanique (translation) Il est composé de deux éléments : son corps fixe et sa tige mobile en translation par rapport au corps.	chaîne d'énergie	Puissance hydraulique $= \underset{\substack{\text{Pression} \\ \text{en Pa}}}{p} \cdot \underset{\substack{\text{débit volume} \\ \text{en m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}}{Q} \cdot \underset{\text{}}{P_{hyd}}$	Puissance mécanique $= \underset{\substack{\text{force} \\ \text{en N}}}{F} \cdot \underset{\substack{\text{Vitesse} \\ \text{en m/s}}}{V_{tige/fût}} \cdot \underset{\text{}}{P_{méca}}$
Système articulé de l'essieu directeur vu de dessus (chaîne cinématique) 	Adapter Transmettre (le mouvement de <i>translation</i> de la tige du vérin est transformé en une <i>rotation</i> du moyeu)	Chaîne d'énergie	$P_{méca} = F \cdot V_{tige/fût}$	$P_{méca} = \underset{\substack{\text{Couple} \\ \text{en N.m}}}{C} \cdot \underset{\substack{\text{vitesse de rotation} \\ \text{en rad.s}^{-1}}}{\omega_{roue/châssis}}$
Roue (effecteur) 	Agir : DIRIGER (les actions mécaniques entre le sol et la roue vont permettre la motricité et l'orientation du véhicule)	Chaîne d'énergie	Matière d'œuvre initiale $\theta_{roue/châssis}(t)$	Matière d'œuvre finale $\theta_{roue/châssis}(t + dt)$

Distributeur proportionnel (pré-actionneur)  Distributeur proportionnel	Distribuer - moduler (le pré-actionneur reçoit un ordre (pilotage) de la chaîne d'information et distribue à l'actionneur une quantité d'énergie hydraulique, proportionnelle à l'ordre reçu)	Chaîne d'énergie	Puissance hydraulique stockée $P_{hyd} = p \cdot Q$	Puissance hydraulique distribuée $P_{hyd} = p' \cdot Q'$
Afficheur ... tactile FmX (IMH et IHM) 	Informier et acquérir (pour l'IMH) (pour l'IHM)	Chaîne d'information	Signaux électriques → Flux lumineux Consignes opérateur → Signaux électriques	
Antenne (capteur)  Antenne Ag15 ou antenne GNSS Ag25	Acquérir	Chaîne d'information	Ondes électromagnétiques	Signaux électriques
Capteur angulaire autosense (capteur)  Capteur angulaire AutoSense	Acquérir	Chaîne d'information	Angle de rotation $\theta_{roue/ch\hat{a}ssis}(t)$	Signaux électriques (mot binaire signé)
Nav Controller II (Calculateur)  Nav Controller II	Traiter	Chaîne d'information	Signaux électriques	Signaux électriques