



ANALYSE FONCTIONNELLE ET STRUCTURELLE

Objectifs et Compétences

- Analyser le besoin et appréhender les problématiques
- Définir les frontières de l'analyse
- Appréhender les analyses fonctionnelle, structurelle et comportementale

Savoirs

Je connais:

- Analyse fonctionnelle, structurelle et comportementale
- Chaîne d'énergie et chaîne d'information

Savoir Faire

Je sais faire:

- Décrire le besoin et présenter la fonction globale
- Identifier les architectures fonctionnelles et structurelles
- Identifier la nature des flux échangés et leurs caractéristiques
- Identifier les fonctions techniques et les constituants associés
- Identifier les liens entre chaîne d'énergie et chaîne d'information
- Définir les limites et les contraintes choisies ou imposées

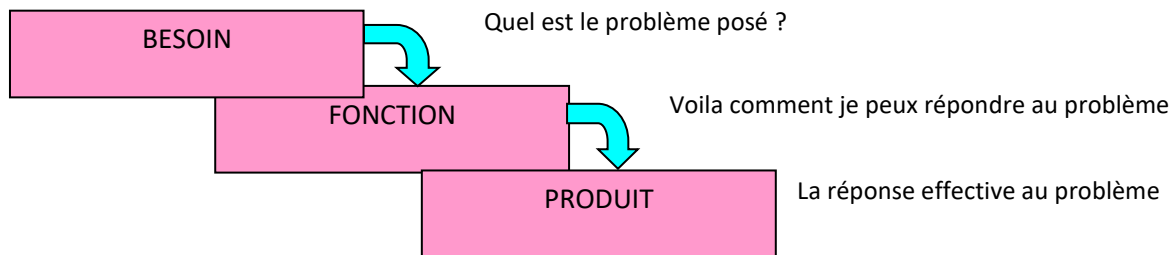
Sommaire

I. INTRODUCTION A LA CONCEPTION D'UN PRODUIT.....	2
II. DESCRIPTION D'UN SYSTEME	4
III. ANALYSE FONCTIONNELLE ET STRUCTURELLE	4
IV. DIAGRAMMES DEDIES	6
IV.1. EXPRESSION DU BESOIN : OUTIL « BÊTE A CORNES ».....	6
IV.2. RECHERCHE DES FONCTIONS DE SERVICE : DIAGRAMME DES INTER-ACTEURS – DIAGRAMME « PIEUVRE » APTE	7
IV.3. RECHERCHE DE SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES : DIAGRAMME FAST	9
IV.4. ANALYSE FONCTIONNELLE DESCENDANTE : METHODE SADT.....	11
IV.5. CAHIER DES CHARGES FONCTIONNELLE CDCF.....	14
IV.6. DESCRIPTION PAR CHAINES D'ENERGIE ET D'INFORMATION	15
IV.7. FLUX ECHANGES	17
V. DIAGRAMMES SYSML	18
VI. "EQUIVALENCES" SYSML ET DIAGRAMMES DEDIES	19

I. INTRODUCTION A LA CONCEPTION D'UN PRODUIT

Extrait de la norme NFX 50-150

"Le premier pas d'une démarche rationnelle de conception de produit est l'expression du besoin. La pratique de l'Analyse de la valeur a montré que **l'expression fonctionnelle du besoin** était un facteur déterminant de la compétitivité. Un outil méthodologique est apparu nécessaire pour détecter et formuler le besoin et justifier en aval **les exigences technique**. La démarche originale et rigoureuse du **Cahier des Charges Fonctionnel (CdCF)** répond à cette attente".



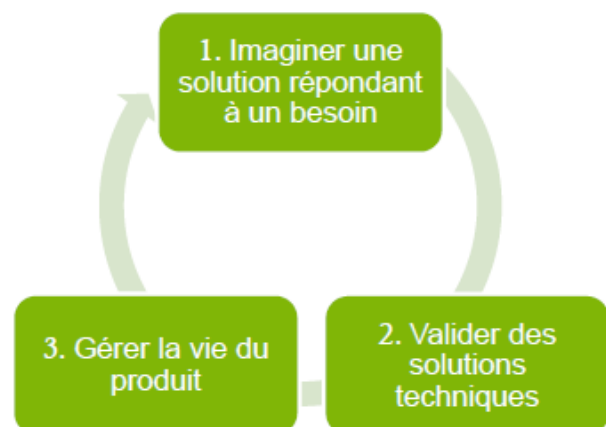
Le besoin est la nécessité ou le désir éprouvé par l'utilisateur, il concerne la nature des attentes de l'utilisateur et non le marché. Le besoin peut être exprimé sous forme **d'exigences**, c'est à dire de capacités ou de contraintes que doit satisfaire le produit.

La fonction est l'action d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimée exclusivement en terme de finalité. Une fonction est formulé par **un verbe à l'infinitif suivi d'un complément**. La formulation de la fonction doit être indépendante des solutions susceptibles de la réaliser.

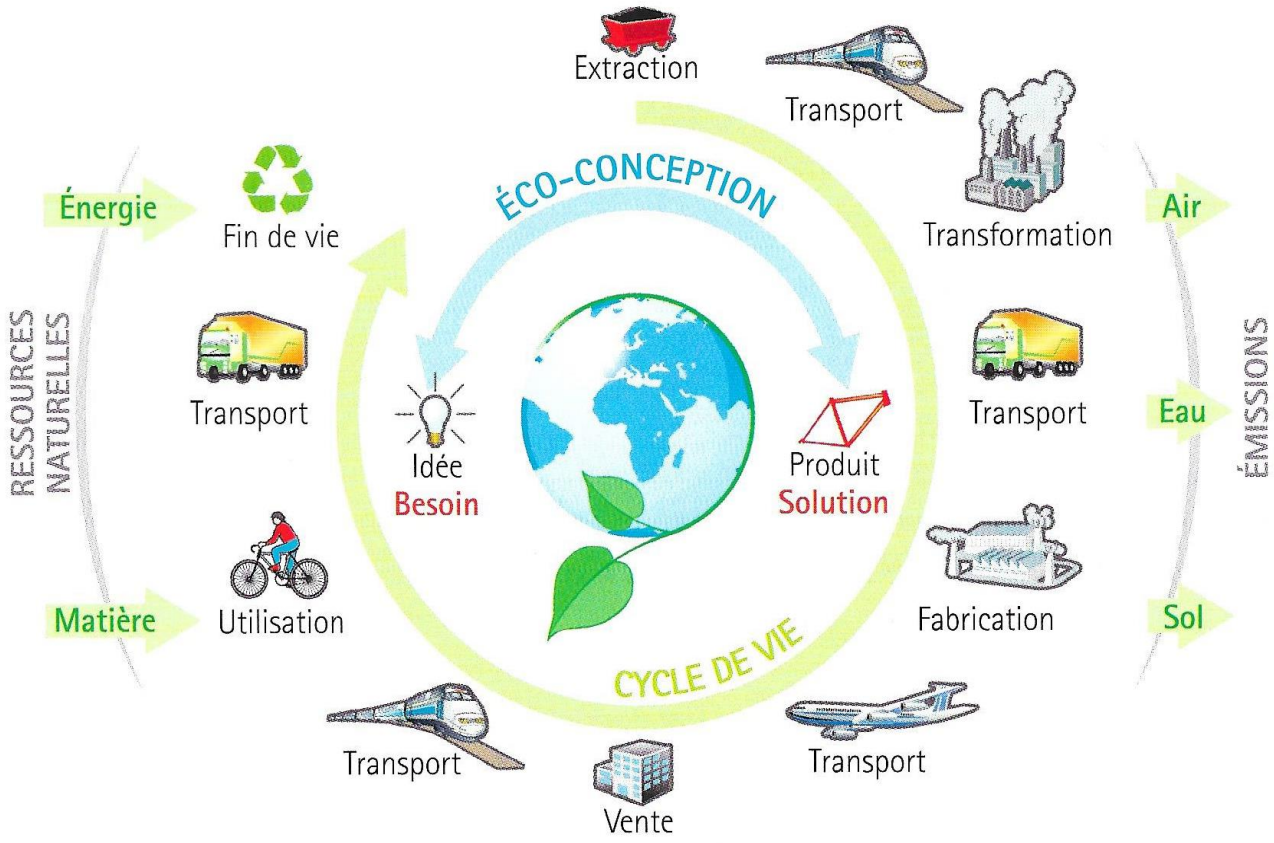
Le produit est ce qui est fourni à l'utilisateur pour répondre à son besoin. Le produit peut-être un matériel, un service, un système, un ouvrage, un processus industriel ou administratif, ou toute combinaison de ceux-ci.

L'analyse fonctionnelle est une démarche qui consiste à rechercher, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions. Elle conduit à différents modes de description permettant d'aboutir à un **Cahier Des Charges Fonctionnel (CDCF)** qui permet de formaliser ce dont le client a besoin.

A l'heure actuelle, dans toute démarche de conception, il faudra de plus raisonner en terme de cycle de vie du produit dans un contexte d'environnement durable.



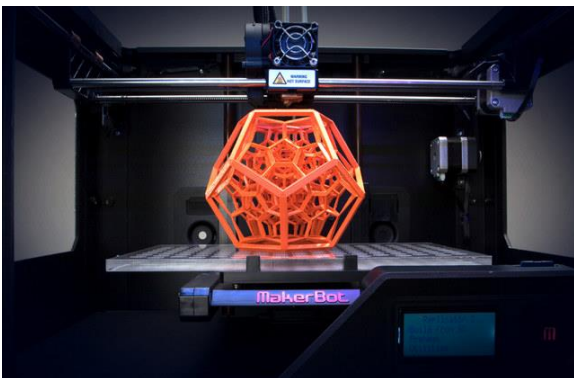
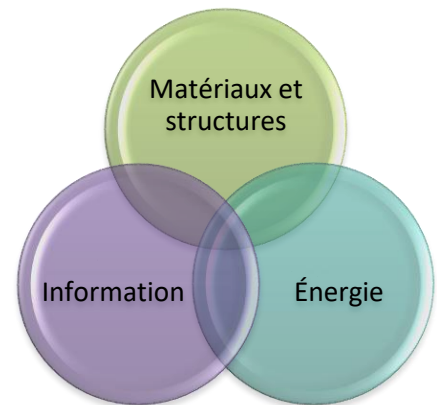
Un exemple type est le calcul d'un Bilan Carbone qui comptabilise toutes les émissions de CO₂ engendrées par la création du produit depuis l'extraction des matériaux jusqu'au recyclage.



Pour l'ensemble de la conception, il faudra raisonner sur le triptyque MEI :

- Matériaux et structures
- Information
- Energie

L'approche MEI caractérise la technologie industrielle actuelle et s'applique à l'ensemble des systèmes dans tous les domaines techniques.



Dans une imprimante 3D on va par exemple retrouver la création d'une forme avec de la **matière** grâce à de l'apport d'**énergie** (chaleur, déplacements motorisés) et de l'**information** (capteurs de position, de température,...)

Des flux de matière (M), d'énergie (E) et d'information (I) circulent donc à l'intérieur du système.

II. DESCRIPTION D'UN SYSTEME

Une description consiste à réunir toutes les informations concernant un système, de manière organisée et structurée. Ensuite cet ensemble documentaire évolue et accompagne le système durant tout son cycle de vie.

A son niveau, chaque acteur a besoin d'utiliser ou de fournir des informations sur le fonctionnement et la structure du système afin de satisfaire le besoin pour lequel il existe.

L'ingénieur : Pour préciser les exigences attendues et créer des solutions constructibles

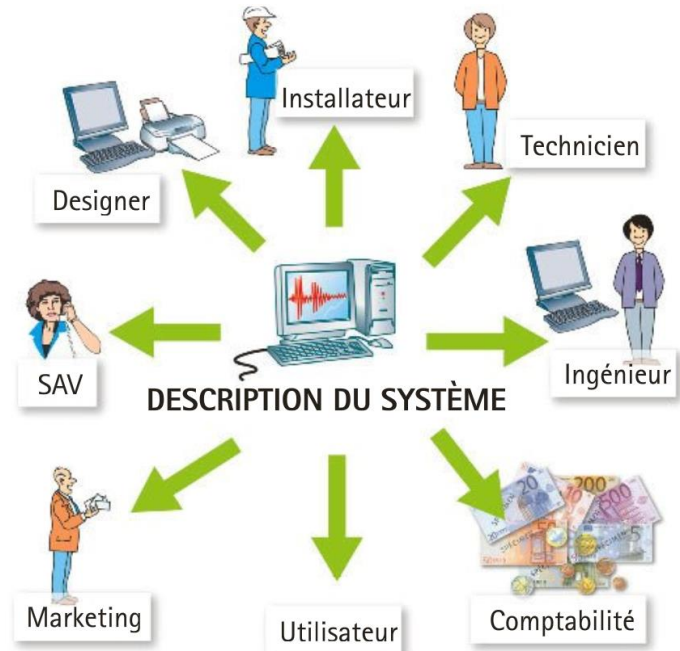
Le technicien : Fabriquer le produit

Le service achat et comptabilité :
Commander les composants et constituants

Le service commercial et marketing :
Promouvoir le produit

Le S.A.V : assurer la maintenance

Le client : pour utiliser le produit



III. ANALYSE FONCTIONNELLE ET STRUCTURELLE

Elle est utilisée dans les premières phases d'un projet pour créer ou améliorer un produit. Elle se présente le plus souvent sous forme de graphe ou diagramme d'analyse et permet d'exprimer **des exigences**.

Objectifs : recenser, caractériser, ordonner, hiérarchiser et valoriser les fonctions du produit.

- **Recenser** : c'est déterminer et identifier les fonctions du produit.
- **Caractériser** : c'est énoncer les critères d'appréciation, les niveaux et la flexibilité de ces fonctions.
- **Ordonner** : c'est classer les fonctions en fonctions de service et en fonction techniques.
- **Hiérarchiser** : c'est évaluer l'ordre d'importance des fonctions retenues.
- **Valoriser** : c'est attribuer à chaque fonction un poids ou une valeur liée son importance

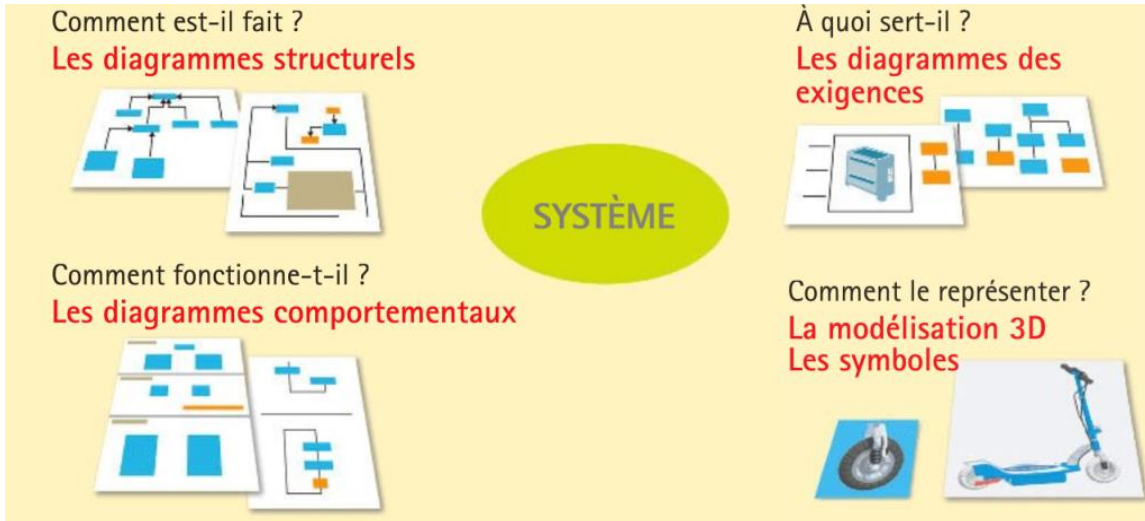
Le type **d'analyse fonctionnelle** et l'outil de description associés vont dépendre de l'acteur concerné par cette description. On parle de 2 types d'analyse fonctionnelle :

- **L'analyse globale ou externe** : on considère le système comme une boîte noire et on regarde le système dans son environnement, ses relations avec l'extérieur, et donc ses fonctions de service. C'est une approche **fonctionnelle**.
- **L'analyse interne** : on s'intéresse à ce qui se passe dans le système, à sa structure et aux fonctions et solutions techniques retenues. On parle encore **d'approche fonctionnelle** pour décrire les fonctions techniques et **d'approche matérielle ou structurelle** pour l'étude des solutions constructives qui réalisent les fonctions techniques.

Pour décrire complètement un système, il est nécessaire de se placer suivant plusieurs points de vue pour répondre à différentes questions.

Comment est-il fait ? ⇒ Analyse Structurelle :
Permet de mettre en évidence les composants du système et leurs interactions

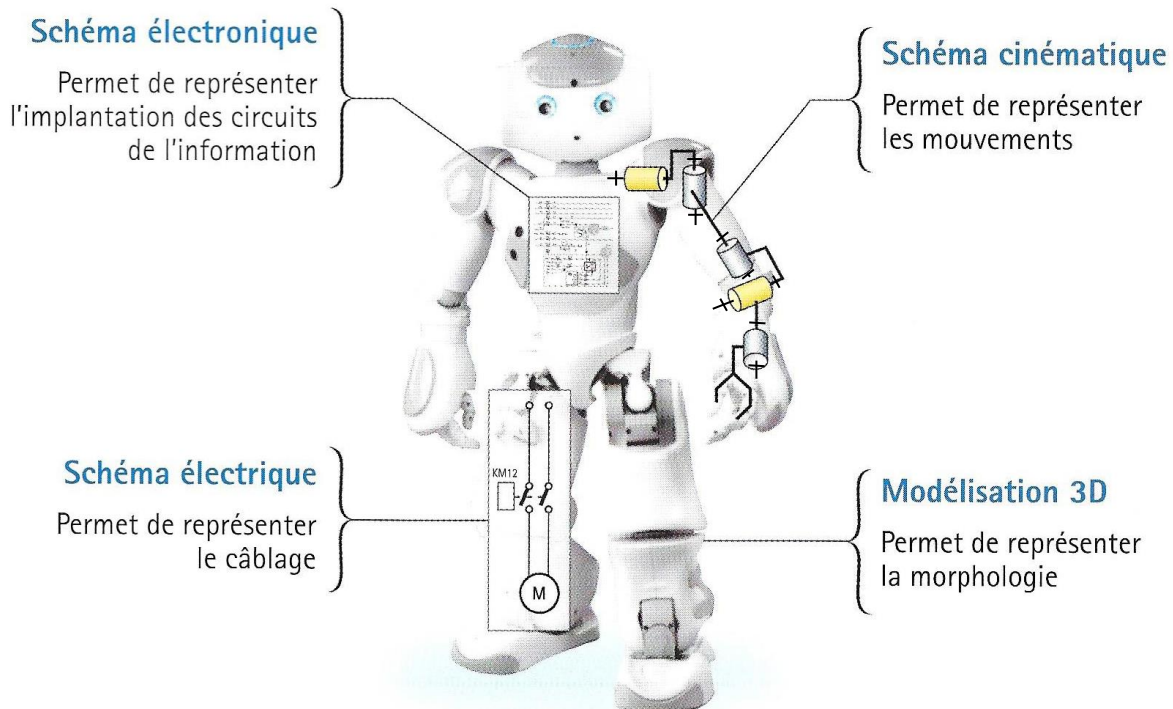
A quoi sert-il ? ⇒ Analyse Fonctionnelle :
Permet de recenser toutes les fonctions à réaliser et leurs niveaux



Comment fonctionne-t-il ?
⇒ **Analyse Comportementale :**
Permet de définir les conditions et paramètre de fonctionnement de manière ordonnée et optimisée.

Comment le représenter ?
⇒ **Réaliste ou schématique :**
Permet de représenter ou de décrire les formes du système avec des modèles 3D ou des schémas normalisés

Pour la représentation réaliste ou schématique, plusieurs types de schémas ou de modèles 3D peuvent être utilisés comme sur l'exemple du Robot Nao ci-contre:



A chaque phase de la conception ou de la reconception, on peut associer des outils **d'analyse fonctionnelle et structurelle**. Certains sont dédiés à certaines phases (voir ci-dessous) et on trouve actuellement une nouvelle représentation qui permet de reprendre l'ensemble des descriptions : le langage **SYSML**.

Outil de description	Approche fonctionnelle	Approche structurelle	Approche comportementale
Bête à cornes	✓		
Diagramme interacteurs	✓		
FAST	✓		
SADT	✓	✓	
GRAFCET			✓
Organigramme			✓
Algorithme			✓
SYSML	✓	✓	✓
CECI		✓	

IV. DIAGRAMMES DEDIES

IV.1. Expression du besoin : outil « bête à cornes »

Principe : Au tout début de l'élaboration d'un CDCF, on exprime le besoin fondamental en répondant à 3 questions.

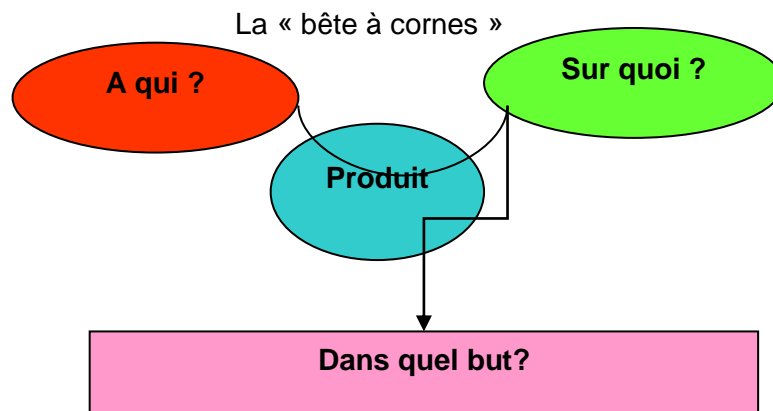
Sur quoi agit le Système ?

A qui le système rend-il service ?

Pourquoi ce système ?

Dans la réponse aux 2 premières questions, on doit s'appliquer à respecter la notion de « contact direct ».

Il est souhaitable de rajouter une 4^{ème} question à ce niveau car elle peut changer le problème posé et donc modifier la démarche de validation du besoin global. On a coutume de représenter ce besoin par ce que la société APTE à coutume d'appeler la « bête à cornes ».

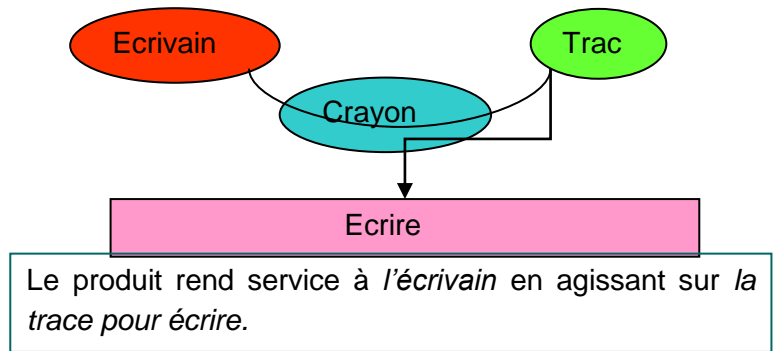


Le produit rend service au client en agissant sur la matière d'œuvre¹ pour satisfaire le besoin

¹ Matière d'œuvre (MO) = éléments sur lequel agit le système (matière, énergie, information,...)

Exemple : Le crayon

- Pourquoi le besoin existe-t-il?
Parce que les hommes ont besoin de communiquer
- Qu'est-ce qui pourrait faire évoluer le besoin?
Que les hommes communiquent plus ou moins
- Qu'est-ce qui pourrait faire disparaître le besoin?
La disparition de la communication écrite

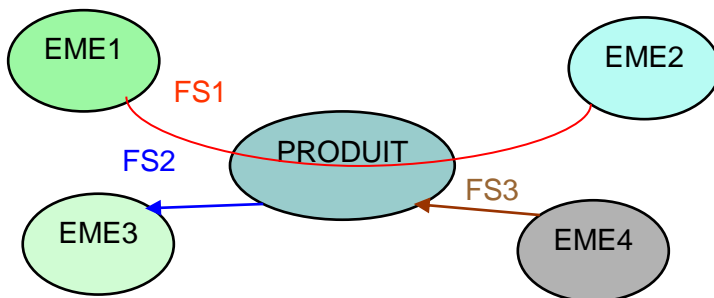


IV.2. Recherche des fonctions de service : diagramme des inter-acteurs – diagramme « pieuvre » APTE

IV.2.1. Description de l'outil

Cette méthode est utilisée pour analyser les besoins et identifier les fonctions de service d'un produit.

Principe : Le produit étudié est mis en relation avec certains éléments du milieu extérieur (EME) afin de déterminer les fonctions de service.



Ces relations sont les **fonctions de service**:

- 1- FS1 = Permettre à EME1 de modifier l'état de EME2
- 2- FS2 = Adapter l'effet du produit sur EME3
- 3- FS3 = Adapter le produit à l'effet de EME4

IV.2.2. Différents types de fonctions

On distingue plusieurs types de fonctions employées ou non selon le type d'analyse que l'on fait :

Fonctions de service : Action attendue d'un système pour répondre à un besoin. Elles font la valeur d'un produit.

D'un point de vue *concepteur*, les fonctions de services se répartissent en deux catégories :

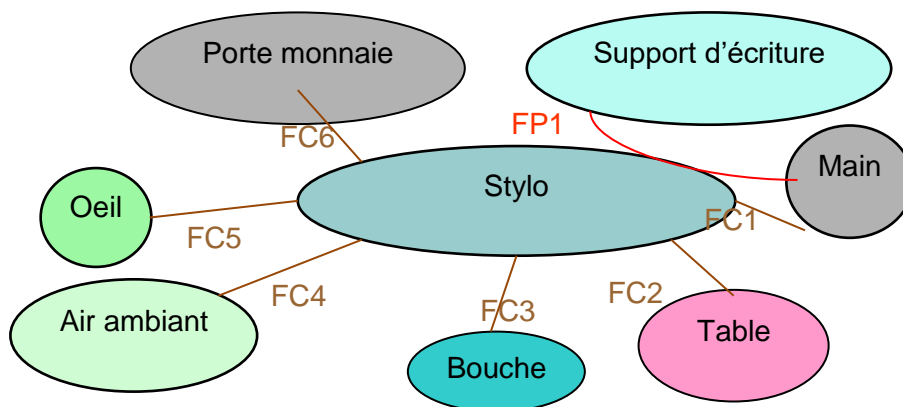
- **Fonction principale :** c'est la fonction essentielle du produit, elle justifie sa création. Un même produit peut posséder plusieurs fonctions principales
- **Fonction contrainte :** fonctions complémentaires particulières qui limite la liberté du concepteur. Cette limite est imposée par le demandeur, le cotexte, les normes de sécurité, etc...

Indépendamment ces fonctions de service peuvent être réparties en deux catégories du point de vue de l'utilisateur :

- **Fonction d'usage** : liée à l'aspect utilitaire du produit.
- **Fonction d'estime** : liée à l'aspect psychologique ou affectif du produit (esthétisme, image...).

Fonctions Techniques (« de construction », « de conception »): Elles résultent d'actions internes au produit et dépendent de la conception et des solutions technologiques choisies pour réaliser les fonctions de service.

Exemple : Le crayon



- FP1: Permettre à la main de laisser une trace sur le support d'écriture
- FC1: S'adapter à la main
- FC2: Tenir sur la table
- FC3: Respecter la bouche
- FC4: Résister à l'air
- FC5: Plaire à l'oeil
- FC6: Être abordable

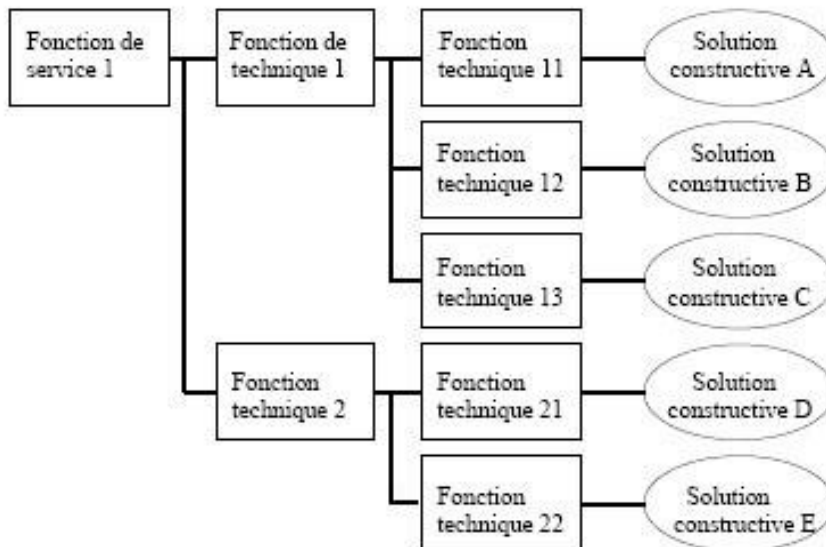
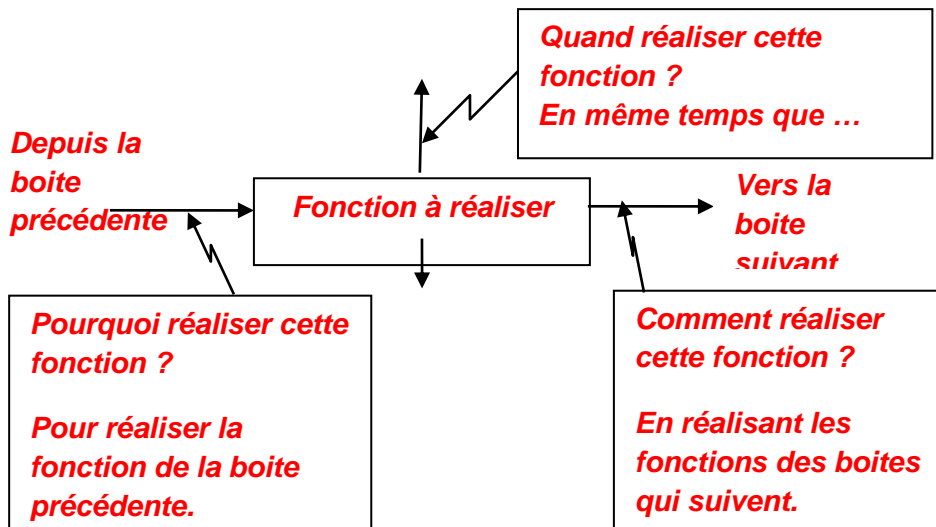
IV.3. Recherche de solutions technologiques : diagramme FAST

Cet outil d'analyse ou de développement permet de décomposer chacune des fonctions de service et contraintes issues du diagramme pieuvre en des sous fonctions réalisant la fonction précédente. On aboutit aux solutions techniques réalisant chacune des fonctions définies dans la pieuvre.

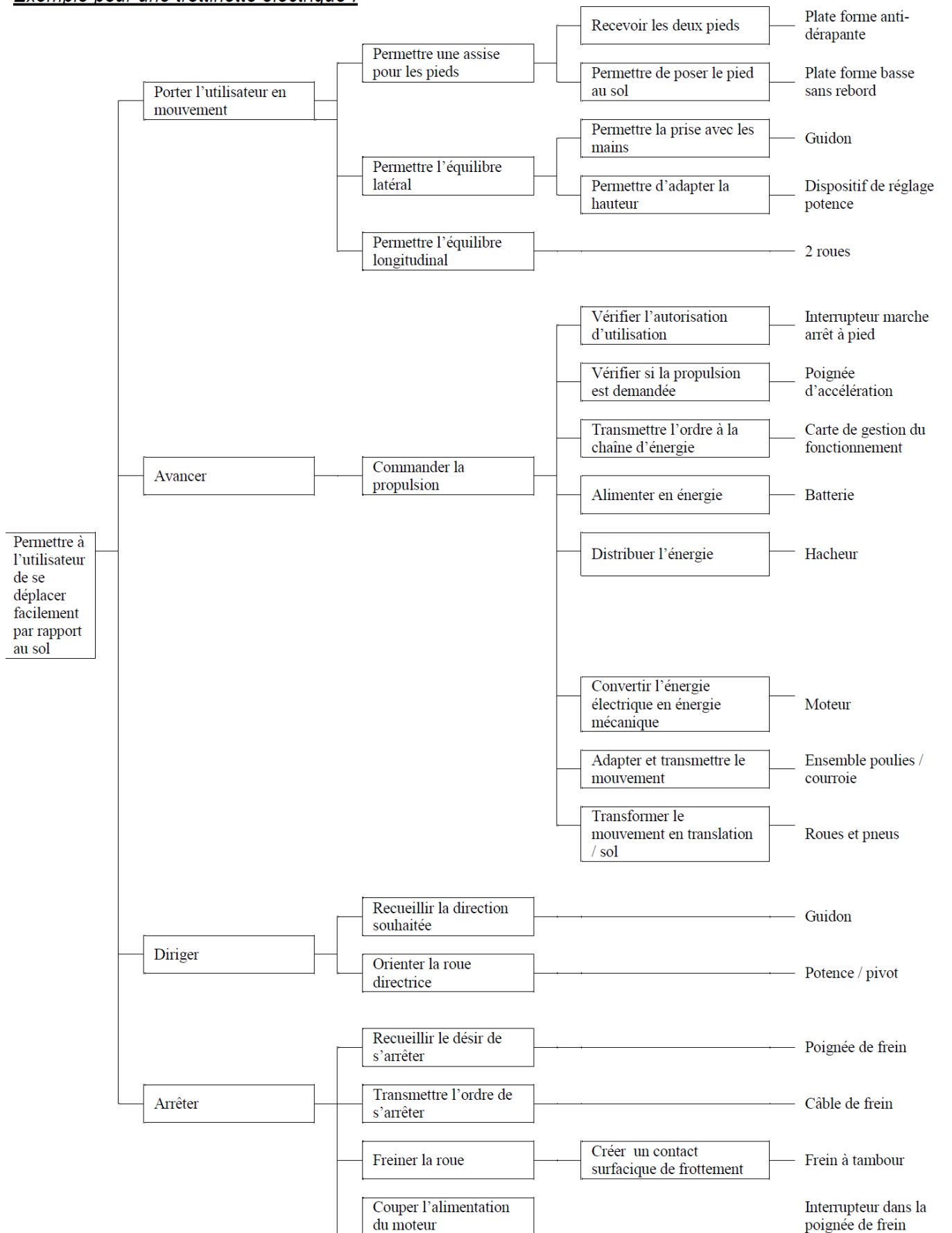
Principe : Utilisation de boîtes qui s'enchaînent dans un ordre précis. La première boîte part de la fonction que le système doit réaliser. Les boîtes suivantes permettent de décomposer cette fonction en fonctions élémentaires. Les dernières boîtes sont les boîtes qui contiennent les fonctions technique à réaliser pour que le système fonctionne comme on le désire.

La boîte s'établit en répondant aux questions suivantes :

- Pourquoi cette fonction ?
- Quand doit-on réaliser cette fonction ?
- Comment réaliser cette fonction ?



Exemple pour une trottinette électrique :



IV.4. Analyse Fonctionnelle Descendante : Méthode SADT

Elle reprend le principe précédant mais utilise des règles et un formalisme plus complexe. Ce type d'analyse, de décomposition fonctionnelle permet de modéliser et de décrire graphiquement des systèmes techniques. On procède par analyses successives descendantes, c'est à dire en allant du plus général vers le plus détaillé en fonction des besoins.

Fonction d'un système : une fonction d'un système est caractérisée par une action sur des matières d'œuvre, ou entrées. Les termes d'une fonction seront du type "Faire sur les entrées pour produire de la valeur ajoutée² (VA).

Données d'entrée / Matières d'œuvre d'Entrées (MOE) : Les données d'entrée, ou entrées, sont les matières d'œuvre modifiées par la fonction du système. Elles peuvent être de trois types :

- produit (matière) ;
- énergie ;
- information.

Données de sortie / Matières d'œuvre de Sorties (MOS) : Ce sont principalement les matières d'œuvre munies de leur valeur ajoutée.

S'ajoutent à ces matières d'œuvre sortantes :

- des comptes rendus ;
- des pertes énergétiques et des rebuts.

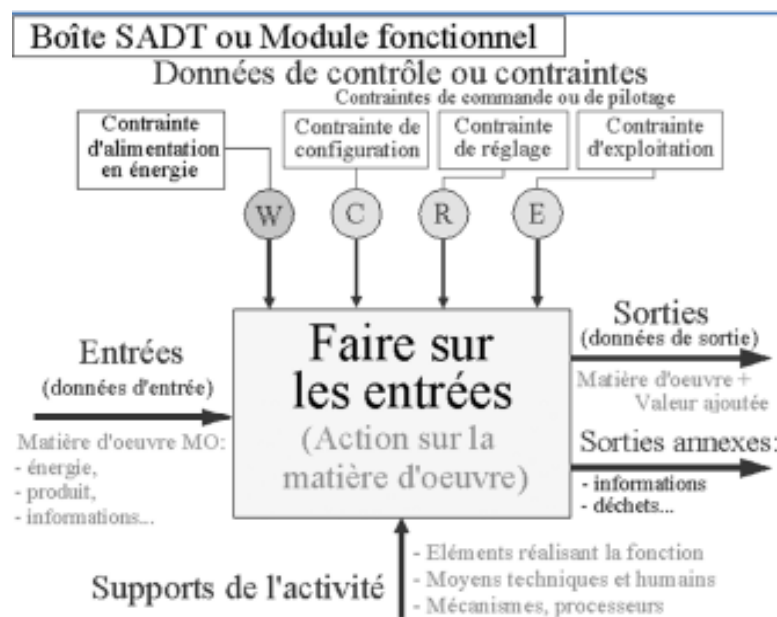
On peut donc écrire $MOS = MOE + VA$

Données de contrôle : Ce sont les paramètres qui déclenchent ou modifient la réalisation d'une fonction.

Ces paramètres, ou données de contrôle se classent en quatre catégories.

- données de contrôle énergétiques (W) ;
- données de contrôle d'exploitation (E) ;
- données de contrôle de configuration (C) ;
- données de contrôle de réglage (R).

Support de l'activité (processeur) : Ce sont les éléments physiques ou technologiques qui réalisent la fonction.

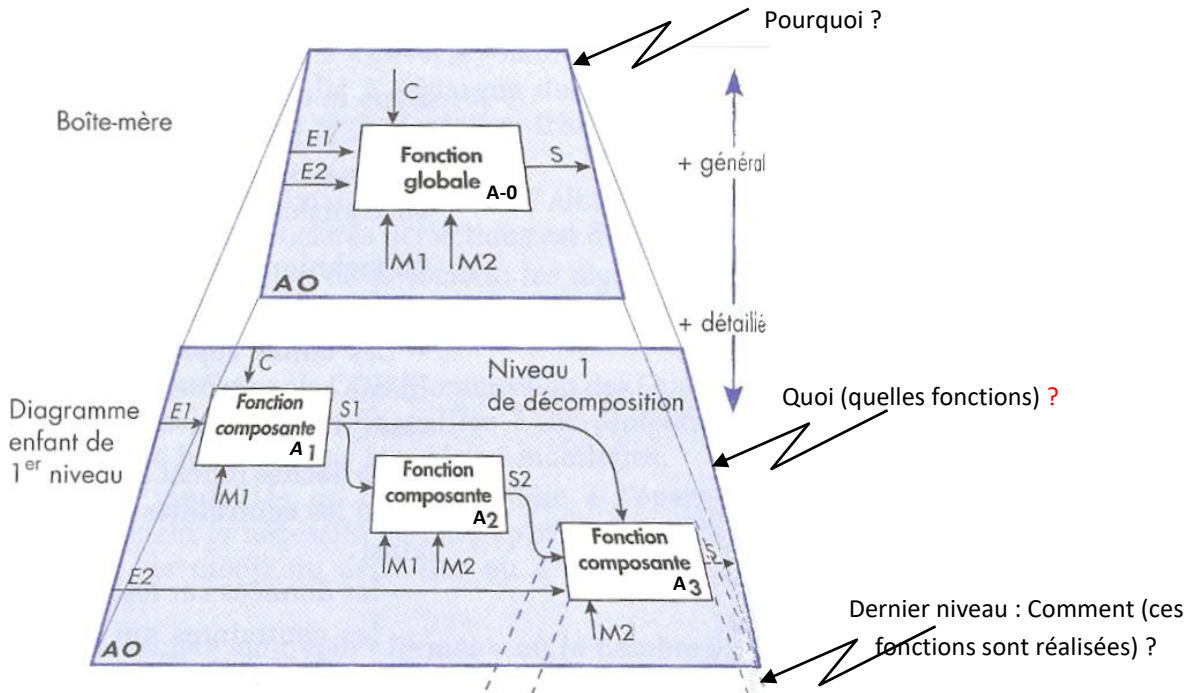


²Valeur ajoutée (VA) = Valeur supplémentaire ajoutées à la matière d'œuvre après passage dans le système.
 Valeur ajoutée = Matière d'œuvre sortante – Matière d'œuvre entrante

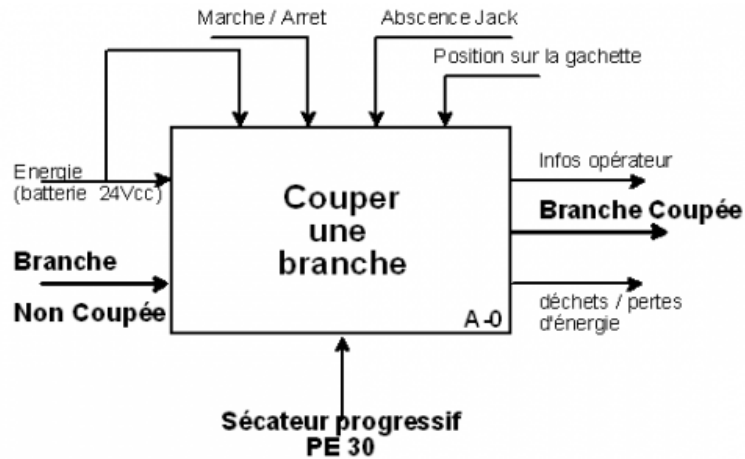
Niveaux d'analyse (hiérarchie des diagrammes) :

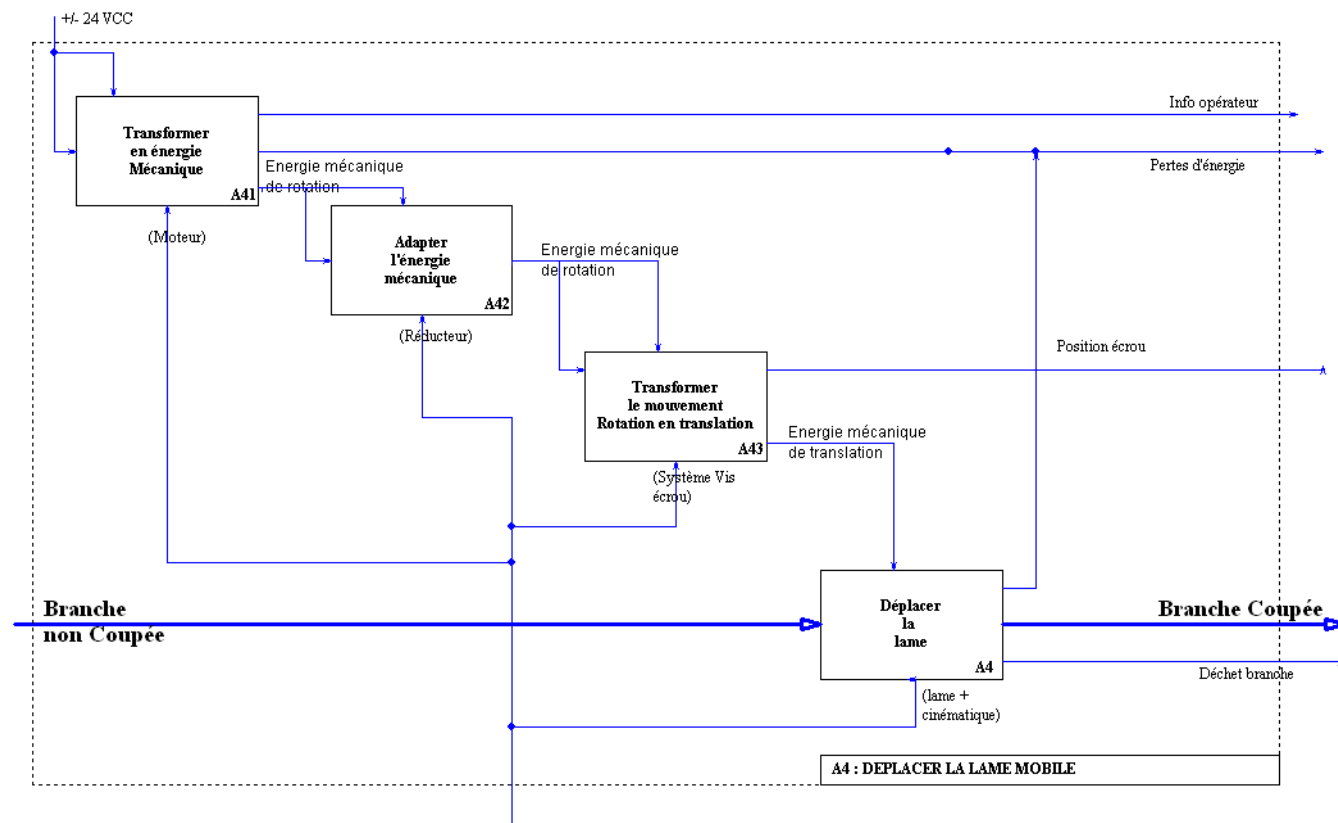
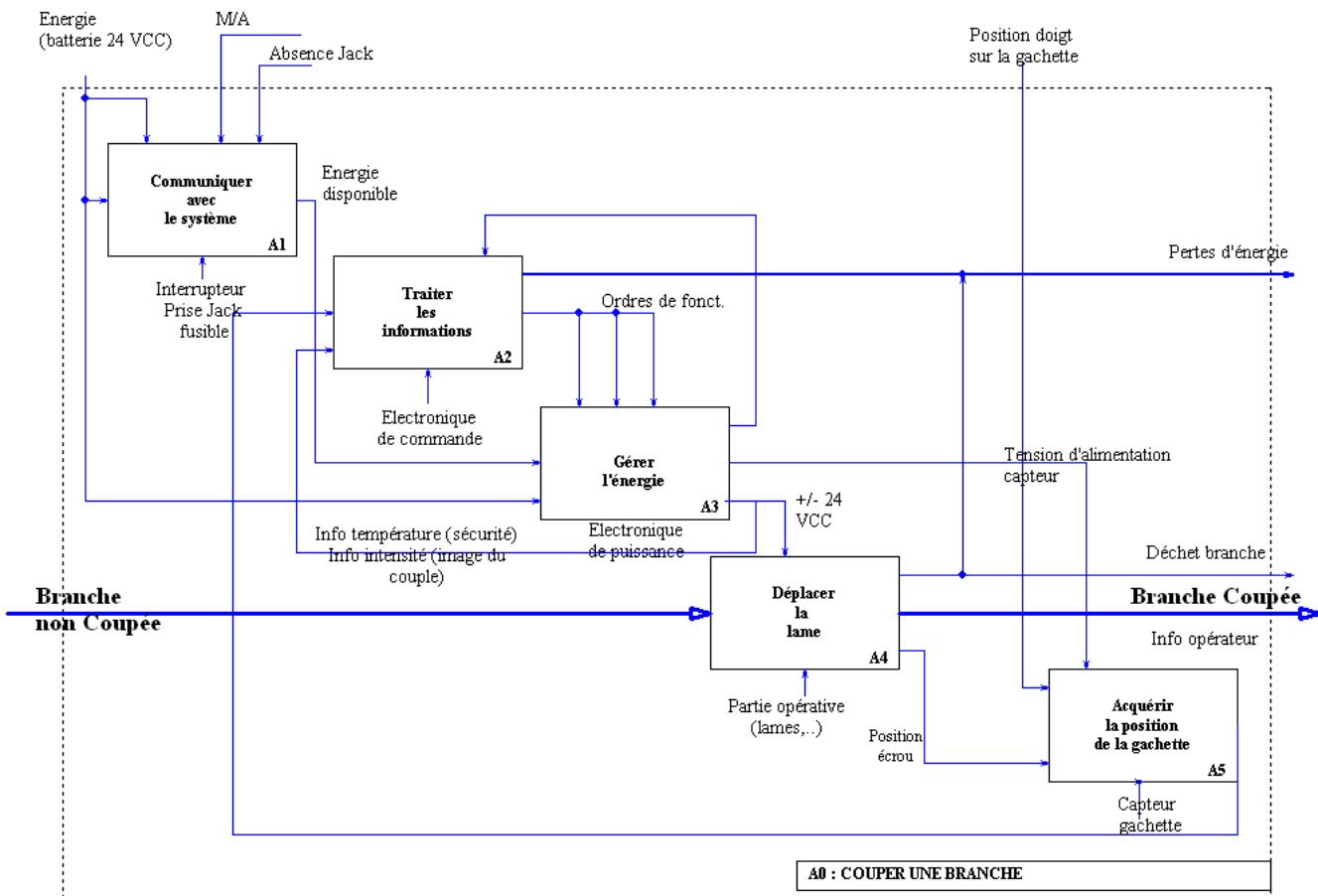
Le diagramme de plus haut niveau est noté A-0 (« A moins 0 ») et représente l'ensemble du problème. Le diagramme de niveau inférieur, A0, se décompose en n boîtes (A1 à An) donnant n diagrammes de niveau inférieur de même nom. De même A1 se décompose en plusieurs boîtes et niveaux A11, A12, etc. Même remarque pour A2.

Pour éviter la surabondance on utilise de 3 à 6 boîtes (au plus) par niveau, celles-ci sont toujours numérotées 1,2,3....



Exemple : Sécheur électrique





IV.5. Cahier Des Charges Fonctionnelle CDCF

Il est utilisé pour préparer et suivre le développement d'un produit aux phases suivant le pré-développement et sert de référence et de base de négociation en cas de contrat, litige, conflit ou modification nécessaire des spécifications techniques du produit.

La norme AFNOR X 50-151 propose un guide pour la rédaction.

IV.5.1.Rôle du CDCF

Ce cahier des charges particulier définit, précise, délimite les responsabilités des partenaires (demandeur du produit et concepteur/réalisateur) et pour le produit, les services attendus, les conditions d'utilisation, les performances, les coûts, les délais de livraison, les variations possibles de prix, les options, les clauses éventuelles...

Particularités : le CdCF s'occupe des fonctions de service du produit et n'exprime aucune idée de technique. Souple, il peut être modifié.

En cas de rapport client/fournisseur, interne ou externe, il devient un document contractuel. Sa rédaction et sa modification exigent l'accord des deux parties.

Utilisations : consultations, appels d'offres, adjudications, marchés négociés entre partenaires (y compris entre services d'une même entreprise), conception pour un coût objectif (CCO), référence pour une analyse de la valeur...

IV.5.2.Parties principales du CDCF

Le CdCF se compose de quatre parties principales:

Une présentation générale du problème : elle est destinée à donner toutes les informations générales utiles concernant le produit : marché, contexte du projet, objectifs, énoncé du besoin, environnement du produit...

Une expression fonctionnelle des besoins (partie principale) : elle décrit et définit les fonctions de service du produit, les contraintes, les critères d'appréciation (niveaux, flexibilités, limites)...

Un critère d'appréciation doit être accompagné de spécifications permettant de fixer le niveau d'exigence requis (grandeur mesurable ou autre). De plus, afin de pouvoir optimiser le produit, on donne, dans la mesure du possible, une indication de la flexibilité pour les niveaux d'exigence : 0 : niveau impératif, 1 : niveau peu négociable, 2 : niveau négociable, 3 : niveau très négociable

Caractériser les fonctions = Qualifier + Quantifier

Pour chaque fonction de services:

1. Qualifier par des mots les critères de performances de l'action décrites par le verbe ou le groupe verbal:
Ou? Quand? Combien? Comment?
2. Quantifier pour chaque critère le niveau de performances attendu
3. Quantifier pour chaque critère les limites d'acceptabilité

L'outil se présente sous la forme d'un tableau défini parla norme NF X 50 150.

FONCTIONS	CRITERES	NIVEAU	FLEXIBILITE

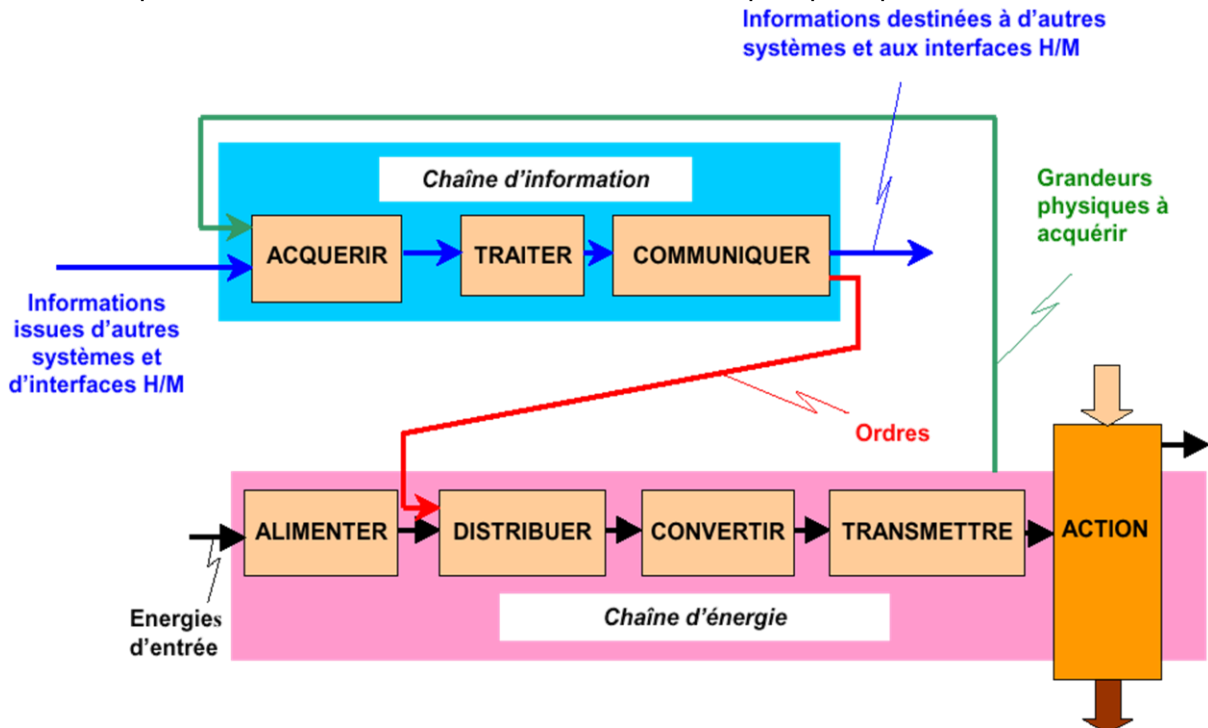
Un appel à des variantes : cette partie demande et fixe des limites à l'étude d'autres propositions ou d'autres solutions possibles pour réaliser le produit.

Un cadre de réponse : il est destiné à simplifier et à codifier la façon de répondre (présentations, descriptions, etc.) pour faciliter les dépouillements.

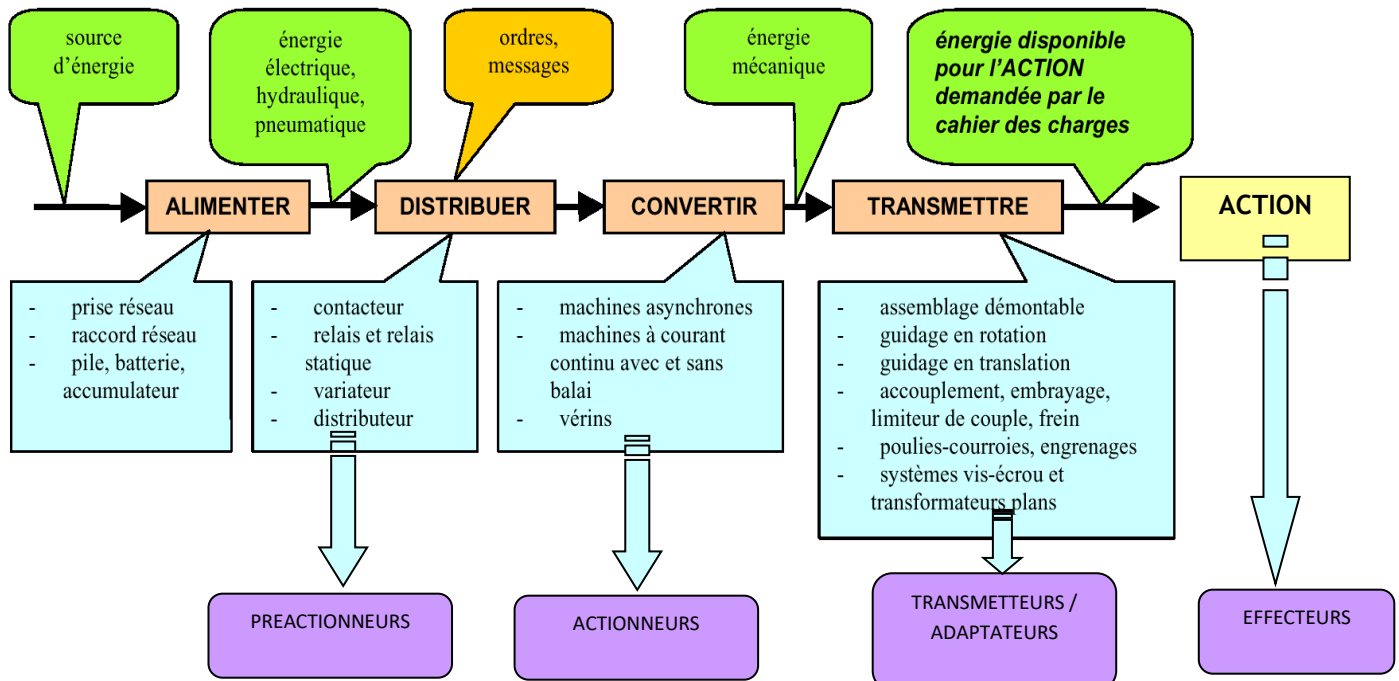
IV.6. DESCRIPTION PAR CHAINES D'ENERGIE ET D'INFORMATION

Pour chaque fonction ou action réalisée par le système, on peut représenter les relations entre les différents composants par deux chaînes (on parle de CECI), dans lesquelles on définit des fonctions habituelles pour un système automatisé :

- la chaîne d'information (qui transfère, stocke, transforme l'information) ;
- la chaîne d'énergie (qui transforme l'énergie et permet d'agir sur le système physique), chacune décomposée en un nombre limité de fonctions techniques principales.

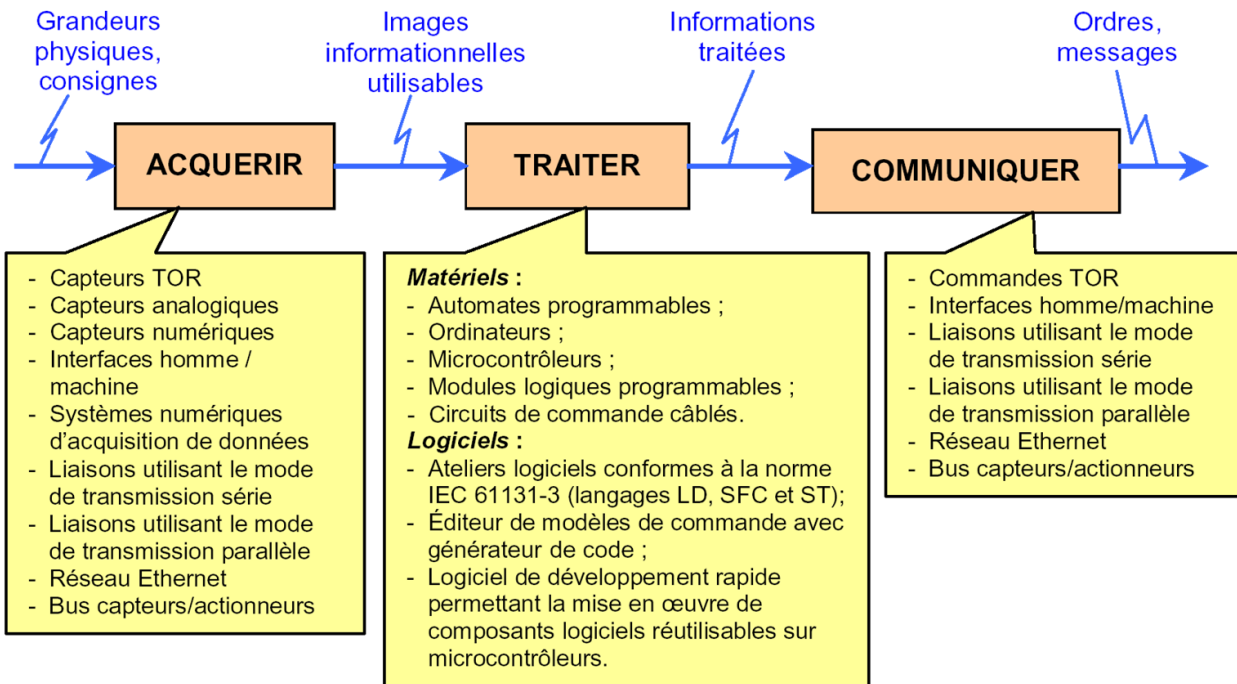


La chaîne d'énergie, associée à sa commande, assure la réalisation d'une fonction de service dont les caractéristiques sont spécifiées dans le cahier des charges. Repérable sur la plupart des produits et systèmes de notre environnement et des milieux industriels, elle est constituée des fonctions génériques : **alimenter, distribuer, convertir, transmettre** qui contribuent à la réalisation d'une action. L'action à réaliser impose un **flux d'énergie** (sens et niveau) que le système doit transmettre et gérer par sa commande. Les performances dépendent des caractéristiques des divers constituants.

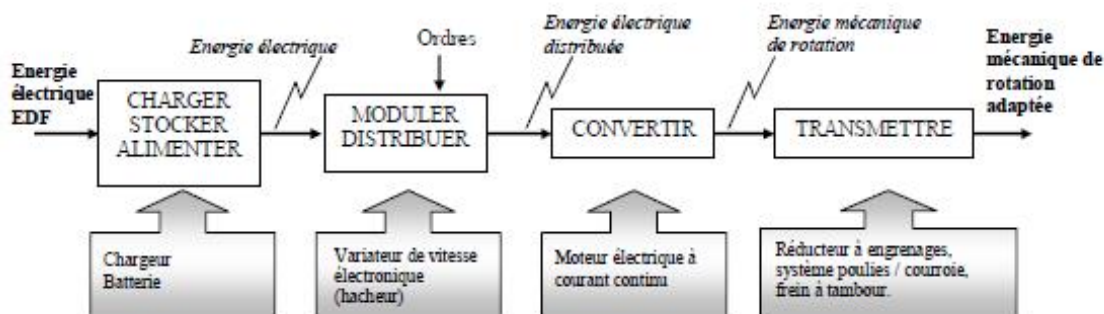
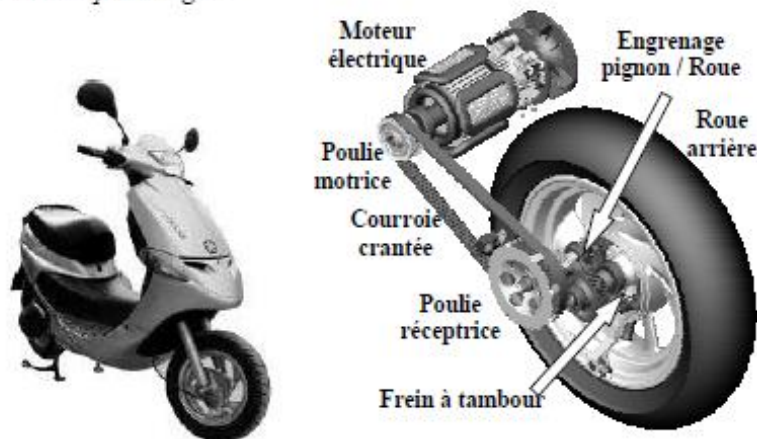


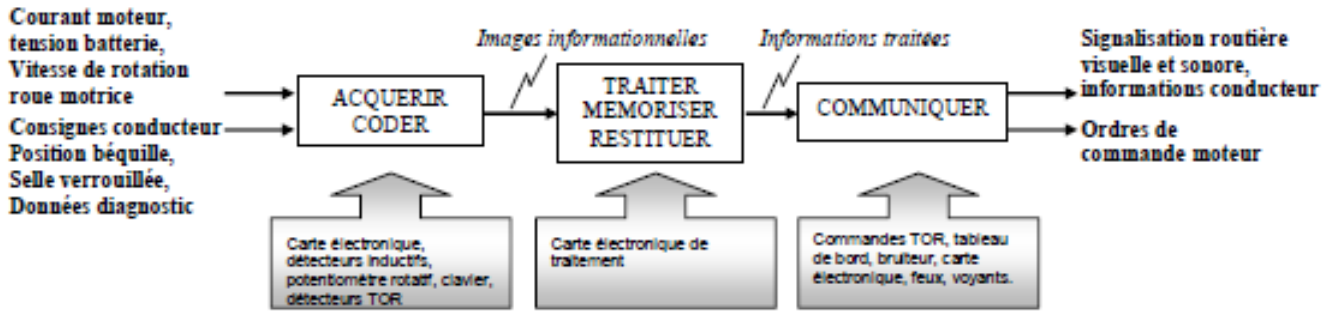
La chaîne d'information permet :

- **d'acquérir des informations :**
 - sur l'état d'un produit ou de l'un de ses éléments (en particulier de la chaîne d'énergie),
 - issues d'interfaces homme/machine ou élaborées par d'autres chaînes d'information,
 - sur un processus géré par d'autres systèmes (consultation de bases de données, partage de ressources...);
- **de traiter ces informations ;**
- **de communiquer** les informations générées par le système de traitement pour réaliser l'assignation des ordres destinés à la chaîne d'énergie et/ou pour élaborer des messages destinés aux interfaces homme/machine (ou à d'autres chaînes d'information).



Exemple : scooter électrique Peugeot





Le graphe CECI n'est pas toujours bien adaptée pour décrire un système. Surtout lorsque ce système réalise un grand nombre d'activités car cela implique d'utiliser plusieurs chaînes d'énergie et d'information. On utilisera alors d'autres types de représentation et notamment le langage **SYFML**.

IV.7. FLUX ECHANGES

Revenons sur les flux échangés (de matière, d'énergie et d'information). Il est souvent intéressant de préciser leurs caractéristiques et on parle alors de :

- variables potentielles
- variables flux.

La puissance est toujours le produit de ces deux grandeurs duales.

ex : $P(t) = u(t) \cdot i(t)$

$u(t)$ est la Variable Potentielle

$i(t)$ la Variable Flux

Une Variable Potentielle se mesure à partir d'une référence.



Une Variable Flux se mesure en introduisant un capteur dans le circuit du système considéré.



Le flux caractérise le déplacement de la grandeur représentative du domaine physique tandis que le potentiel caractérise son stockage.

Domaine	Variable potentielle	Variable flux	Puissance
Electrique	Tension U (V)	Courant I (A)	$P_e = U \cdot I$
Mécanique en translation	Vitesse linéaire V (m/s)	Force F (N)	$P_m = F \cdot V$
Mécanique en rotation	Vitesse de rotation Ω (rad/s)	Couple C (Nm)	$P_m = C \cdot \Omega$
Thermique	Température T (°K)	Flux thermique Φ	$P_{th} = \Delta T \cdot \Phi$
Hydraulique	Pression P (Pa)	Débit Q (m³/s)	$P_h = \Delta P \cdot Q$

On retrouvera des précisions sur ces variables dans certains diagrammes SYFML, notamment dans les diagrammes de blocs internes (ibd).

V. DIAGRAMMES SYSML



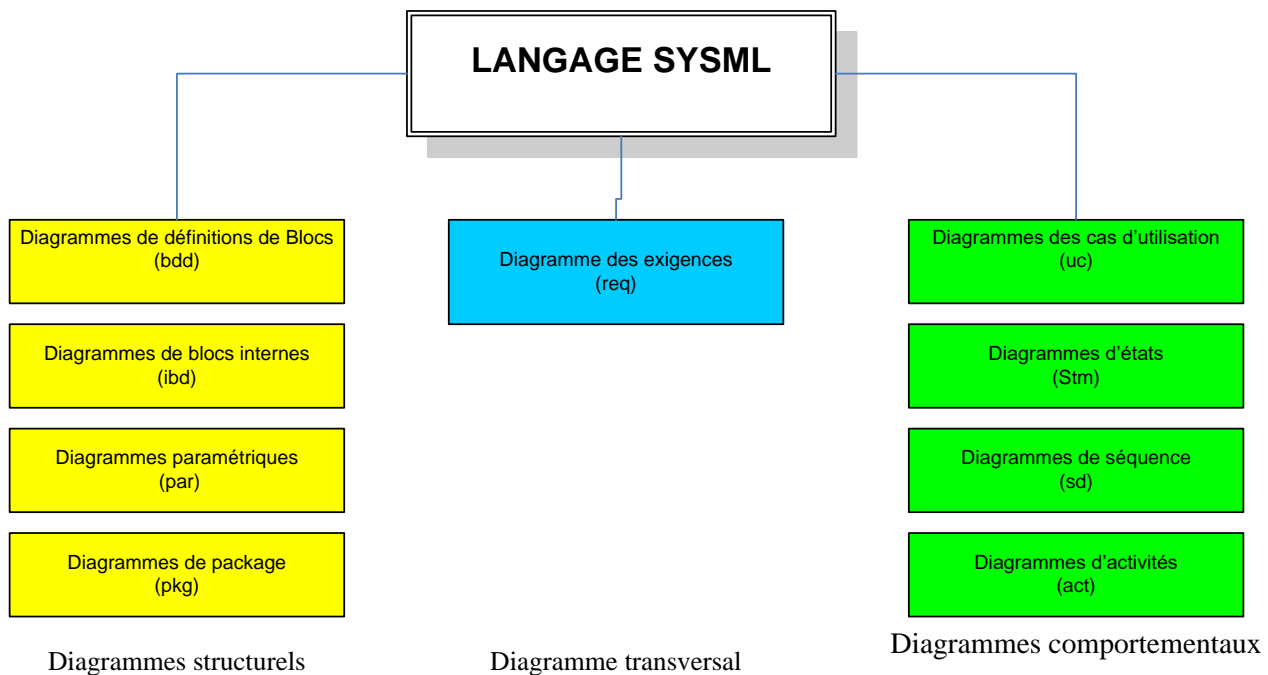
L'ingénierie des systèmes est une approche scientifique interdisciplinaire de formation récente, dont le but est de formaliser et d'appréhender la conception de systèmes complexes avec succès.

SYSML est l'acronyme de **Systems Modeling Language** (langage de modélisation des systèmes) ; c'est un langage dont le but est de décrire tout ou partie d'un système technique, d'un point de vue transversal, comportemental ou structurel.

Systeme : Ensemble de constituants inter-reliés qui interagissent les uns avec les autres d'une manière organisée pour accomplir une finalité commune.

Le langage **SysML** s'articule autour de **9 types de diagrammes**, divisés en diagrammes de structure (**approche structurale**), diagramme transverse (**approche fonctionnelle**) et diagrammes comportementaux (**approche comportementale**).

Ces différents diagrammes seront étudiés dans le chapitre SYSML.



VI. "EQUIVALENCES" SYSML et DIAGRAMMES DEDIES

	Outils traditionnels Génie mécanique	Outils traditionnels Génie électrique	SysML												
besoin	<p>La bête à cornes APTE</p>		<p>Pas d'équivalent graphique en SysML, mais possibilité de stéréotyper une exigence « besoin »</p>												
Expression du besoin	<p>Diagramme pieuvre APTE Inter-acteurs Fonctions</p>		<p>Diagramme des cas d'utilisation SysML</p>												
		Diagramme sagittal	<p>Diagramme de séquence SysML</p>												
			<p>Permet de décrire le scénario d'interactions entre les acteurs et le système pour chaque cas d'utilisation</p>												
Fonctions	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Fonctions</th> <th>Critères</th> <th>Niveaux</th> <th>Classe</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Fonctions	Critères	Niveaux	Classe									Diagramme fonctionnel niveau I et II	<p>Diagramme des exigences SysML</p> <p>On ne parle pas de fonctions mais d'exigences.</p> <p>La forme tabulaire est également disponible</p>
Fonctions	Critères	Niveaux	Classe												

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Structure</p>	<p>Diagramme de degrés 1 et 2</p>	<p>Diagramme de définition de blocs SysML</p>	
	<p>Arbre des voies technologiques APTE Fonctions service Fonctions techniques composants</p>	<p>Le SysML permet toutes les allocations :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Traçabilité entre exigence et composants ; - Traçabilité entre exigence et activités ; - Traçabilité entre activité et composants. 	
	<p>Chaîne fonctionnelle</p>	<p>Diagramme de bloc interne SysML</p>	
	<p>SADT</p>	<p>Permet de décrire les connexions entre les blocs (Logique ou flux)</p>	
	<p>Grafcet</p>	<p>Algorithme</p>	<p>Diagramme d'états SysML</p>