

CONCEPTION MECANIQUE1

Chapitre IV MATERIAUX

IV.1. Introduction

Étudier la relation produits-matériaux-procédés est une chose difficile. En effet, cette approche nécessite une grande culture technologique, de l'expérience et du recul sur les problématiques mises en jeu.

De plus, l'évolution de la science des matériaux, des technologies afférentes à la mise en forme des produits, l'avènement des nanotechnologies et plus encore le besoin impérieux de penser éco- conception rendent cette étude encore plus complexe.

C'est pourquoi ce cours ne prétend pas aborder le sujet de manière exhaustive ; son objectif est simplement de constituer une base solide sur laquelle il sera possible de construire une culture technologique forte.

IV.2. Les grandes familles de matériaux

IV.2.1 Métaux et alliages

IV.2.1.1 Aciers

Les aciers sont à la base un alliage entre le fer et le carbone dont la teneur, variable, est en masse inférieure à 1,7% ($\approx 2\%$). Ensuite, on peut ajouter divers éléments d'addition (chrome, nickel,...) pour améliorer certaines caractéristiques (dureté, résistance à la corrosion,...) et constituer les familles d'aciers alliés (inoxydables...).

*L'acier inoxydable, couramment appelé **acier inox** ou **inox**, est un acier (alliage à base fer) (comportant moins de 1,2 % de carbone) avec plus de 10,5 % de chrome, dont la propriété est d'être peu sensible à la corrosion et de ne pas se dégrader en rouille.*

On peut considérer 4 familles principales d'aciers :

1. Aciers au carbone d'usage général : faible teneur en carbone ($< 0,2\%$)

- Utilisation : constructions mécaniques, emboutissage, constructions soudées et chaudronnerie, aciers à béton...
- Désignation : lettre S ou E suivie de la limite élastique R_e en MPa.
- Exemples : S235, E360

2. Aciers au carbone non alliés : plus grande teneur en carbone, composition chimique plus fine, très faible quantité d'éléments d'addition ($Mn < 1\%$, $Cr+Mo+Ni < 0,6\%$).

- Utilisation : aciers pour traitements thermiques, pièces petites ou moyennes.
- Désignation : lettre C suivie de la teneur en carbone en pourcentage multipliée par 100.

CONCEPTION MECANIQUE 1

- Exemple : C40 (contient 0,4% de carbone)

3. Aciers faiblement alliés : aucun élément d'addition ne dépasse 5%

- Utilisation : aciers pour traitements thermiques et hautes résistances...
- Désignation : pourcentage de carbone $\times 100$, symbole chimiques des principaux éléments d'addition classés par ordre décroissant et dans le même ordre, pourcentage de ces mêmes éléments (avec multiplicateur selon l'élément).
- Exemple : 30 CrNiMo 8 (acier ayant 0,30% de carbone, 2% de chrome, et moins de 1% de nickel et de molybdène).

ELEMENTS D'ADDITION	FACTEUR	ELEMENTS D'ADDITION	FACTEUR
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4	Ce, N, P, S	100
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10	B	1000

4. Aciers fortement alliés : au moins un élément d'addition dépasse 5% en masse.

- Utilisation : usages particuliers comme les aciers inoxydables, aciers réfractaires, aciers à outils...
- Désignation : lettre X suivie du pourcentage en carbone, symbole chimiques des principaux éléments d'addition classés par ordre décroissant et dans le même ordre, pourcentage de ces mêmes éléments.
- Exemple : X5 CrNiMo 17-12 (acier inoxydable avec 0,05% de carbone, 17% de chrome, 12% de nickel et moins de 1% de molybdène).

IV.2.1.2 Fontes

Comme les aciers, les fontes sont un alliage de fer et de carbone avec des éléments d'addition éventuels. A la différence de l'acier, le carbone y est présent en plus grande quantité : de 1,7% à 6,67% en masse. Les fontes industrielles se situent entre 2 et 4% de carbone.

- Utilisation : tout type de pièces mécaniques majoritairement obtenues en fonderie (bâti de machines, blocs moteurs, arbre à came, mais aussi plaques de cheminées, grilles d'égout, mobilier urbain...)
- Désignation : EN-GJ suivi de la lettre symbole de la famille (L pour lamellaire, S pour graphite sphéroïdale...). On y ajoute la valeur de la résistance à la rupture (R_r) en MPa, puis éventuellement l'allongement pour cent ($A\%$).
- Exemple : EN-GJS 550-7 (fonte à graphite sphéroïdal, $R_r = 550$ MPa, $A\% = 7$).

CONCEPTION MECANIQUE 1

DESIGNATION	SIGNIFICATION
EN-GJL-200 S	GJL : Fonte à graphite lamellaire 200 : Résistance minimale à la rupture par extension (Rr mini en Mpa; 1Mpa= 1N/mm ²) S : Mode de production de l'échantillon de l'essai
EN-GJS-600-3	GJS : Fonte à graphite sphéroïdal 600 : Résistance minimale à la rupture par extension (Rr mini en Mpa) 3 : Allongement en % après rupture
EN-GJMW-400-10	GJMW : Fonte malléable à cœur blanc 400: Résistance minimale à la rupture par extension (Rr mini en Mpa) 10: Allongement en % après rupture
EN-GJMB-350-10	GJMB : Fonte malléable à cœur noir 350 : Résistance minimale à la rupture par extension (Rr mini en Mpa) 10 : Allongement en % après rupture

IV.2.1.3 Métaux non ferreux

Ces métaux ont souvent une température de fusion basse (facilite le moulage), une grande malléabilité (favorise la déformation à froid) et une bonne usinabilité.

- Avantages par rapport aux aciers : résistance à la corrosion, facilité de fabrication, conductivité électrique, conductivité thermique, légèreté, couleur...
- Inconvénients : résistance mécanique plus faible, soudabilité inférieure
- Principales familles : aluminium, cuivre, magnésium, zinc, titane...

On peut aborder rapidement quelques unes de ces différentes familles :

1. **Aluminium et alliages corroyés** : ce sont les métaux les plus utilisés après les aciers (alliages légers)

- Utilisation : produits à base de profilés, tôles, plaques, etc.
- Désignation : préfixe EN AW suivi d'un nombre à 4 chiffres pour identifier l'alliage. Au besoin, on rajoute entre crochets le symbole chimique de l'alliage.
- Exemple : EN AW-2017 [AlCu4MgSi] (alliage avec 4% de cuivre, 0,5% de magnésium et 0,5% de silicium).

2. **Aluminium et alliages pour la fonderie** : faciles à mouler, en moule métallique ou moulage sable

- Utilisation : pièces de fonderie en petite, moyenne et grande série.

CONCEPTION MECANIQUE 1

- Désignation : préfixe EN AC suivi du symbole chimique de l'alliage.
- Exemple : EN AC Si12CuMgNi (alliage pour pièce moulée avec 12% de silicium, et moins de 1% de cuivre, de magnésium et de silicium.).

3. **Cuivre et alliages** : C'est la plus importante famille de métaux après l'aluminium. Les alliages de cuivre ne sont pas utilisés pour faire des bâtis ou des pièces de structures. Ils présentent en général un bel aspect décoratif.

- Quelques alliages : laiton : Cu+Zn (cuivre+zinc), bronze : Cu+Sn (cuivre+étain), Maillechort : Cu+Ni+Zn (cuivre+nickel+zinc).
- Désignation : préfixe Cu suivi des symboles chimiques des principaux constituants d'addition avec leur teneur en pourcent.
- Exemple : CuZn₁₉Al₆ (laiton haute résistance).

IV.2.1.4 Traitements thermiques des métaux

Les traitements thermiques ont pour objectif d'améliorer uniformément ou localement certaines propriétés mécaniques des métaux.

- **Trempe** : refroidissement rapide d'un acier préalablement chauffé ($\approx 900^{\circ}\text{C}$) pour augmenter sa résistance (R_r et R_e) et sa dureté (H). Peut-être superficielle si on souhaite uniquement augmenter la dureté en surface.
- **Revenu** : pratiqué après la trempe, il permet d'en corriger les aspects négatifs. On chauffe l'acier ($\approx 500^{\circ}\text{C}$) puis on le refroidit lentement. Augmente la résilience et la malléabilité.

La résilience, de symbole général K , caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans se rompre. Elle est mesurée grâce à l'essai de résilience Charpy (on mesure l'énergie nécessaire à la rupture fragile d'une éprouvette entaillée).

- **Recuit** : effet inverse à celui de la trempe. On chauffe l'acier ($\approx 900^{\circ}\text{C}$) puis on le maintient à température avant un refroidissement lent.
- **Cémentation** : traitement thermo-chimique destiné à augmenter la dureté, par apport de carbone localisé sur la surface à traiter.

IV.2.2 Céramiques et verres

Les céramiques font partie des matériaux qui ont été les premiers façonnés par l'homme : poteries, vases, amphores, etc. Ce sont des matériaux inorganiques, non métalliques. On distingue deux familles principales :

IV.2.2.1 Les céramiques : On peut distinguer 2 classes de céramiques :

CONCEPTION MECANIQUE 1

- Techniques : elles sont issues de la chimie de synthèse et leur composition est rigoureusement définie. Ce sont le plus souvent des oxydes, des carbures ou des nitrures (Al_2O_3 , SiC ...).
- Traditionnelles : elles sont dérivées de minéraux courants, leur composition est variable. Les ciments et les bétons sont apparentés à cette famille.

IV.2.2.2 Les verres : dérivés de minéraux courants, ils sont caractérisés par leur haute teneur en silice et leur structure totalement amorphe (vitreuse).

La transition vitreuse est un phénomène réversible de transition d'état, entre la forme dure et relativement cassante et la forme « fondue » ou caoutchouteuse d'un matériau amorphe. Un solide amorphe qui montre une telle forme de transition vitreuse est appelé un verre.

Les céramiques et les verres ont comme principale caractéristique d'être fragiles : le paramètre K_c caractérisant la capacité de résister à la propagation d'une fissure (ténacité).

Ils sont peu résistants à des contraintes de traction. Par contre, ils résistent bien à des contraintes de compression, à la corrosion, à l'usure et aux températures élevées (surtout les céramiques) ; ce sont des matériaux réfractaires. Ce sont aussi de bons isolants électriques et thermiques.

IV.2.3 Matériaux organiques

IV.2.3.1 Matières plastiques

Un plastique est un mélange dont le constituant de base est une résine ou polymère, à laquelle on associe des adjuvants (plastifiants, anti-oxydants,...) et des additifs (colorants, ignifugeants). On peut considérer 3 grandes familles de plastiques :

1. Thermoplastiques : les plus nombreux (90% de la production) et les plus faciles à mettre en œuvre ; ils ramollissent et se déforment sous l'effet de la chaleur. Ils peuvent, en théorie, être refondus et réutilisés plusieurs fois. Exemples : ABS, PMMA, PTFE, PP.

2. Thermodurcissables : plus difficiles à mettre en œuvre, ils ne ramollissent pas sous l'effet de la chaleur mais se rigidifient et durcissent. Une fois créés, il n'est plus possible de les remodeler par chauffage. De nombreuses colles et revêtements font partie de cette famille. Exemples : EP (araldite), UP (polyester).

3. Élastomères : naturels (caoutchouc) ou synthétiques, on peut les considérer comme une famille supplémentaire de polymères aux propriétés très particulières. Ils sont caractérisés par une très grande élasticité.

Désignation des matières plastiques thermoplastiques

CONCEPTION MECANIQUE 1

Nom	Désignation	Noms commerciaux
Acrylobutadiène styrène	ABS	
Polyamide	PA 11; PA 6 ; PA 6.6	Rilsan, Nylon, Technyl, etc...
Polybutylène téréphtalate	PBT	
Polycarbonate	PC	Makrolon, Lexan, etc...
Polychlorure de vinyle	PVC	Vinidur, Viniflex, etc...
Polyéthylène	PE	Lactène, Hostalen, etc...
Polyéthylène téréphtalate	PET	
Polyméthacrylate de méthyle	PMMA	Altuglas, Plexiglas, etc...
Polyoxyméthylène	POM	Ultraform, Kematal, etc...
Polypropylène	PP	Appryl, Novolen, etc...
Polystyrène	PS	
Polystyrène choc	SB	

Désignation des matières plastiques thermodurcissables

Nom	Désignation	Noms commerciaux
Epoxyde	EP	Araldite, Néonite, etc...
Phénoplaste	PF	Bakélite.
Polyester	UP	Rutapal, Norsodyne, etc...
Polyuréthane	PUR	Vovanol, Bayflex, etc...

IV.2.3.2 Matériaux naturels

Dans divers secteurs de l'industrie, on peut aussi utiliser les matériaux naturels, qui, de part leurs propriétés spécifiques, conviennent à de nombreuses applications. On peut distinguer quelques grandes familles, de par leur origine :

- 1. Origine végétale** : bois (habitat, construction navale..), chanvre (isolation)...
- 2. Origine animale** : laine de mouton, soie, ...
- 3. Origine minérale** : roches, graviers, argile...

CONCEPTION MECANIQUE 1



Figure : Habitation construite avec des matériaux naturels

IV.2.4. Matériaux composites

Un matériau composite peut se définir comme étant l'association d'au moins **deux matériaux non miscibles**. Cette association permet d'atteindre des performances mécaniques et/ou physico-chimiques que les constituants de base ne peuvent pas atteindre seuls.

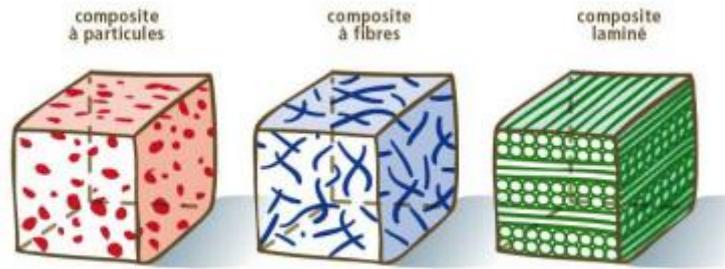
L'association la plus commune est faite à partir de renforts fibreux noyés dans une matrice :

- Le renfort (ou l'armature) joue le rôle de squelette, il assure la tenue mécanique (rigidité et résistance).
- La matrice joue le rôle de liant, elle fige la forme finale de la pièce. Elle assure aussi le transfert des efforts vers les fibres.

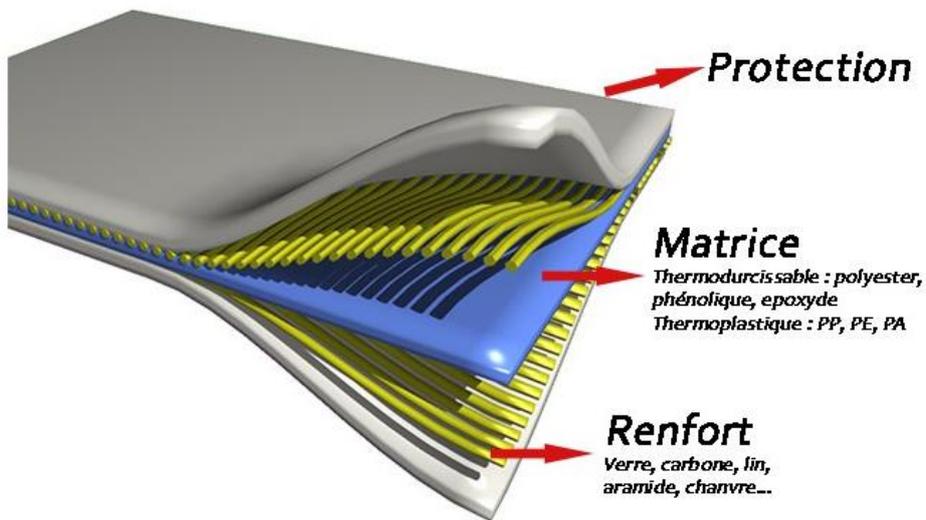
Ce transfert des efforts entre fibre et matrice n'est efficace que si l'adhésion fibre/matrice (rôle de l'interface) est de bonne qualité. Suivant la nature des constituants, les matériaux composites peuvent être classés en plusieurs familles :

- La famille, de loin la plus représentative, regroupe les matériaux composites constitués par des fibres d'origine minérale ou organique (fibres de verre, de carbone ou d'aramide), associées à des matrices organiques.
- Les autres familles occupent des secteurs industriels très pointus (spatial, ...), elles sont utilisées dans des applications très spécifiques (tenue aux hautes températures, très fortes abrasions, etc ...). Dans ces familles, on peut citer les composites à fibres de céramique ou métalliques associées à des matrices également céramiques ou métalliques ou encore les composites carbone/carbone.

CONCEPTION MECANIQUE 1



Différentes structures de matériaux composites



a – Roving de verre



b – Tissu de verre



c – Mat de verre

Fig. : Différents types de fibres de verre (documentation Ahlstrom)

CONCEPTION MECANIQUE 1

IV.2.5. Nanomatériaux

Un nanomatériau est un matériau (sous forme de poudre, aérosol ou quasi-gaz, suspension liquide, gel) possédant des propriétés particulières à cause de sa taille et structure nanométrique. Les nanomatériaux sont - au sens commun du terme - habituellement issus de la nanotechnologie, à la différence des nanoparticules qui peuvent être d'origine naturelle ou résulter de processus tels que le soudage, le fumage, le polissage, etc.

L'utilisation de ces matériaux est en plein essor, et les progrès scientifiques et technologiques dans ce domaine sont rapides. Néanmoins, de par leur taille (entre 1 et 100 nm), la manipulation des nanomatériaux comporte des risques sanitaires et industriels qu'il est pour l'heure difficile d'évaluer.

IV.2.6. Synthèse

Caractéristique	Métaux	Céramiques	Polymères	Composites
Densité	Moyenne/élevée	Moyenne	Faible/très faible	Moyenne/faible
Prix	Faible/élevé	Élevé (techniques), Faible (grde diffusion)	Faible/élevé	Élevé
Module d'Elasticité	Élevé	Très élevé	Moyen/faible	Élevé
Résistance Mécanique	Élevée	Très élevée (compression)	Moyenne/faible	Élevée
Tolérance aux défauts et aux chocs	Très tenace	Très fragile	Peu tenaces mais grande énergie absorbée	Très tenace
Températures d'utilisation	Moyenne/hautes	Hautes/très hautes	Moyennes/faibles	Moyennes
Tenue aux agressions chimiques	Moyenne/mauvaise	Bonne/très bonne	Moyenne	Moyenne
Conduction de la chaleur	Bonne/très bonne	Moyenne/faible	Faible/très faible	Faible
Conduction de l'électricité	Bonne/très bonne	Faible/très faible		
Facilité de mise en forme	Facile	Difficile (technique), Facile (grde diffusion)	Très facile	Moyenne dépendant de la forme
Facilité d'assemblage	Facile	Moyenne	Facile	Difficile

IV.3. Choix des matériaux

La définition compétente d'un organe de machine exige la détermination de sa forme, de ses dimensions et de sa matière.

Le choix d'un matériau dépend de plusieurs critères :

- Caractéristiques **mécaniques** : limite élastique, masse, dureté, résilience...
- Caractéristiques **physico-chimiques** : comportement à la corrosion, vieillissement...

CONCEPTION MECANIQUE 1

- Caractéristiques de *mise en œuvre* : usinabilité, soudabilité, trempabilité...
- Caractéristiques *économiques* : prix, disponibilité, expérience industrielle...

Le choix des matériaux est une tâche fondamentale et très complexe. En effet, dans un nombre important de cas, il ne concerne pas seulement un aspect purement technique répondant à des exigences fonctionnelles, mais aussi à des attentes relevant des préférences des utilisateurs dans le cadre d'un marché spécifique. Ainsi, le choix des matériaux doit être analysé sous l'angle de l'ingénierie de matériaux mais aussi sur celle du design industriel, et tenir compte de toutes les informations qui lui seront associées.

Le choix des matériaux est au cœur de la relation « Produit-Matériau-Procédé ».

Il est impératif d'effectuer le choix du couple matériau- procédé à partir des critères du cahier des charges et dans un contexte de développement durable.

- le produit demande certaines performances de la part du matériau
- le procédé impose des contraintes de fabrication ou de construction.

IV.3.1. ÉTAPES A SUIVRE POUR LE CHOIX DES MATERIAUX

Étapes à suivre pour le choix des matériaux :

- 1 Étudier l'information autour du nouveau produit
- 2 Définir les caractéristiques/exigences de conception du produit
- 3 Faire le choix des matériaux viables
- 4 Évaluer les procédés possibles
- 5 Prioriser et tirer des conclusions

Étape 1 : Étudier l'information autour du nouveau produit

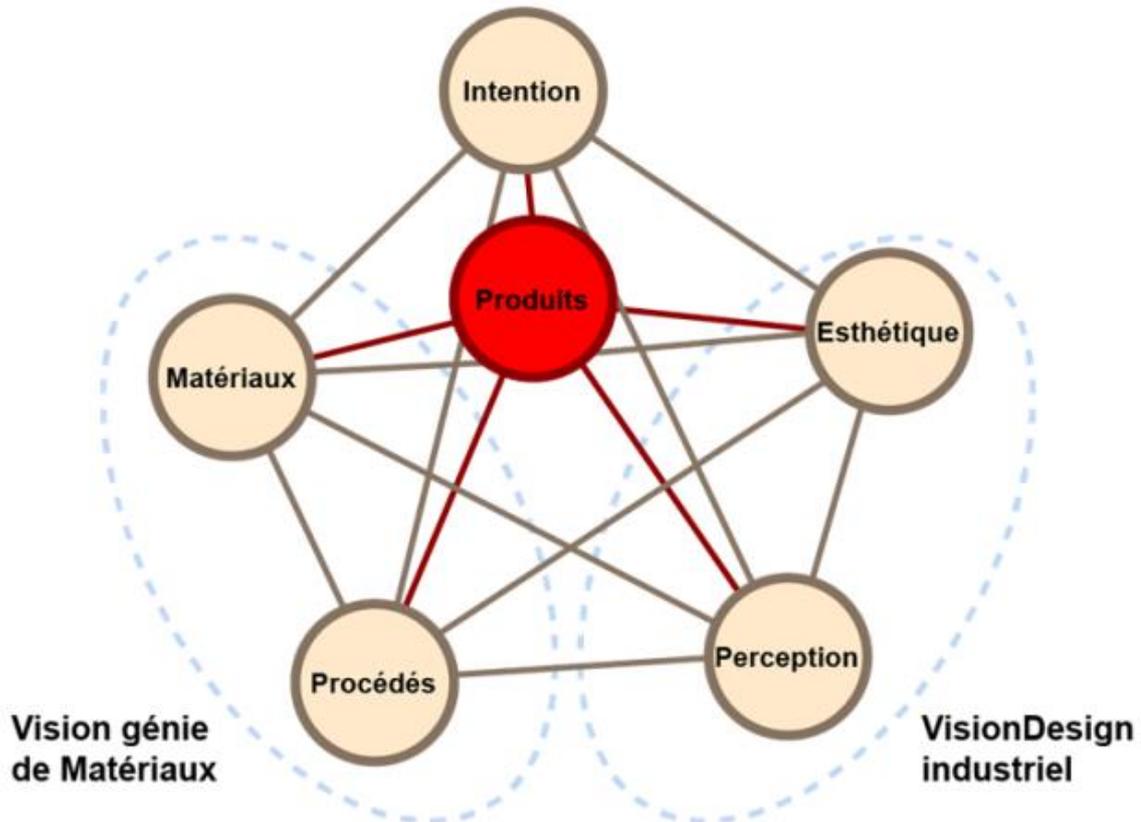
Dans la plupart des cas, le processus de conception innovante commence par l'identification et la formulation du concept, à partir d'une idée, d'un besoin particulier ou d'un changement dans le contexte d'utilisation. Ensuite, nous cherchons à visualiser le produit, c'est-à-dire à préciser ses caractéristiques à travers l'utilisation de représentations graphiques, de la construction de modèles ou grâce à l'utilisation d'outils issus de la conception assistée par ordinateur. Ceci nous permet alors de préciser la configuration, la taille, la fonctionnalité ou la personnalité du produit. Enfin, la matérialisation à travers un prototype vous confronte aux choix de matériaux et des procédés qui vous permettront de valider ou d'affiner le concept initial.

D'après M. Ashby et K. Johnson (Materials and Design, 2e édition, 2009), un produit est défini par l'interaction de six domaines d'information inter-corrélés, qui doivent être pris en compte tout au long du processus de conception :

- Les produits : c'est l'objet d'étude, l'information le décrivant contient des données factuelles comme les attributs du produit par exemple : le nom, le fabricant, le prix et les performances.
- Les matériaux : la nature de la matière constituant le produit et ses performances.

CONCEPTION MECANIQUE 1

- Les procédés : la description des étapes de transformation nécessaires de cette matière.
- L'esthétique : les aspects visuels, tactiles, acoustiques ou olfactifs.
- La perception : les attributs sur lesquels le produit va être jugé (culture, goût ou mode).
- L'intention : ce que le produit doit être dans l'esprit du concepteur (quelles sont ses priorités).



Choix des matériaux d'un produit

Étape 2 : Définir les caractéristiques/exigences de conception du produit

Une caractéristique est définie comme un aspect de la conception qui contribue à sa fonctionnalité, son usage ou sa personnalité. Ces caractéristiques peuvent être de natures diverses et leur ensemble constitue la description topologique du produit. Il peut exister des caractéristiques géométriques ou dimensionnelles définies par les critères techniques du produit (résistance au choc, stabilité, précision), des caractéristiques définies par les besoins d'usage de l'utilisateur (ergonomie) ou encore d'autres pour exprimer des qualités visuelles ou tactiles.

Exemple

Attributs esthétiques : noir, métallique, doux

Perception : high-tech, masculin, cher

CONCEPTION MECANIQUE 1

Identifier les exigences de conception nécessite de lister celles qui sont explicites afin de définir les fonctionnalités, les contraintes et les objectifs.

Dans cette étape, les approches basées sur l'analyse de la valeur peuvent permettre de définir les caractéristiques d'une manière méthodique.

Étape 3 : Faire le choix des matériaux viables

Une fois les caractéristiques du produit définies, une sélection sur l'univers de matériaux doit être faite (car on estime qu'il existe plus de 60 000 matériaux disponibles), en utilisant des ressources telles que des bases de données spécialisées, des logiciels et de la connaissance préalable. La sélection se fera par un processus itératif de réduction et d'expansion des espaces de matériaux possibles jusqu'à trouver l'ensemble qui réponde au mieux aux exigences définies préalablement. Ce changement d'approche a pour but de favoriser l'inspiration créative. Pour ce faire, diverses techniques de sélection de matériaux peuvent être appliquées :

- **Sélection par analyse** : basée principalement sur la connaissance des attributs techniques de la matière pour éliminer les choix non conformes, elle s'utilise comme suit :
 - ✚ traduire les exigences du langage non technique en langage technique ;
 - ✚ identifier des mesures de performance technique ;
 - ✚ identifier les propriétés associées aux performances ;
 - ✚ explorer l'univers des matériaux (base de données) pour choisir ceux qui correspondent aux propriétés exigées.

Avantage : procédé systématique, robuste et basé sur la connaissance technique de la matière.

Inconvénient : applicable à des problèmes et règles bien connus.

- **Sélection par synthèse** : basée sur l'expérience préalable et l'analogie, les attributs à prendre en compte sont ceux définis par l'esthétique, la perception et l'intention. Les matériaux considérés seront ceux dont les applications ont des caractéristiques communes avec celles du produit objet de l'étude. Ceci permet de cibler un ensemble de matériaux possibles.

Avantage : permet une pollinisation croisée entre disciplines et la capitalisation des connaissances acquises.

Inconvénient : basée pour l'essentiel sur l'expérience des concepteurs.

- **Sélection par similarité** : il s'agit de l'exploration des espaces de conception autour des propriétés d'un matériau existant utilisé comme référent, car répondant au mieux aux exigences de conception. On procède comme suit :
 - capture : identification de l'ensemble des propriétés du matériau de référence ;
 - édition : fixer la propriété objectif et libérer les autres attributs (élargir l'espace de conception) ;

CONCEPTION MECANIQUE 1

- recherche : lister les nouveaux matériaux substitués.

Avantage : permet de purger et de confronter des idées préconçues sur des matériaux possibles.

Inconvénient : univers restreint d'exploration.

- **Sélection par inspiration** : dans ce cas, les méthodes scientifiques ou systématiques ne sont pas de grande utilité. Parfois l'inspiration vient par accident, lors d'une rencontre, dans un lieu déterminé ou lors d'une exploration de concepts de manière aléatoire. Il s'agit de l'exploration des espaces de conception autour des propriétés d'un matériau référent répondant au mieux aux exigences de conception.

Étape 4 : Évaluer les procédés possibles

Tout choix de matériau est associé à un procédé. Le produit doit être usiné, assemblé, et/ou fini. L'ensemble des familles de procédés est tel que mentionné dans l'étape 1. Pour l'ensemble des matériaux sélectionnés, les implications des procédés possibles sont différentes en termes techniques, environnementaux et économiques.

Pour la sélection d'un procédé, plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour chaque procédé potentiel :

- **la quantité estimée du produit** : de cette donnée, qui vient des études du marché potentiel, vont dépendre les montants qui pourraient être alloués pour des investissements, mais aussi les économies d'échelle potentielles ;
- **les attributs techniques apportés** : chaque procédé comporte des avantages certains pour le produit en termes de qualité, tolérance, flexibilité dans la géométrie etc. Il s'agit donc de formaliser les apports et avantages de chaque procédé potentiel
- **le coût estimé en fonction de la quantité estimée de production** : ce coût peut être inféré par analogie à partir de la littérature existante pour des produits similaires, ou estimé par des données historiques internes ou encore modélisé en prenant en compte ses différentes composantes : le coût de matières premières, le coût d'investissements, le coût des outils dédiés et les frais de gestion.

Étape 5 : Prioriser et tirer des conclusions

Une fois les caractéristiques des matériaux et leurs procédés associés évaluées, la recherche du meilleur compromis entre les divers espaces s'avère nécessaire. Pour ce faire, il faut prioriser les attributs du produit, sélectionner les plus importants et les évaluer (y compris les attributs esthétiques ou de perception) afin de pouvoir comparer les divers produits et procédés.

IV.3.2. LES PRINCIPES DE CHOIX

Le choix d'un matériau s'inscrit dans la démarche d'écoconception. Il est donc nécessaire d'établir un inventaire des fonctions du cahier des charges, puis le choix se fera suivant une démarche itérative.

IV.3.2. 1. Étude du cahier des charges

L'étude du cahier des charges permet de traduire les exigences et de déterminer les propriétés des matériaux et les objectifs de conception.

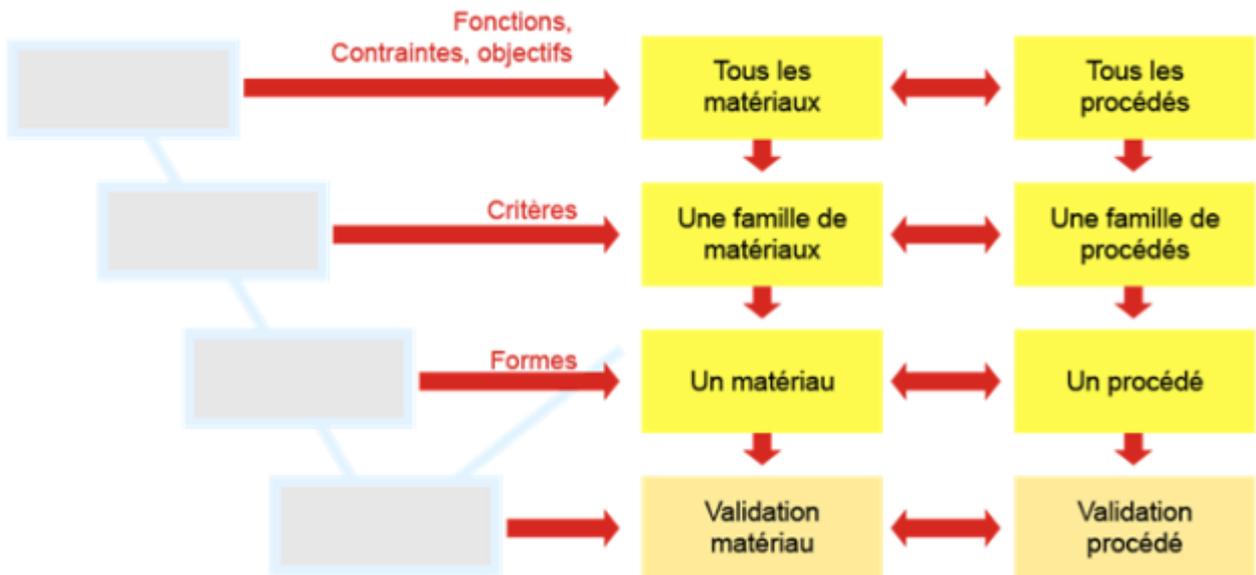
CONCEPTION MECANIQUE 1

Tous ces critères permettront d'effectuer un choix optimisé du couple matériau-procédé en fonction des performances souhaitées.

Les limites de ces propriétés sont incontournables et doivent être respectées. Les objectifs permettent d'optimiser la conception et ajoutent de la valeur au produit en minimisant ou maximisant un ou plusieurs critères.

Exemples de propriétés	Exemples d'objectifs
Résistance à la traction	Minimiser les impacts environnementaux
Résistivité électrique	Minimiser le volume
Masse	Maximiser la durabilité

Tous ces éléments peuvent être spécifiés dans le cahier des charges de façon explicite pour faciliter la recherche de matériaux. Si ce n'est pas le cas, l'étape de conception préliminaire permettra d'identifier, de qualifier éventuellement et quantifier les critères nécessaires.



Éléments du cahier des charges

IV.3.2. 2. Répartition des critères

Il est nécessaire également d'identifier les critères de choix du matériau et du procédé.

Par exemple :

- sur le matériau : caractéristiques mécaniques, esthétiques, thermiques, électriques, économiques, environnementales, physiques.
- sur le procédé : volume, masse, géométrie, taille de la série, caractéristiques économiques et environnementales.

Tous les composants d'un produit ont une ou plusieurs fonctions: supporter une charge, une pression, transmettre la chaleur, etc. Dans la conception du composant, le concepteur a

CONCEPTION MECANIQUE 1

un objectif: rendre aussi pas cher que possible. Ceci doit être réalisé sous réserve de contraintes: que certaines dimensions sont fixes, que le composant doit supporter la charge ou pression donné sans échec, elle ne peut fonctionner que dans une certaine plage de température, et dans un environnement donné, et bien d'autres. Les fonctions, l'objectif et les contraintes définissent les limites conditions pour la sélection d'un matériau et - dans le cas d'éléments porteurs – de la forme de sa section.

Fonction	"Qu'est-ce que le composant doit faire?"
Objectif	"Que faut-il agrandir ou réduire?"
Contraints	"Quelles sont les conditions non négociables qui doivent être remplies?" "Quelles sont les conditions négociables mais souhaitables ...?"

IV.3.3. LES METHODES DE CHOIX

Les méthodes de choix sont basées sur l'utilisation de bases de données qui associent les matériaux et les procédés. Pour réaliser le choix de ces milliers de références, on utilise les critères définis en conception ou identifiés dans le cahier des charges. Plusieurs méthodes sont alors possibles suivant les informations dont on dispose et le degré d'optimisation souhaitée :

- sélection basée sur les propriétés : possibilité de choix direct, de poser des limites ou d'effectuer des comparaisons.
- sélection par comparaison des indices de performance.
- sélection multi-contrainte et multi-objectif.

Ces méthodes peuvent être utilisées simultanément dans un même choix de matériau.

IV.3.3.1. Sélection à partir des diagrammes de propriétés

Cette méthode consiste à rechercher les matériaux répondant aux critères choisis suivant trois types de sélection :

- par choix direct : on sélectionne par exemple uniquement les matériaux usinables ou uniquement les matériaux ferreux.
- En posant des limites : on sélectionne les matériaux dont une propriété, par exemple le dureté, est supérieure à une valeur spécifiée.
- Par comparaison : on génère un diagramme d'une propriété en fonction d'une autre. On peut ensuite sélectionner graphiquement les meilleurs compromis.

CONCEPTION MECANIQUE 1

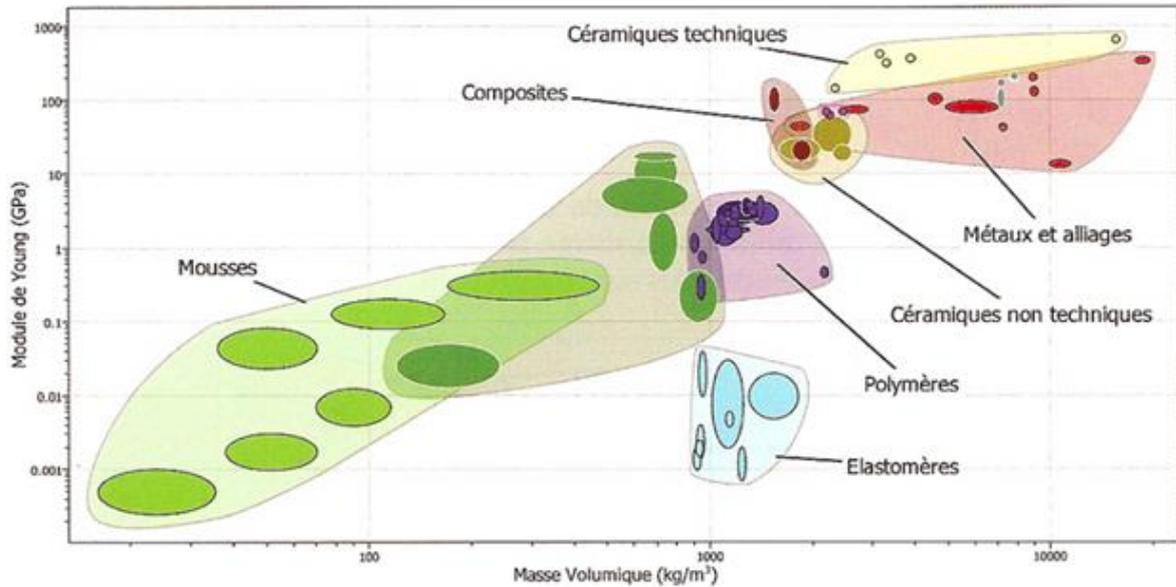


Diagramme des propriétés

IV.3.3.2. Sélection avec indice de performance

Pour optimiser le choix du matériau, il est nécessaire de déterminer les performances recherchées, qui se traduiront par une combinaison des propriétés du matériau.

Par exemple, il est possible d'exprimer la performance d'un matériau par le rapport entre son prix et sa masse (Prix/M).

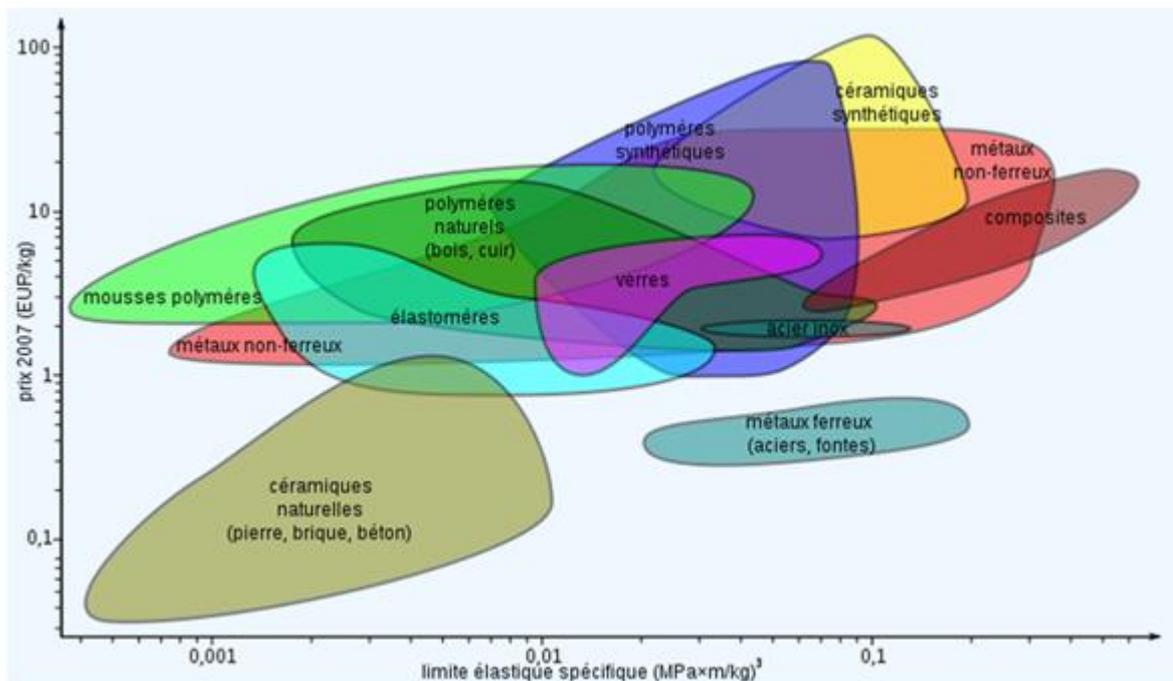


Diagramme du prix en fonction de la limite élastique

CONCEPTION MECANIQUE 1

Pour établir un indice de performance, il est nécessaire de définir la fonction du composant, l'objectif et les contraintes de conception. Ces dernières peuvent se traduire par les propriétés des matériaux selon les sollicitations du composant. L'indice de performance sera une relation fonction de ces paramètres.

Cet indice de performance apparaît sur les diagrammes de propriétés sous la forme d'une droite.

Les matériaux situés sur cette droite ont la même performance, les matériaux au dessus sont les meilleurs et ceux situés en dessous sont les moins bons.

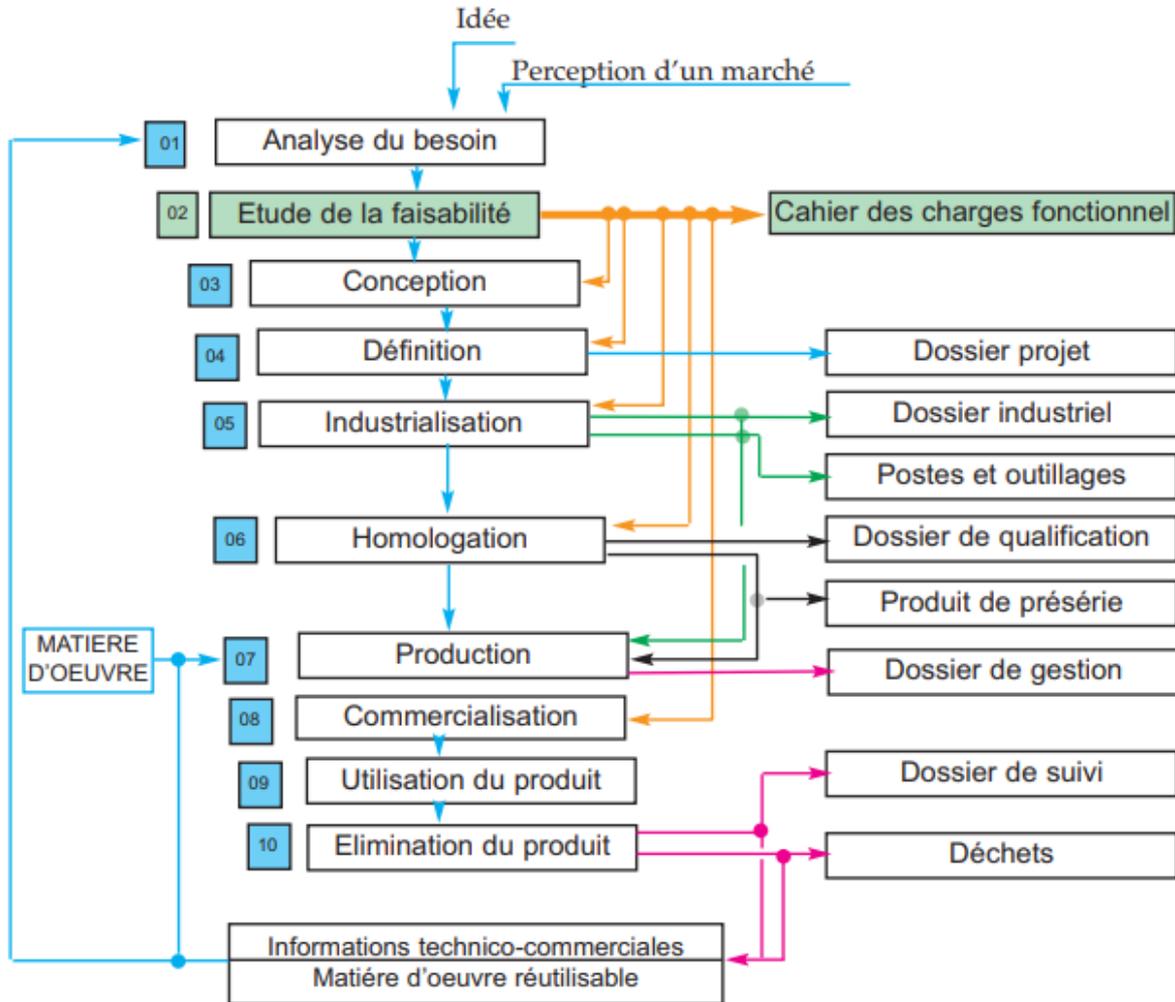
IV.3.3.3. Sélection multi-contrainte et multi-objectif

En effet, généralement pour un même objectif de conception (minimiser les coûts, la masse, les impacts environnementaux), il est nécessaire de considérer plusieurs contraintes. Ce type d'étude, multi contrainte, peut être mené en effectuant autant d'études qu'il y a de contraintes et en conservant les matériaux communs.

Il est possible également d'avoir à traiter plusieurs objectifs de conception simultanément.

Chapitre V ANALYSE DE LA CONCEPTION DU PRODUIT

V.1. CYCLE DE VIE D'UN PRODUIT



V.2. LES NOMENCLATURES DU BUREAU D'ETUDES

On appelle nomenclature l'inventaire exhaustif et méthodique des éléments d'un ensemble. Dans une entreprise, tous les services utilisent des nomenclatures : le bureau d'étude établit des nomenclatures de définition, les méthodes des nomenclatures de gammes, le service commercial des nomenclatures d'articles.

Le service de gestion de production crée des nomenclatures de fabrication et d'assemblage qui permettent de transformer les données commerciales en données de production.

Toute nomenclature comprend deux parties :

1. la liste des articles constitutifs avec leurs caractéristiques.
2. les liens qui unissent deux articles. Chaque lien est caractérisé par un coefficient de montage, c'est-à-dire, l'indication du nombre d'unités du composant nécessaire pour la création d'une unité du composé.

CONCEPTION MECANIQUE 1

Les nomenclatures d'assemblage peuvent se présenter sous trois formes :

V.2.1. LES NOMENCLATURES MATRICIELLES

C'est un tableau à deux entrées, par exemple, une colonne par composant et une ligne par composé. Cette représentation est particulièrement pratique lorsque les produits fabriqués comportent un grand nombre de composants communs à de nombreux composés. Ce type de nomenclature se prête bien au calcul matriciel.

Exemple de nomenclature matricielle :

		Composants					
		a	b	c	d	e	f
C o m p o s é s	A		1		1	2	1
	B	1	1	1	3	1	2
	C	2	1	1	1	1	
	D	1		2	1	1	1
	E		1	1	1		2

La présence du coefficient de montage dans une case indique qu'un lien de nomenclature existe entre le composé de la ligne et le composant de la colonne de la case. Dans la nomenclature ci-dessus, le coefficient de montage 3 concerne le composé B et le composant d : il faut donc trois composants d pour faire un composé B.

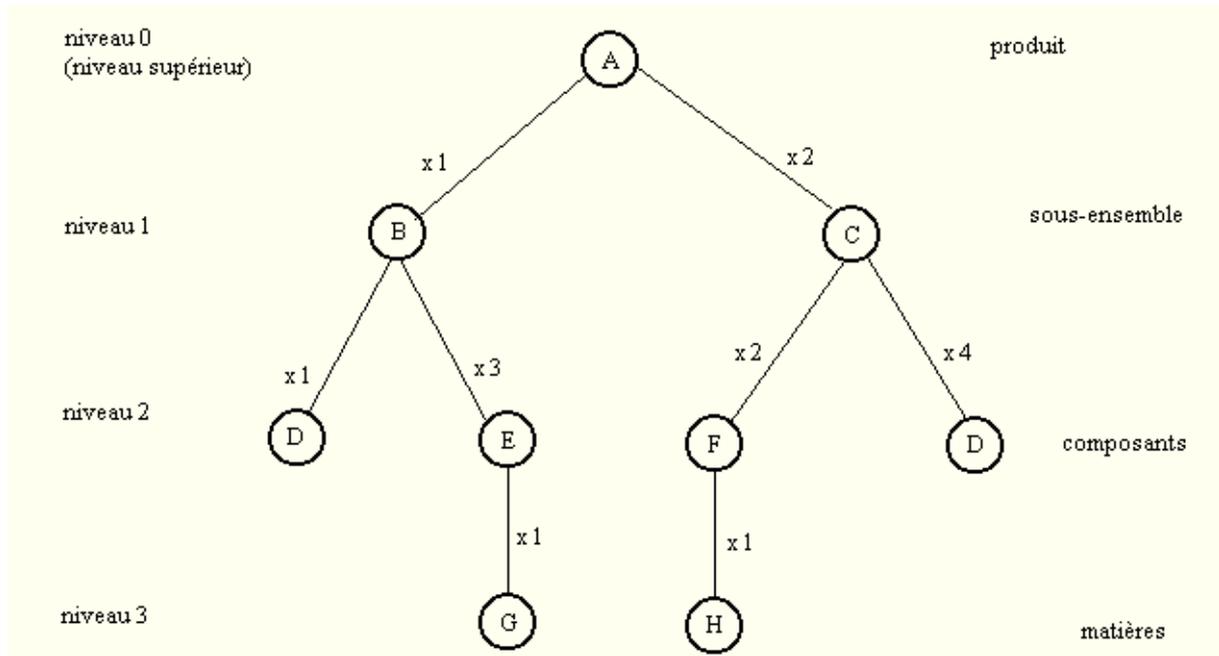
V2.2. LES NOMENCLATURES ARBORESCENTES

Elles sont dites cascades ou multi niveaux.

Chaque produit fabriqué y est décrit selon le processus de réalisation et d'assemblage en atelier. Ces nomenclatures définissent, sous une forme hiérarchisée, les composants de chaque composé. Cette forme de nomenclature est la plus répandue car elle est visuelle et se prête bien à une représentation sous forme de graphe compréhensible par tous et sur lequel le paramètre temps peut figurer.

Exemple de nomenclature arborescente :

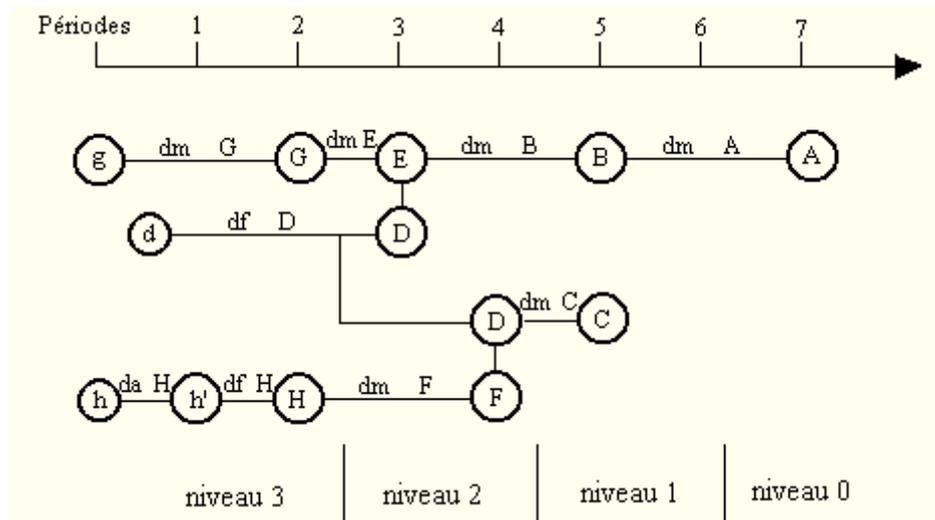
CONCEPTION MECANIQUE 1



L'arborescence représente les différents niveaux permettant d'obtenir le produit fini (niveau 0 = niveau supérieur) à partir des matières (niveau inférieur).

Les indications x_i correspondent aux coefficients de montage, c'est-à-dire, au nombre d'articles de niveau inférieur qui entre dans la composition d'un article de niveau supérieur.

Exemple de nomenclature arborescente faisant intervenir le paramètre temps (rateau de fabrication) : représentation de la nomenclature précédente :



Légende :

g, d, h, ... : matières

G, D, H, ... : composants

da i : délai d'approvisionnement

df i : délai de fabrication

dm i : délai de montage

CONCEPTION MECANIQUE 1

Noter que l'article D n'est représenté qu'une fois alors qu'il intervient dans deux sous-ensembles.

V.2.3. LES NOMENCLATURES MODULAIRES

Elles sont dites par variantes :

Elles concernent les sous-ensembles communs à plusieurs produits. Lorsqu'une famille de produits est constituée d'un grand nombre de versions réalisées à partir de sous-ensembles standardisés, il est préférable de faire uniquement des nomenclatures pour ces sous-ensembles plutôt qu'une nomenclature générale.

INFORMATISATION DES NOMENCLATURES

La méthode la plus répandue a été mise au point chez IBM et est connue sous le nom de BOMP (Bill Of Material Processor) en français : processeur de nomenclature. Elle consiste à créer deux fichiers l'un pour les articles, l'autre pour les liens et, grâce à des pointeurs, établir les renvois d'un fichier à l'autre. Pour le fichier "articles" la saisie portera principalement sur :

- la désignation,
- le code de l'article.

Pour le fichier "liens", il faudra au moins les éléments suivants :

- le code du composé
- le code du composant
- le coefficient de montage
- les adresses informatiques des renvois.

Cette méthode présente deux avantages :

- 1°) Chaque donnée est mémorisée d'une façon unique (une seule saisie)
- 2°) Les données peuvent être visualisées de multiples façons, en particulier

- présentation descendante : indique la décomposition d'un produit,
- présentation ascendante : indique les utilisations d'un composant,
- présentation cumulée : indique la décomposition ou les cas d'emploi d'un article, tous niveaux confondus.

Sans nomenclature fiable, il ne peut y avoir de calcul des besoins précis.

CONCEPTION MECANIQUE 1

V.3. L'Analyse Fonctionnelle

L'**analyse fonctionnelle** est une démarche qui « *consiste à rechercher et à caractériser les fonctions offertes par un produit pour satisfaire les besoins de son utilisateur.* »

La démarche est généralement conduite en mode projet et peut être utilisée pour **créer** (conception) ou **améliorer** (reconception) un produit.

- L'objet visé par la démarche peut être un objet, un matériel, un processus matériel ou vivant, une organisation, un logiciel, etc.
- Les besoins sont de toute nature et sont exprimés de façon individuelle ou collective, objective ou subjective, avec des degrés de justification disparates.
- La ou les fonctions étudiées sont également diverses : fonctions de service, fonctions d'évaluation, fonctions de traitement
- Le cadre de l'étude doit être aussi pris en compte : contraintes ou variables déduites de l'environnement, la réglementation, des usages, etc.

L'**AF** permet d'éviter certains pièges classiques de la conception (aveuglement, manque d'objectivité, mauvaise gestion des priorités). Dans les faits, les premières étapes de l'**AF** sont générales et concernent tous les acteurs d'un même projet. C'est seulement dans un deuxième temps que l'**AF** devient technique, et oriente les concepteurs vers des solutions techniques. L'**AF** rend ainsi possible un dialogue entre tous les intervenants d'un projet (quels que soient leurs domaines de compétence). C'est un gage d'objectivité et de créativité dans la conduite du projet.

V.3. 1. LES METHODES D'ANALYSE FONCTIONNELLE

Quelques dates :

- Les premières méthodes assimilables à de l'**AF** ont été mises en pratique aux Etats Unis peu après la Seconde Guerre mondiale, en 1947 (chez General Electric).
- La méthode **APTE** est développée dans les années 60.
- L'outil **SADT** est développé en 1977 et se généralise dans les années 1980.

La méthode **APTE** : **AP**plication aux **T**echniques d'**E**ntreprise (nom déposé)

La méthode **APTE** est une méthode « universelle » d'aide à la gestion de projets, enseignée et/ou dispensée de façon très officielle par l'**APTE**, cabinet conseil en management, spécialisé en Analyse de la Valeur.

La méthode **APTE** est une interprétation française de méthodes américaines d'analyse de la valeur (source : site officiel <http://www.methode-apte.com/>).

L'Analyse Fonctionnelle telle qu'elle est pratiquée généralement, et notamment au sein de l'Education Nationale, s'apparente fortement à la méthode **APTE**...

CONCEPTION MECANIQUE 1

En conséquence, l'utilisation de la terminologie APTE peut parfois poser des problèmes de droits (!) : « **Bête à cornes** » et « **Diagramme pieuvre** » sont des outils déposés, eux aussi. Ces outils sont néanmoins pratiques et donc des désignations alternatives seront utilisées dans ce document.

V.3. 2. Les étapes de l'A.F.

Lors d'une démarche d'analyse fonctionnelle, les concepteurs (au sens large) du produit doivent suivre les étapes suivantes, présentées dans l'ordre chronologique.

Outils	Résultat attendu
Analyse du Besoin (A.B.)	Cahier des charges du besoin (note de cadrage).
Analyse Fonctionnelle du Besoin (A.F.B.)	Cahier des charges fonctionnel
Analyse Fonctionnelle Technique (A.F.T.)	Cahier des charges technique (spécification technique).

- ✚ L'Analyse du Besoin permet d'exprimer le besoin.
- ✚ L'Analyse Fonctionnelle du Besoin permet d'identifier les relations du produit avec son contexte d'utilisation, afin de dégager des Fonctions de Service, aptes à satisfaire le besoin.
- ✚ L'Analyse Fonctionnelle Technique permet de déterminer les Fonctions Techniques nécessaires aux fonctions de service. Ces fonctions techniques guident les concepteurs dans la recherche des solutions technologiques.

Remarques :

L'Analyse Fonctionnelle du Besoin porte sur les fonctions du produit à concevoir. Elle ne préjuge pas ni des fonctions techniques induites ni des solutions constructives capables qui seront recherchées au stade de l'Analyse Fonctionnelle Technique.

La démarche d'Analyse Fonctionnelle (AB, AFB et AFT) est collective, et doit réunir des personnes représentant tous les services et tous les métiers concernés. Cela permet à la fois plus de créativité, et d'exhaustivité dans la démarche. La réflexion doit rester la plus ouverte possible, tout au long de la démarche d'analyse.

La démarche d'Analyse Fonctionnelle avec sa rigueur n'a aucunement vocation à mener les concepteurs jusqu'à une solution unique, bien au contraire elle privilégie la créativité.

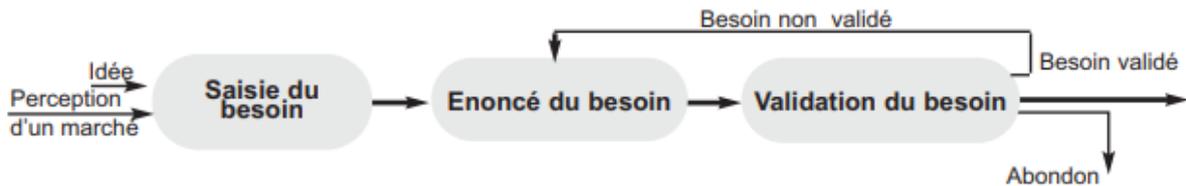
CONCEPTION MECANIQUE 1

V.3. 3. L'ANALYSE DU BESOIN

Définition AFNOR :

« Un besoin est un désir (ou une nécessité) éprouvé par l'utilisateur d'un système »

L'analyse du besoin se fait en trois étapes :



V.3. 3.1. Classification du besoin

On recense deux formes principales de besoin : exprimé, latent (pouvant être détecté ou suscité et enfin exprimé).

Les principaux besoins de l'homme sont : se nourrir, se protéger, se reposer, se soigner, communiquer, se déplacer, se divertir, se cultiver, ... Chacun de ces besoins primaires peuvent se décomposer en autres besoins. Par exemple « se protéger » peut s'exprimer par « se loger », « se vêtir », « respecter l'environnement », ...

Notons que les besoins de l'homme évoluent avec le temps.

V.3. 3.2. La verbalisation du besoin

Pour verbaliser le besoin, il faut se poser trois questions (... et y répondre !)

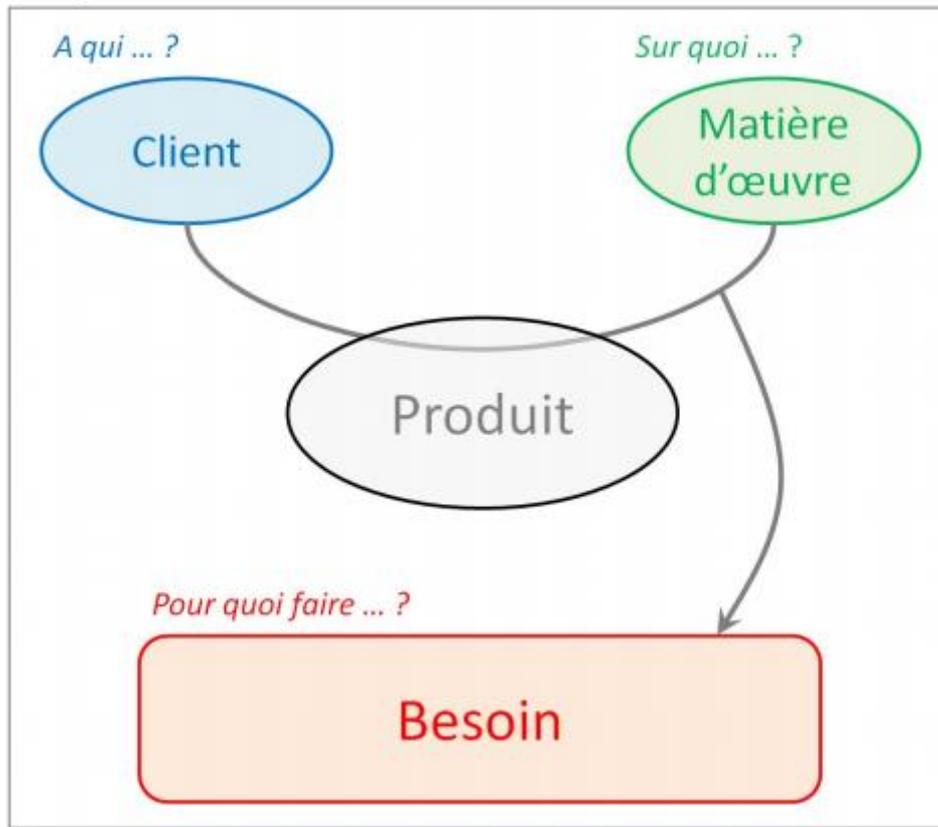
Questions	Réponses (à détailler)
« A qui le produit rend-il service ? »	Au client (préciser)
« Sur quoi le produit agit-il ? »	Sur la matière d'œuvre (préciser)
« Dans quel but ? » (pour_quoi faire ?)	Pour satisfaire le besoin (préciser)

V.3. 3.3. Le schéma du besoin

Traditionnellement, on représente le besoin grâce à un outil graphique : le schéma du besoin (la « Bête à cornes »© de la méthode APTE) :

CONCEPTION MECANIQUE 1

Fig.3 : Le schéma du besoin



V.3. 3.4. L'énoncé du besoin :

Les réponses à ces trois questions aboutissent à un énoncé du besoin, qui doit être rédigé de la façon suivante :

« Le produit rend service au client en agissant sur la matière d'œuvre pour satisfaire le besoin. »

Exemple 1:

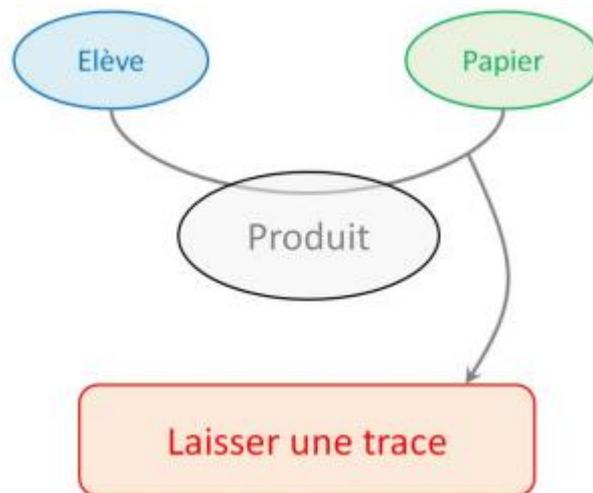
Besoin exprimé : « On souhaite permettre à un élève de laisser une trace sur un support papier »

Les trois questions :

Questions	Réponses
« A qui le produit rend-il service ? »	A l'élève
« Sur quoi le produit agit-il ? »	Sur du papier
« Dans quel but ? » (pour_quoi faire ?)	Pour y laisser une trace

CONCEPTION MECANIQUE 1

Le schéma du besoin :



Le besoin énoncé :

« Le **produit** rend service à l'**élève** en lui permettant de **laisser une trace** sur du **papier** ».

Exemple 2: Le Segway



CONCEPTION MECANIQUE 1

V.3. 4. Analyse fonctionnelle du besoin « Diagramme pieuvre »

L'analyse fonctionnelle du besoin, permet de caractériser les **fonctions de service attendues** et générées par l'**usage** du produit

On a vu que le besoin exprimé par le client est satisfait si lors de son utilisation le produit répond à ses attentes. Il s'agit donc d'étudier le **produit en situation d'utilisation**, dans un milieu environnant.

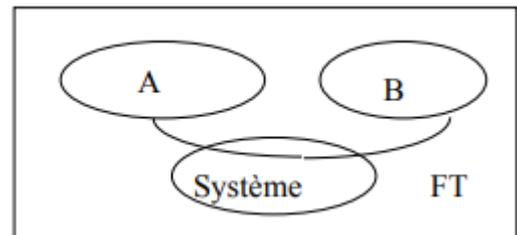
Il faut en particulier imaginer les interactions du produit avec son environnement. On considère le produit comme "générateur de services", d'où le nom de fonctions de service entre le produit et les éléments du milieu extérieur.

Conséquence : le produit (toujours au stade de concept et non de solution) est au cœur de son environnement. Cet **environnement** est constitué de tous les éléments du milieu extérieur, en relation avec le produit. **La notion de frontière est primordiale.**

V.3. 4.1 Formuler une fonction en AF - Besoin

Deux types de fonctions :

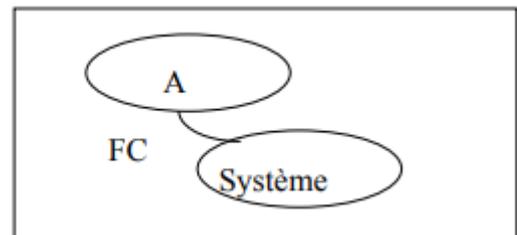
FONCTIONS DE TRANSFERT (FT) ou fonction principale (FP) →



“ Les raisons pour lesquelles le produit a été créé “

(Liaison entre deux éléments du milieu d'environnement créée par le système)

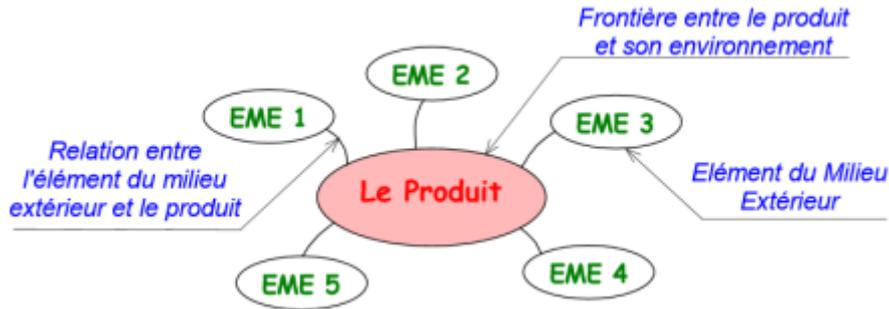
FONCTIONS DE CONTRAINTE (FC) →



“ Le produit n'a pas été créé pour cela, mais le fait d'exister lui impose d'assurer certaines fonctions“

(Contraintes imposées au système par un élément du milieu d'environnement)

CONCEPTION MECANIQUE 1



V.3. 4.2. Graphe des fonctions de service (ou des interacteurs)

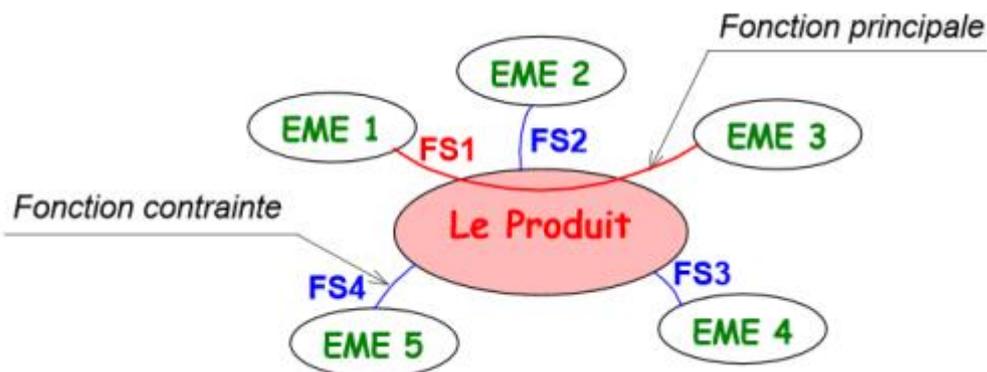
La définition des relations entre le produit et les éléments du milieu extérieur est généralement une "histoire" de spécialistes, qui "racontent" l'utilisation du produit, pour envisager toutes les interactions avec l'extérieur. On peut alors construire le graphe des interacteurs.

- ✚ Les Eléments du Milieu Extérieur (EME) peuvent être de différente nature :
 - Physique (relatif à des matériaux, au milieu ambiant...)
 - Humain (relatif à l'ergonomie, au poids, à la maintenance...)
 - Technique (relatif à la source d'énergie...)

Ils sont nommés afin de pouvoir être identifiés facilement

- ✚ Les relations sont les fonctions de service du produit.
 - Relations entre deux EME par l'intermédiaire du produit : ce sont les fonctions principales ou fonctions d'usage. Elles satisfont le besoin, elles assurent la prestation.
 - Relation entre un EME et le produit, ce sont des fonctions contraintes ou fonctions d'adaptation. Elles caractérisent l'adaptation et l'action du produit à l'environnement ou les contraintes de l'environnement sur le produit.

Les fonctions de services sont numérotées.



CONCEPTION MECANIQUE 1

Remarque : bien que les relations ne soient pas orientées, on peut distinguer

- les relations qui indiquent que le produit modifie l'état de l'EME ;
- les relations qui indiquent que le produit est modifié par l'EME.

Ainsi par exemple :

FP : le produit permet à l'EME 1 de modifier l'état de l'EME 3 ;

FC1 : le produit modifie l'état de l'EME 2 ;

FC2 (et FC3) : le produit est modifié par l'EME 4 (et l'EME 5) ;

Exemple : Le Segway

FS1 : Permettre au conducteur de se déplacer aisément sur la route (en ville).

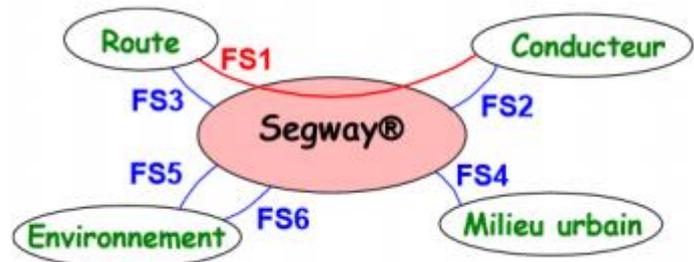
FS2 : Donner au conducteur une sensation de stabilité

FS3 : Rester insensible aux perturbations provenant de la route

FS4 : Rester manœuvrable dans la circulation

FS5 : Etre peu encombrant

FS6 : Contribuer au respect de l'environnement



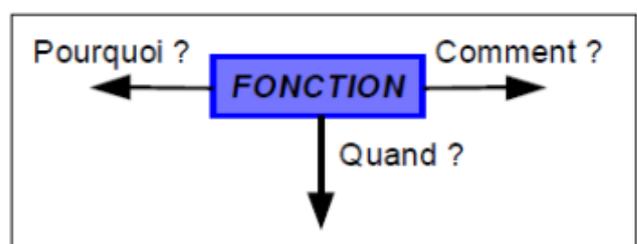
V.3. 5. Analyse Fonctionnelle Technique (A.F.T.)

L'Analyse Fonctionnelle Technique (A.F.T.) permet de faire la transition entre l'Analyse Fonctionnelle du Besoin (qui reste étrangère aux préoccupations d'ordre technologiques) et la conception détaillée, qui entre de plain pied dans les considérations technologiques.

L'Analyse Fonctionnelle Technique est aussi appelée Analyse Fonctionnelle interne.

La méthode F.A.S.T (acronyme de « Fonctionnal Analysis System Technique »). est un outil graphique qui permet de détailler les fonctions techniques et les solutions associées. Organisé de la gauche vers la droite, partant d'une fonction de service, le diagramme F.A.S.T. recense toutes les fonctions techniques et pour finir il présente les solutions technologiques définies. Il est basé sur une méthode interrogative : pour chaque fonction technique indiquée dans un rectangle on doit pouvoir trouver autour les réponses aux questions définies ci-dessous.

- **Pourquoi** une fonction doit-elle être assurée ?

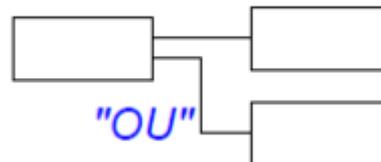
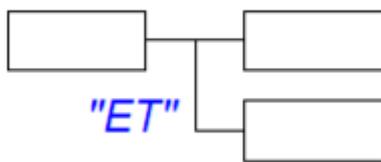


CONCEPTION MECANIQUE 1

- **Comment** cette fonction doit-elle être assurée ?
- **Quand** cette fonction doit-elle être assurée ?

Les règles de syntaxe sont les suivantes :

- Les nombres de lignes et de colonnes ne sont pas fixés, ils dépendent du système.
- La rubrique **Quand** n'est généralement pas spécifiée, pour une description fonctionnelle.
- Pour la question "Comment ?" il y a généralement plusieurs éléments de réponse, deux possibilités sont alors prévues :



Exemple : Le Segway (F.A.S.T. partiel)

