

# ANALYSE DES VARIABLES MATERIAUX, PROCÉDES, FORME ET VOLUME

Ce chapitre présente une analyse des principaux éléments (appelés « variables ») nécessaires pour faire des estimations d'impacts environnementaux. Les trois variables pertinentes qui composent le « TRIPLET » (matériaux, procédés, forme) vont être liées à travers la connaissance développée par les bases ReCiPe. Pour évaluer l'impact environnemental du produit, nous estimerons la masse à partir du volume exprimé par les paramètres dimensionnels définissant la forme.

## 3.1. VARIABLE : MATÉRIAUX

La qualité d'un produit est grandement influencée par les matériaux utilisés. En conséquence, le choix des matériaux joue un rôle indispensable dans le processus de conception de produits (Doordan, 2003).

Un premier choix de matériaux s'effectue dans les premières étapes du processus de conception. Le concepteur réalise un processus mental où les exigences de conception se croisent avec ses connaissances.

Le choix des matériaux est traditionnellement fait à partir des exigences techniques comme le prix, la résistance des matériaux, la température, la stabilité, la masse volumique, la dureté, etc. (Bréchet, Bassetti, Landru, & Salvo, 2001). Cependant, pour un développement de produit réussi, les exigences techniques ou physiques ne sont pas suffisantes, des facteurs comme la réputation, la mode, les aspects culturels, etc. doivent également être pris en compte lors de l'élaboration de produits durables (Mangonon, 1999). Du fait de raisons subjectives comme le ressenti pour un certain matériau, le choix des matériaux est souvent difficile (Ljungberg & Edwards, 2003).

Le choix des matériaux peut être fait de différentes manières selon les aspects suivants :

- Les méthodes de fabrication,
- Les fonctions,
- Les exigences structurelles,
- Les formes,
- Le marché ou les demandes des utilisateurs,
- Le prix,
- Les impacts environnementaux,
- La durée de vie,
- ...

La sélection est typiquement un processus itératif avec des objectifs de compromis entre différents éléments (FIGURE 40). Un léger changement dans la conception peut changer la situation afin que le matériau puisse être acceptable et entraîner un coût plus faible de produit.

Un changement de matériau, en général, fait évoluer la conception (Ljungberg & Edwards, 2003), et, dans certains cas, impose des modifications de la forme afin d'améliorer les caractéristiques ou les procédés de fabrication.

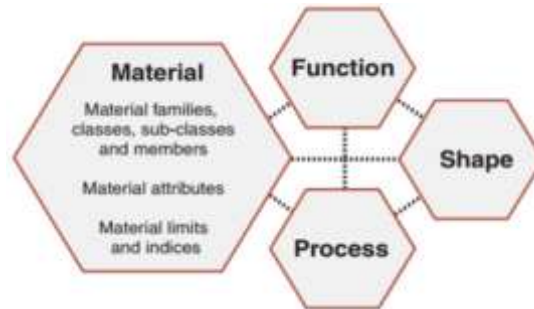


FIGURE 40 PROCÉDURE DE SÉLECTION DU MATÉRIAU (Ashby, 2005)

Une première façon d'améliorer la conception d'un produit ou d'un système est la sélection de matériaux à partir de l'utilisation des bases de données de matériaux. Ces bases, extrêmement complètes, permettent d'incrémenter les performances à partir des simulations de comportement et de réduire les coûts. Le problème, est celui d'avoir correspondance entre le matériau, le procédé et les exigences de conception (Ashby, et al., 2004).

Nous estimons qu'il y a plus de 100.000 types de matériaux commerciaux sur le marché si nous incluons toutes les variantes dans la composition des matériaux, traitements thermiques, etc. (Ljungberg L. Y., 2007).

Lors de la sélection des matériaux, il est aussi important d'anticiper le comportement du matériau après avoir subi une mise en forme et lorsqu'il est sollicité suivant les différentes situations de vie du produit (Sapuan, 2001).

Plusieurs auteurs, ont démontré que la conception intégrée de produits est basée sur une méthodologie systématique de sélection des matériaux (Ashby & Cebon, 1993) (Mangonon, 1999) (Ljungberg & Edwards, 2003). Cette sélection se fait à partir de la connaissance de paramètres pertinents qui implique déjà la définition de formes précises. Ainsi, trouver une manière cohérente afin de relier les matériaux, les procédés et la forme, est un processus complexe qui nécessite un haut niveau de connaissances sur les caractéristiques techniques du matériau mais également concernant toutes les possibilités de procédés de fabrication ainsi que les restrictions et exigences associées.

### 3.1.1. ETAT DE L'ART : VARIABLE MATERIAU

Pour définir une classification des matériaux adaptés aux étapes préliminaires du processus de conception, il faut, en premier lieu, faire un état de l'art des différentes classifications et taxonomies de matériaux.

- Pour *Ljungberg* (2003) les matériaux sont divisés en 6 groupes principaux : Métaux, céramiques, polymères synthétiques, matériaux organiques naturels et inorganiques, naturels et composites (FIGURE 41). Ces groupes couvrent probablement presque le

99% de tous les matériaux utilisés dans la construction mécanique, civil et électrique. Des exceptions sont par exemple, des substances chimiques comme les fluides et les gaz.

**The six typical product material groups, as well as examples and aspects for developing sustainable products**

Material group	Examples on materials	Typical advantages	Typical disadvantages	Classification of the sustainability*
Metals	<ul style="list-style-type: none"> <li>Steel (Fe+O)</li> <li>Aluminium</li> <li>Brass</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Durable and Strong</li> <li>Often plastic formable</li> <li>Often cheap</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>High cost for machining</li> <li>Mostly corrosion sensitive</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Easy recyclable (re-meltable) 2-3</li> </ul>
Ceramics	<ul style="list-style-type: none"> <li>Synthetic materials like:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Porcelain (zry)</li> <li>Mineral glass</li> <li>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC, etc.</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Non-toxic</li> <li>Light</li> <li>Hard and durable</li> <li>Corrosion resistant</li> <li>High temp. resistant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Brittle</li> <li>High cost for machining when burnt</li> <li>Not suitable for load in tension</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Easy to deposit (not toxic)</li> <li>Possible but Expensive to remelt 2-3</li> </ul>
Synthetic polymers	<ul style="list-style-type: none"> <li>Thermoplastics (e.g. PE,PS,PC,PP)</li> <li>Two Component polymers (e.g., epoxy)</li> <li>Rubber (e.g., Isopren)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Non-toxic</li> <li>Light</li> <li>Cheap and easy forming</li> <li>Often easy to recycle (e.g., by re-melting or burning)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sometimes very toxic when burnt</li> <li>Sensitive to high temperatures</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Typically non-renewable</li> <li>Often easy to re-melt or burn 1-3</li> </ul>
Natural organic materials	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wood</li> <li>Cotton</li> <li>Silk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Renewable</li> <li>Light</li> <li>Cheap and easy forming</li> <li>Recyclable by, e.g., burning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Decomposes easily</li> <li>Not durable</li> <li>Toxic when impregnated</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recyclable by, e.g., burning</li> <li>Renewable 2-3</li> </ul>
Natural inorganic materials	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stone</li> <li>Minerals</li> </ul>	See ceramics above!	<ul style="list-style-type: none"> <li>Brittle</li> <li>High cost for machining in tension</li> </ul>	See ceramics above! 3
Composites	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mixed Materials, e.g.:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Fr + glassfibres, Cu + W-fibers,</li> <li>Rubber + carbonfibers,</li> <li>asphalt (oil+stone), Wood Polymer Composites (WPC)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Optimised use of the materials</li> <li>Often very strong and light</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Often expensive to produce</li> <li>Very various properties for various composites</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Typically low sustainability due to separation problems for the mixed materials 1-2</li> </ul>

FIGURE 41 DESCRIPTION DES MATÉRIAUX PAR LJUNGBERG (Ljungberg L. Y., 2007)

Dans le classement de *Ljungberg*, les matériaux sont définis par différentes caractéristiques qu'il classe en avantage/inconvénients comme le coût, les caractéristiques physiques, les possibilités d'industrialisation et les caractéristiques de durabilité comme la toxicité et la recyclabilité.

- *Ashby et al.* (2004) propose une classification qui est illustrée dan la FIGURE 42.

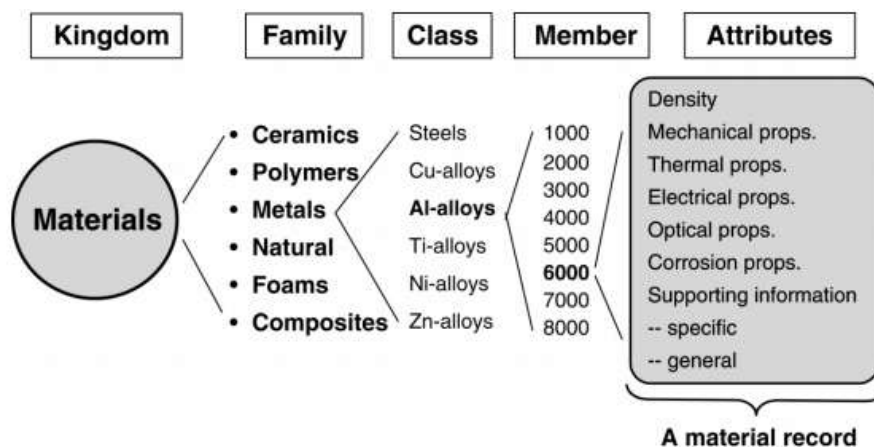


FIGURE 42 CLASSIFICATION DU MATÉRIAUX PAR MIKE ASHBY (Ashby, et al., 2004).

*Ashby* commence à relier le choix des matériaux directement avec les procédés de fabrication par une relation étroite et une co-dépendance entre eux (FIGURE 43). En divisant le monde des matériaux en famille, type, matériau et enfin les attributs du matériau.

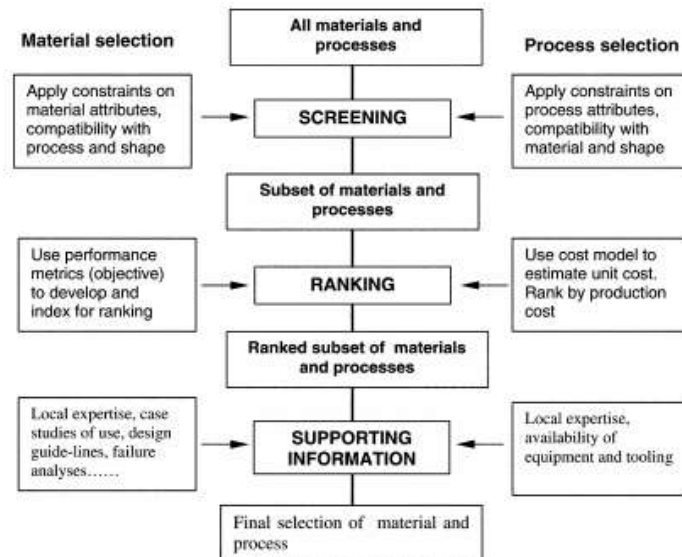


FIGURE 43 ÉTAPES POUR LA SÉLECTION DES MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS (Ashby, et al., 2004).

- *Thompson (2007)* dans son ouvrage "*Manufacturing processes for design professionals*" classe les matériaux en 4 groupes (FIGURE 44) similaires à *Ljungber*. Cependant, les sous-catégories sont différentes: les bioplastiques, fibres naturelles, entre autres.

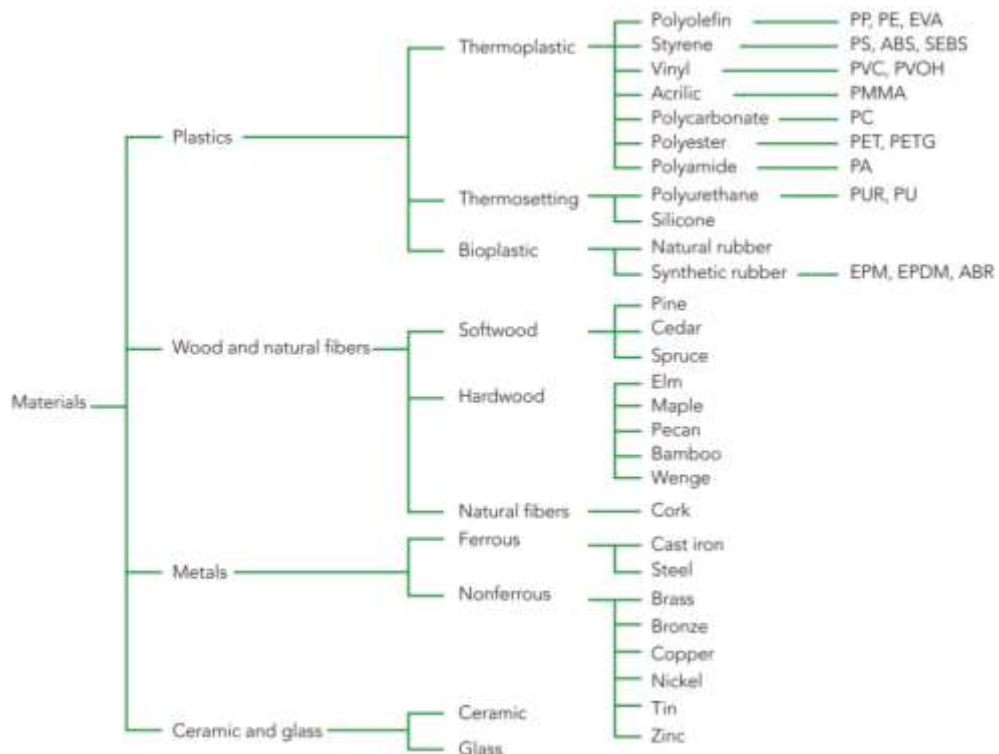


FIGURE 44 CLASSIFICATION DU MATERIAUX PAR THOMPSON (Thompson, 2007)

- Une classification de matériaux, basée sur la classification proposée par *Ashby et al.* (2004) (FIGURE 42), est proposée dans le logiciel CES® Selector pour la sélection des matériaux qui sont classé en quatre grandes familles : Les céramiques et les Verres, les Hybrides, les Métaux, les Polymères et les Elastomères (voir le TABLEAU 5).

Material Universe	Ceramics and glasses	Glasses	Borosilicate glass
			Glass ceramic
			Silica and Soda-lime glass
		Non- Technical ceramics	Cement and concrete
			Fired clays
			Minerals and stone
		Technical ceramics	Alumina, Aluminium nitride
			Silicon, Carbide, Nitride
			Tungsten carbide
	Zirconia, Boron		
	Hybrids	Composites	Metal
			Polymer
		Foams	Ceramic and metallic foam
			Polymer foam, flexible and rigid
		Natural materials	Bamboo, cork
			Hardwood, oak
	Leather		
	Paper and cardboard		
	Metals	Ferrous	Softwood, pine
			Cast iron, ductile
			Cast iron, gray
			High carbon steel
			Low alloy steel
Low carbon steel			
Medium carbon steel			
Stainless steel			
Non-ferrous		Aluminium alloys	
		Copper and alloys	
		Lead and alloys	
		Magnesium and alloys	
		Nickel and alloys	
		Titanium and alloys	
		Zinc and alloys	
	Polymers and elastomers	Elastomers	Butyl rubber
EVA, NR, Neoprene			
Polyisoprene rubber, SI, SBR			
Thermoplastics		ABS, CA, I,PA, PC, PEEK	
		PET, PHA, PHB, PLA, PMMA	
		POM, PP, PS, PTFE, PUR, PVC	
Thermosets		Epoxies	
		Phenolics	
		Polyester	

TABLEAU 5 CLASSIFICATION DE CES® SELECTOR (Ashby, et al., 2004).

***Nous avons constaté peu de différences dans les classifications de matériaux trouvées dans la littérature.***

### 3.1.2. NOTRE CHOIX DE CLASSIFICATION DE MATERIAUX

Pour notre approche, nous prenons, comme point de départ, la classification proposée par *Ashby et al.* (2004), qui est la base de la classification utilisée dans le logiciel CES® Selector. La FIGURE 45 présente la classification adoptée dans le cadre de nos travaux de recherche. Trois grandes familles se dégagent : les métaux, les polymères et les céramiques.

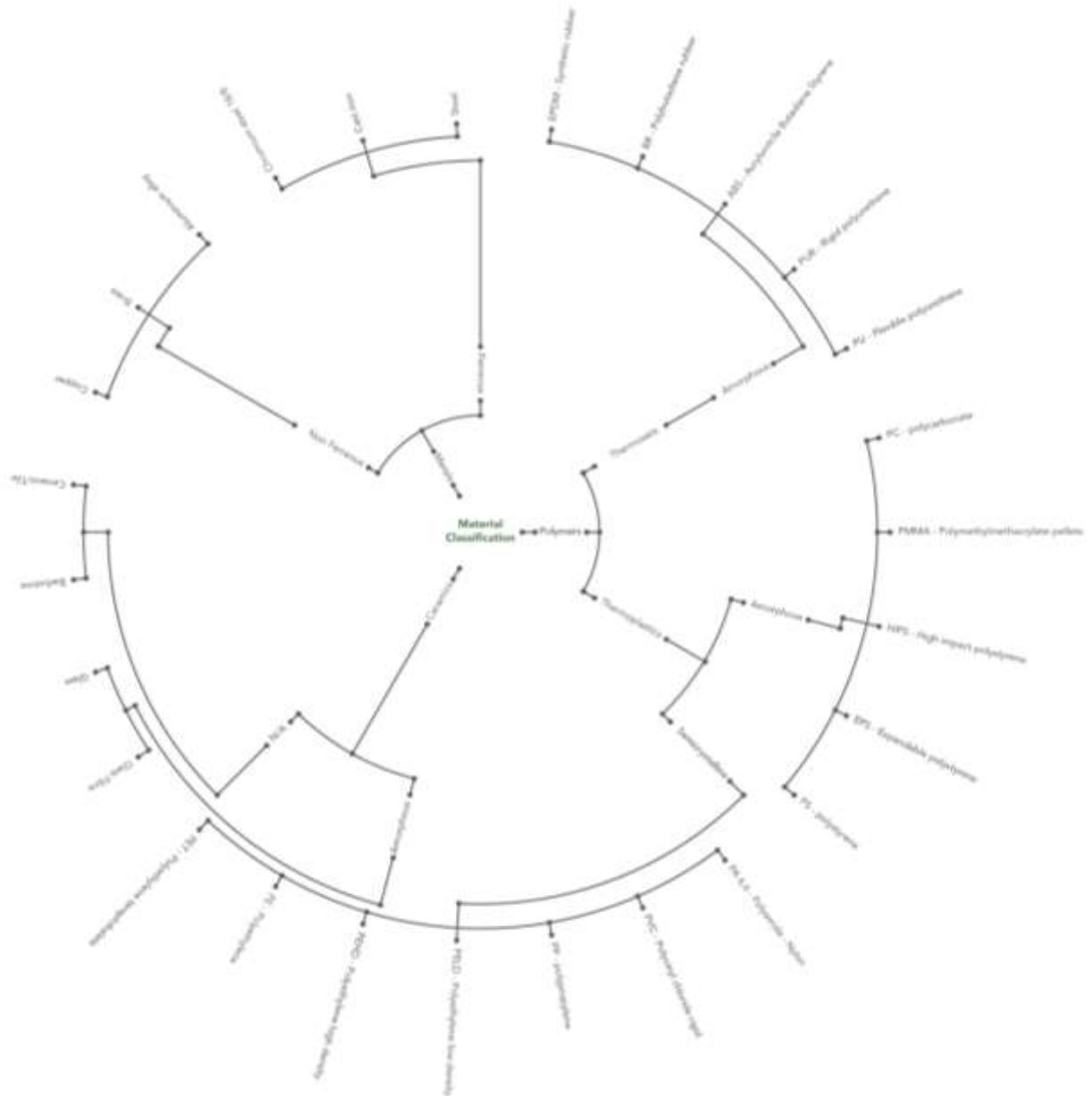


FIGURE 45 CLASSIFICATION DE MATERIAUX DEFINIE

Notre choix est pour le moment filtré par la disponibilité de l'indicateur environnemental pour chaque matériau. Ces indicateurs sont pris de la base de données ECOINVENT avec la méthode calcul de ReCiPe.

De façon équivalente, nous devons travailler aussi avec les valeurs d'impacts sur l'environnement des procédés de fabrication associés à ces matériaux.

### 3.2. VARIABLE : PROCEDE DE FABRICATION

Les contraintes des procédés de fabrication sont, généralement, un point de départ pour les concepteurs, non seulement parce qu'ils peuvent imposer des restrictions de forme, mais aussi l'utilisation de certains matériaux.

3.2.1. ETAT DE L'ART : VARIABLE PROCEDE

- Dans les travaux d'*Ashby et al.* (2004), les procédés de fabrication sont classés de façon similaire à la classification des matériaux. Les familles de procédés sont divisées en classes, procédé particulier et attributs. Les attributs participent à la caractérisation des performances soit : section minimale, tolérances, rugosité, etc. (FIGURE 46).

Cette classification est intégrale car elle comprend les procédés, les procédés d'interaction et les procédés de finition et de traitement.

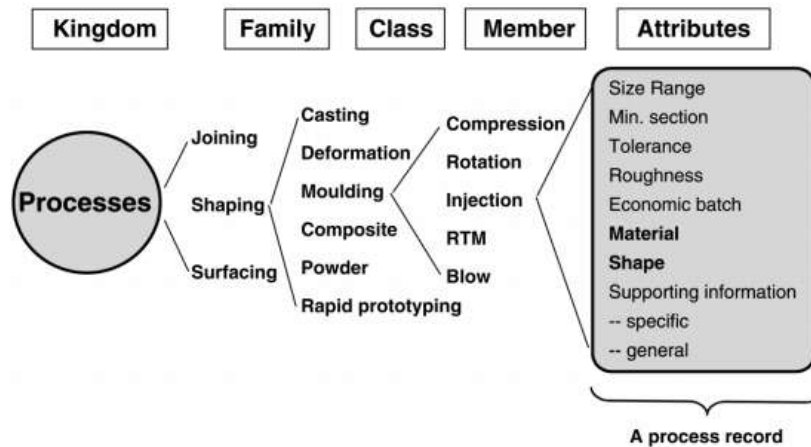


FIGURE 46 CLASSIFICATION DU PROCEDE - ASHBY (Ashby, et al., 2004).

*Ashby* a été l'un des premiers auteurs à définir et utiliser des relations entre des variables de description d'une manière directe, en définissant une série d'étapes dans un processus de sélection approprié (FIGURE 47). Les procédés peuvent être associés donc aux différents matériaux.

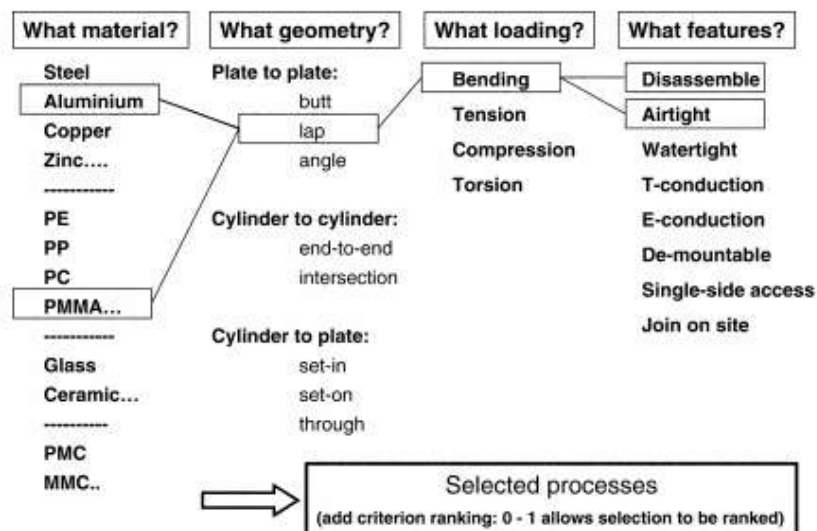


FIGURE 47 SELECTION DE PROCEDE (Ashby & Johnson, 2002)

- *Eraso Guerrero* (2008) classe les procédés en deux grandes catégories et chaque catégorie comprend des sous-catégories, comme c'est illustré dans la FIGURE 48. Les procédés sont répartis en deux groupes : par enlèvement de matière et par

déformation de matière. Un groupe supplémentaire regroupe les procédés de finition, traitement thermique et traitement de surface.

Nous pouvons noter qu'il manque des procédés tel que le pliage et que le procédé d'interaction « soudage » est défini comme un procédé de fabrication à part entière.

1 <sup>st</sup> Class	2 <sup>nd</sup> Class	Process
Shaping by Material Removal	Machined	Turning
		Drilling
		Milling
		Brushing
		Sawing
		Broaching
		Gearing
		Mortising
Forced Forming	Mechanical Plastic Deformation	Deep Drawing
		Sheet Forming
		Extrusion
		Wire Drawing
	Powder Metallurgy	Special alloys
		Casting
	Thermoforming	Welding
		Extrusion
	Synthetic Materials	Blowing
Complementary	Hardness	Heat Treatment
	Finishing	Surfaces
	Assemblies	armed

FIGURE 48 CLASSIFICATION DU PROCEDE PAR ERASO (Eraso Guerrero, 2008)

- GRANTTA DESIGN (2014) reprend la classification d'*Ashby et. al.* (2004). Les éléments de liaison sont définis soit par composants d'interaction soit par liaison directe. Cette classification définit trois catégories : les procédés d'assemblage, les procédés pour donner la forme et les procédés de finition de surface (voir la FIGURE 49).



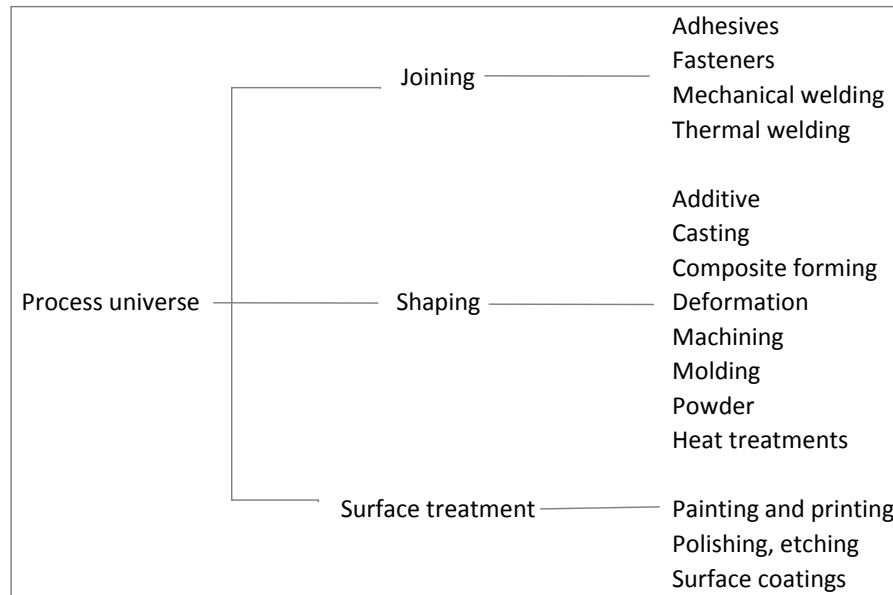


FIGURE 49 CLASSIFICATION PAR GRANTTA DESIGN (Granta Design, 2014)

***Les classifications de procédés analysées ne sont pas élaborées dans une vision d'utilisation par un concepteur.***

### 3.2.2. CHOIX ET DEFINITION D'UNE CLASSIFICATION DE PROCEDES

La classification d'*Ashby et. al.* (2004) permet de choisir un procédé de fabrication puis des procédés d'interaction et de finition. Nous avons pris cette classification comme point de départ pour construire notre classification et nous allons l'adapter pour une utilisation en conception.

Pour réaliser une pièce, nous avons deux alternatives :

- soit la pièce est réalisée directement par un procédé de réalisation de forme,
- soit la pièce est réalisée en plusieurs étapes, une réalisation de forme pour obtenir une pièce brute et ensuite des procédés d'enlèvement de matière.

Nous proposons, donc, de découper les procédés de fabrication en trois classes:

- Procédés de réalisation de formes
- Procédés par enlèvement de matière
- Procédés d'interaction.

Nous pourrions en ajouter un quatrième procédé par addition de matière (fabrication additive) mais pour le moment il n'existe pas encore une caractérisation environnementale pour ce procédé dans le cadre de la méthode ReCiPe.

La classification proposée est illustrée dans la FIGURE 50 . Elle est le résultat d'une analyse des procédés de fabrication, pour lesquelles il existe des informations disponibles sur leurs impacts environnementaux.

Dans la classification définie, il manque des procédés comme le sciage et le découpage. Ces procédés ne sont pas dans les nomenclatures d'ECOINVENT. Pour un concepteur, ces procédés sont indispensables car, associés à des procédés d'interaction, ils permettent de réaliser des « bruts » en diminuant les pertes par enlèvement de matière.



FIGURE 50 CLASSIFICATION DES PROCÉDES DEFINIS AVEC ECO-INDICATEURS RECIPE

Afin de pouvoir imaginer ces pièces reconstituées<sup>9</sup>, il est nécessaire de constituer une nouvelle classe de procédés, les procédés d’interaction. Ces procédés vont comporter 3 niveaux : les procédés par composants d’interaction (boulons, rivets, etc.), les procédés d’interaction par éléments externes (colle, brasage, soudage avec métal d’apport, etc.) et les procédés par interaction directe (clinchage, soudage par friction, soudage sans métal d’apport, etc.). La FIGURE 51 illustre ces nouvelles branches dans la classification. Pour le moment, seul le procédé de soudure avec métal d’apport fait partie de la base ECO INVENT.

<sup>9</sup> Ce sont des pièces composées par plusieurs solides de base qui feront un seul solide après un procédé d’interaction.

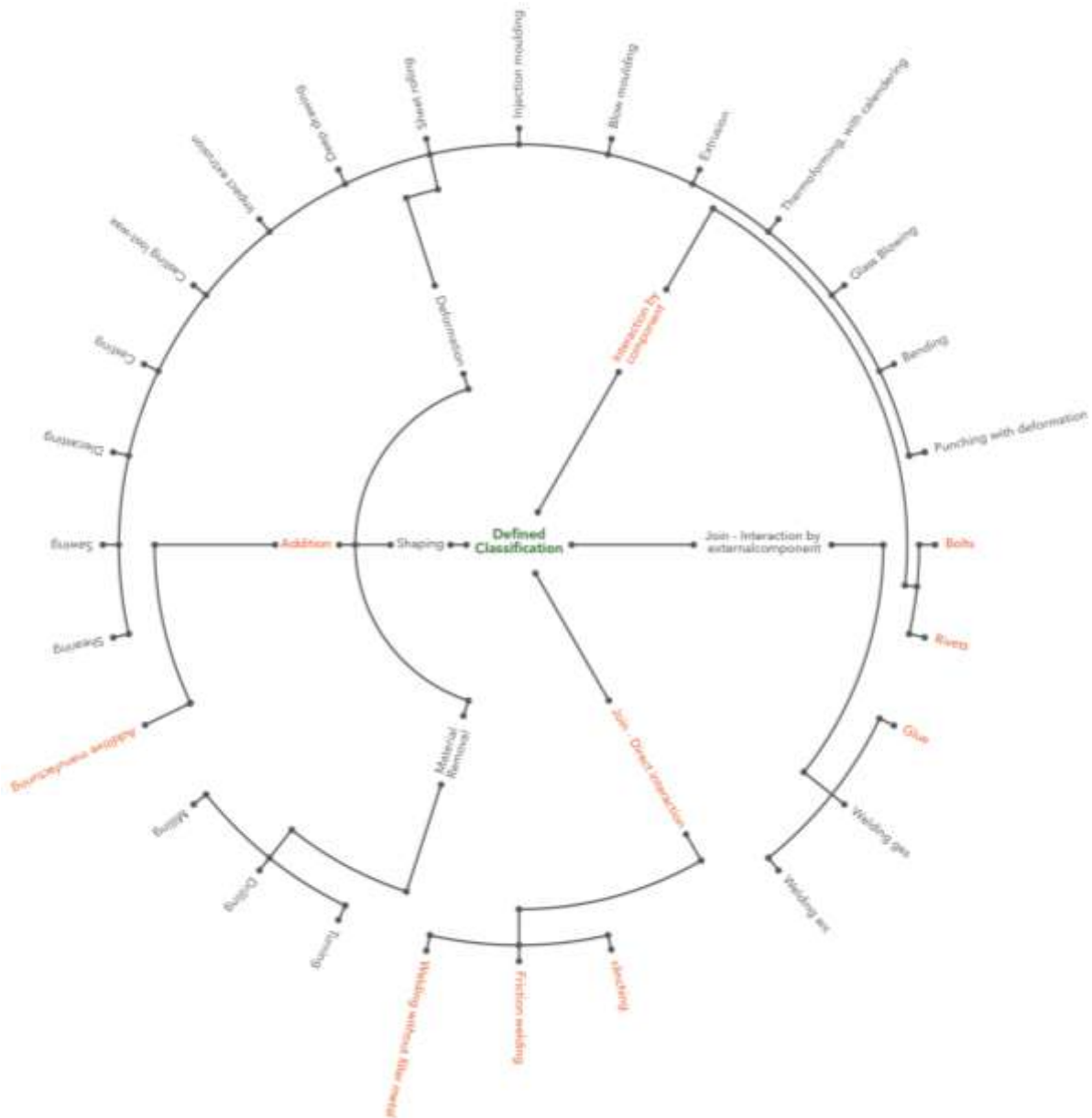


FIGURE 51 CLASSIFICATION AVEC PROCÉDES MANQUANTS

### 3.3. VARIABLE : FORME

Cette variable est déterminante pour le choix des matériaux et procédés de fabrication du produit concerné, souvent limité par la capacité des procédés que les concepteurs ont à leur disposition, les forçant à prendre des décisions différentes sur la forme initiale.

#### 3.3.1. ETAT DE L'ART : VARIABLE FORME

Plusieurs auteurs comme Schey, Ashby, Thompson proposent des taxonomies de formes :

- Schey (2000) classe des formes de produits en fonction de leurs caractéristiques géométriques (FIGURE 52) et il utilise ensuite cette classification pour identifier les machines ou des procédés particuliers capables de produire ces pièces.

Il fait remarquer un besoin évident d'interaction étroite entre les ingénieurs de conception de composants et les ingénieurs de fabrication pour les modifications mineures lors de la conception des pièces, pour augmenter l'efficacité des choix conjoints procédé/forme.

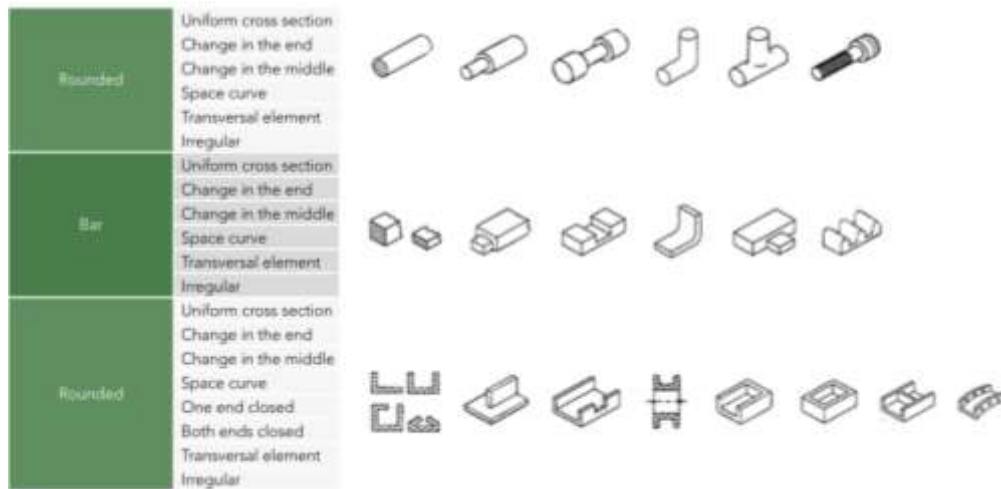


FIGURE 52 CLASSIFICATION PROPOSEE PAR SCHEY (Schevy, 2000)

- *Alting* (1996) en revanche, classe directement les formes par ses caractéristiques géométriques ou de surface et il les relie directement à des procédés de fabrication sélectionnés (FIGURE 53).

Form or Feature	Production Method
Flat surfaces	Laminate, planing, broaching, milling shaped grinding
Parts with cavities	Finish milling, electrical discharge machining, electrochemical machining, ultrasonic machining, casting
Parts with sharp features	Permanent mold casting, machining, grinding, manufacturing, powder metallurgy
Thin hollow shapes	Shell casting, electroforming, manufacturing
Tubular shapes	Extrusion, drawing, formed by rollers, rotated, centrifugal casting
Tubular parts	Formed with rubber, hydraulic pressure expansion, explosive forming, rejected
Bending in thin sheet	Stretch forming, hot forming, manufacturing and assembly
Opening in thin sheets	Punching, chemical punching, photochemical punching
Cross sections	Stretching, extruded, brushed finish, turning, grinding and centerless grinding
Square edges	Fine punching, machining, shaving, band grinding
Small holes	Laser, electro-discharge machining, electrochemical machining
Surface textures	Knurling, wire brushing, grinding, grinding with band, steel grit, etching, deposition

FIGURE 53 FORMES ET METHODES DE FABRICATION (Alting, 1996)

- *Johnson* (2002) d'autre part, commence par trois classes principales : les prismes, les plaques et les formes volumiques 3D, pleines ou creuses (FIGURE 54). Il les ségrège ensuite par leurs caractéristiques de symétries ou de positions respectives d'éléments particuliers (parallèles ou transversaux).

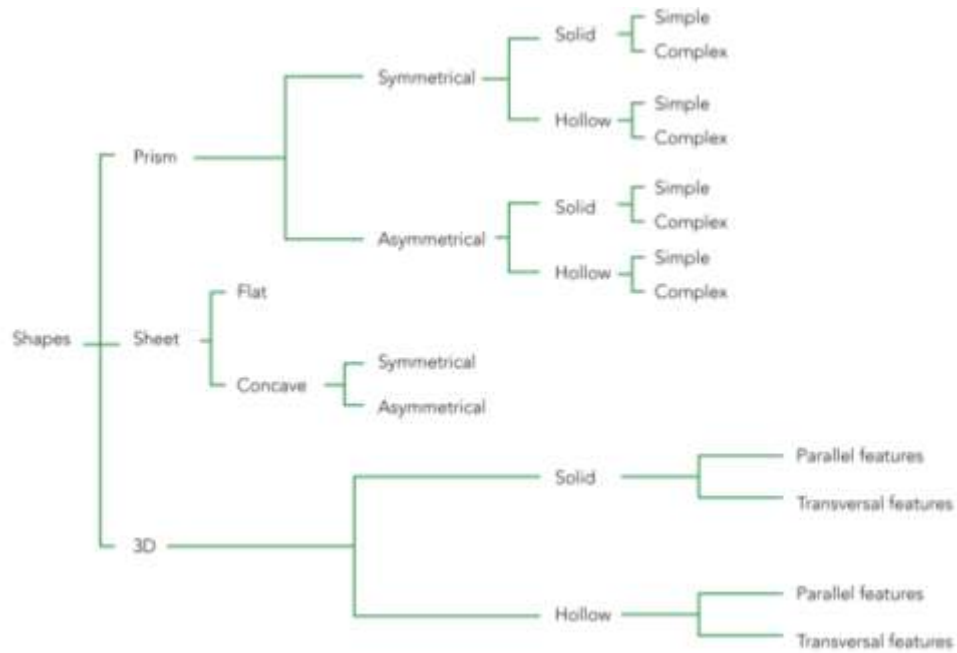


FIGURE 54 CLASSIFICATION DE FORME PAR JOHNSON (Johnson, Langdon, & Ashby, 2002)

- *Pugh* (1976) en revanche, divise ses formes en deux types (FIGURE 55) : les polyèdres et les corps ronds, il définit ensuite les surfaces pour arriver à sept différents types de solides, chacun avec ses propres variations.

Bodies	Surfaces	Solids	Shape
Polyhedron	All flat surfaces	Platonic solids	Tetrahedron
			Hexahedron
			Octahedron
			Dodechedron
			Icosahedron
		Prisms	Triangular
			Cube
			Pentagon
		Pyramid	Hexagon
			Heptagon
Octagon			
Rounded bodies	At least one curved surface	Sphere	Oblique
			Rectangular
		Cylinder	Convex
			Concave
			Sphere
		Cone	Rectangular
			Oblique
		Torus	
		Cone	

FIGURE 55 CLASSIFICATION DE FORME PAR PUGH (Pugh A. , 1976)

- Grantta Design (2015) utilise, dans son logiciel CES® Selector, une classification de forme qui s'adapte à la notion des procédés de fabrication (FIGURE 56). Divisent les formes comme *Johnson*. Par contre le troisième niveau de description est légèrement différent.

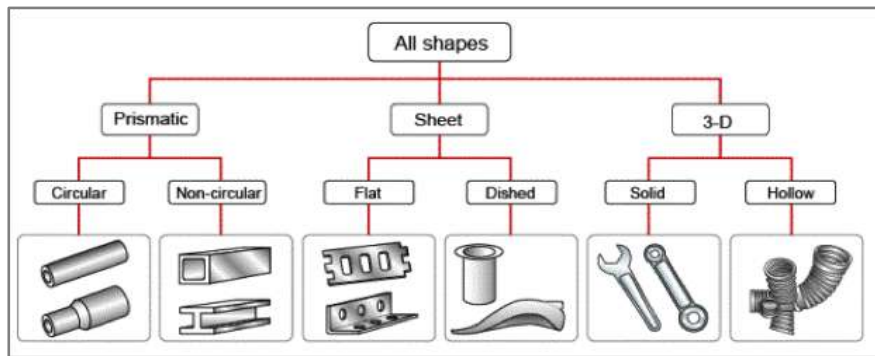


FIGURE 56 CLASSIFICATION DE FORME PAR GRANTTA DESIGN(Granta Design, 2015)

- *Tjalve* (1979) ne propose pas une taxonomie mais la notion de forme est intégrée dans un processus de conception représenté par la FIGURE 57. Ce modèle est largement simplifié, il ne sert qu'à donner une vue d'ensemble du processus de conception qui comprend la création d'une forme et de ses éléments descriptifs.

« Comme nous sommes principalement préoccupés par la qualité de la «forme», nous faisons un modèle plus détaillé que dans les stades où les propriétés de base sont fixées » (*Tjalve*, 1979) .

*Tjalve* l'appelle « modèle de synthèse détaillé du produit ». Les flèches noires indiquent la séquence de temps. La synthèse du produit prend comme point de départ la sortie de l'analyse du problème. La forme détaillée des éléments comprend une spécification des matériaux, les dimensions et les surfaces.

Dans tous les cas, la conception d'un problème est considérée comme une interprétation provisoire d'un point de départ que le concepteur devrait réinterpréter de nombreuses fois en projetant ses variantes.

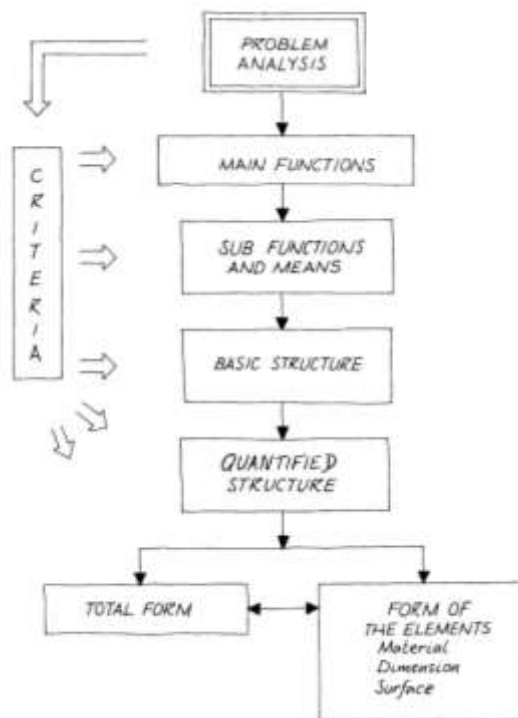














FIGURE 57 THE PRODUCT SYNTHESIS (*Tjalve*, 1979)

- Dans la méthode DFA « Design for Assembly », Lucas Corp (Boothroyd G. , 1980) propose une analyse de fabrication, dans lequel une classification de forme est effectuée et où des procédés de fabrication sont liés.

Cette classification comprend trois grandes catégories (FIGURE 58) : Enveloppes cylindriques (A), Enveloppes prismatiques (B) et Section planes ou parois fines (C).

<b>A</b>  <b>Part Envelope is Largely a Solid of Revolution</b>				
Single/Primary Axis		Secondary Axes: Straight line features parallel and/or perpendicular to primary axis		Complex Forms
Basic rotational features only	Regular secondary/repetitive features	Internal	Internal and/or external features	Irregular and/or complex forms
A 1	A 2	A 3	A 4	A 5
				
<b>Category includes:</b> Rotationally symmetrical/grooves, undercuts, steps, chamfers, tapers and holes along primary axis/centre line.	Internal/external threads, knurling and simple contours through flats/splines/keyways around the primary axis/centre line.	Holes/threads/counterbores and other internal features not on the primary axis.	Projections, complex features, blind flats, splines, keyways on secondary axes.	Complex contoured surfaces and/or series of features which are not represented in previous categories.

<b>B</b>  <b>Part Envelope is Largely a Rectangular or Cubic Prism</b>				
Single Axis/Plane		Multiple Axes		Complex Forms
Basic features only	Regular secondary/repetitive features	Orthogonal/straight line based features	Simple curved features on a single plane	Irregular and/or contoured forms
B 1	B 2	B 3	B 4	B 5
				
<b>Category includes:</b> Through steps, chamfers and grooves/channels/slots and holes/threads on a single axis.	Regular through features, T-slots and racks/plain gear sections etc. Repetitive holes/threads/counter bores on a single plane.	Regular orthogonal/straight line based pockets and/or projections on one or more axis. Angled holes/threads/counter bores.	Curves on internal and/or external surfaces.	Complex 3-D contoured surfaces/geometries which cannot be assigned to previous categories.






<b>C</b>  <b>Flat Or Thin Wall Section Components</b>				
Single Axis	Secondary/Repetitive Regular Features		Regular Forms	Complex Forms
Basic features only	Uniform section/wall thickness	Non-uniform section/wall thickness	Cup, cone and box-type parts	Non-uniform and/or contoured forms
C 1	C 2	C 3	C 4	C 5
				
<b>Category includes:</b> Flanks, washers, simple bends, forms and through features on or parallel to primary axis.	Plain cogs/gears, multiple or continuous bends and forms.	Component section changes not made up of multiple bends or forms. Steps, tapers and blind features.	Components may involve changes in section thickness.	Complex or irregular features or series of features which are not represented in previous categories.

FIGURE 58 FORME - METHODE DE LUCAS (Mejia-Gutierrez & Rios-Zapata, 2013)

La réalisation de croquis est une méthode ancienne par laquelle les concepteurs soutiennent visuellement le développement des idées.

«The sketch present the information I cannot directly deduce from a mental image» (Steadman, 2008)

La détermination des formes est un processus complexe qui fait souvent intervenir du « non-dit » et qui intègre une grande part d'expérience du concepteur. Dans la formation des ingénieurs, des règles ont été édictées. Par exemple, la fonderie permet de réaliser des formes complexes, une règle classique utilisée dit que nous allons regrouper les formes complexes vers les formes moulées. Ces règles complexifient les pièces, diminuent les tolérances et imposent des montages difficiles, cela se répercute sur les coûts (Chang, Wusk, & Wang, 1998). Les procédés de fabrication évoluent et permettent d'autres possibilités.

***Parmi les différentes classifications et taxonomies de forme analysées, les étapes conceptuelles jouent un rôle déterminant pour définir la forme. Dans ces étapes, le concepteur est confronté à la création des premières esquisses et croquis des idées de produits.***

***Il est donc indispensable d'offrir au concepteur différentes alternatives lors du choix des formes principales. De surcroît, il est aussi obligatoire de lier ces choix aux matériaux et procédés de fabrication mais aussi d'adapter les taxonomies à la succession des choix que peut faire le concepteur en particulier lorsqu'il peut imaginer une pièce obtenue par des procédés d'interaction.***

***Après avoir étudié les différentes taxonomies de formes, il a été constaté qu'il n'y a pas un système de classification de la forme universellement accepté et s'adaptant ou tenant compte de la logique d'un concepteur.***

### 3.3.2. DEFINITION D'UNE CLASSIFICATION DE FORME

Notre effort portera sur la définition d'une classification de formes, par le biais de la construction d'une « taxonomie<sup>10</sup> ». Les formes doivent être réalisables, c'est-à-dire reliées aux procédés de fabrication. Chaque sélection de forme devrait conduire à un ou plusieurs procédés de réalisation.

Si le concepteur veut réaliser une pièce en plusieurs parties, nous le verrons par la suite, il devra choisir les formes et aussi sélectionner les matériaux et les procédés d'interaction compatibles.

Pour définir notre taxonomie, nous proposons six niveaux de caractérisation. Chaque niveau correspond à une caractéristique morphologique, dont nous proposons deux (ou trois) alternatives par niveau. De cette façon, il est proposé donc, un sextuplet de caractéristiques qui définit de façon exhaustive une forme (FIGURE 59).

---

<sup>10</sup> Une taxonomie, est une forme de description des éléments et de leur regroupement en entités appelées taxons afin de les identifier, puis les nommer et enfin les classer.



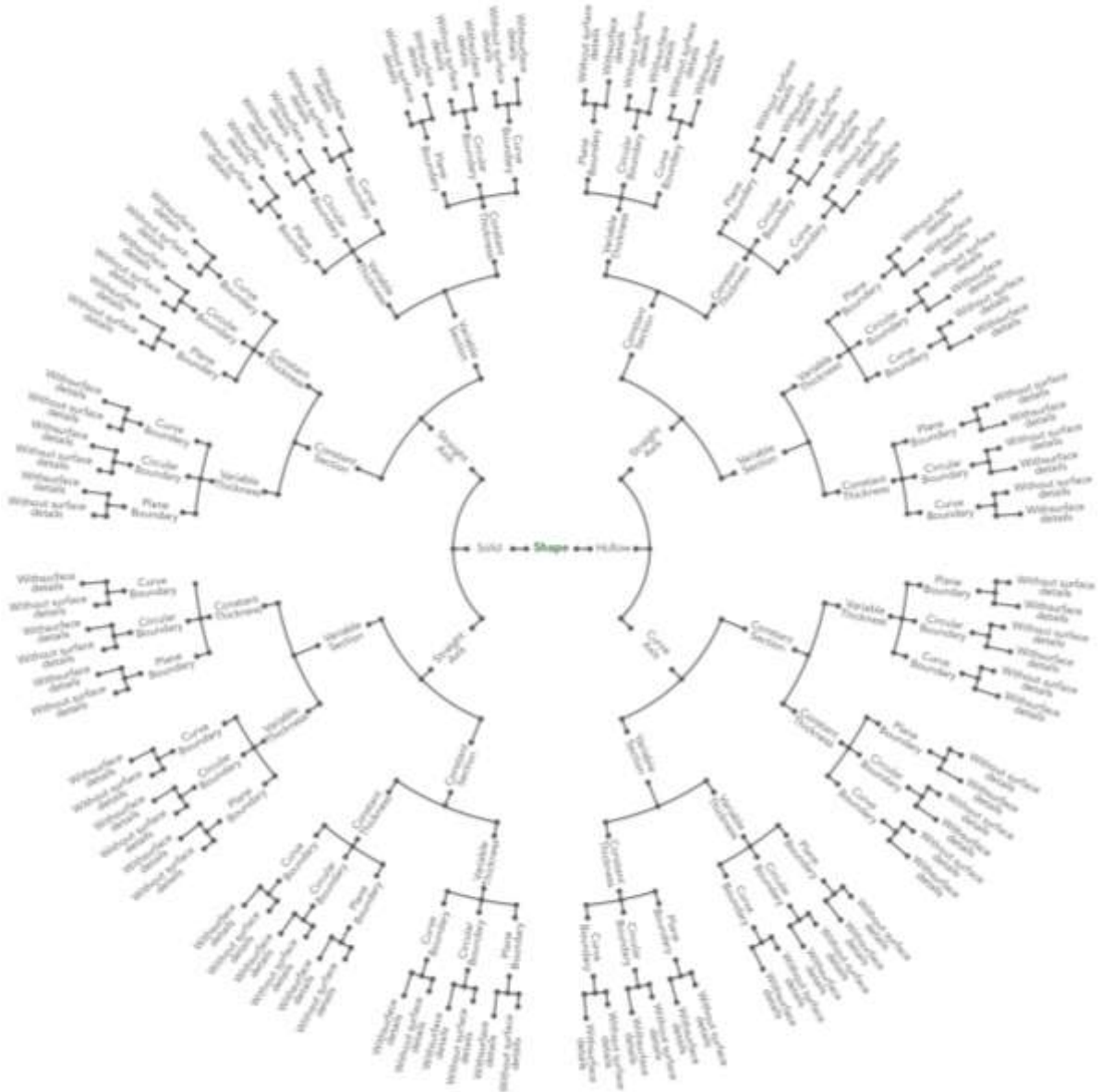


FIGURE 59 TAXONOMIE DE FORME PROPOSEE

Pour mieux comprendre chacune des six caractéristiques, nous proposons une définition des alternatives de chaque caractéristique :

- I. Caractéristique  $\mathcal{P}$  de « Pièce » : une pièce peut avoir différentes façons d’être constitué à l’intérieur. Soit, elle est pleine (volume solide) ou creuse (la surface recouvre un espace vide) comment il est illustré dans la FIGURE 60.
  - Creuse : pièce convexe ou concave avec une certaine épaisseur variable ou non
  - Solide : pièce pleine ou massive qui peut avoir des surfaces concaves ou convexes.

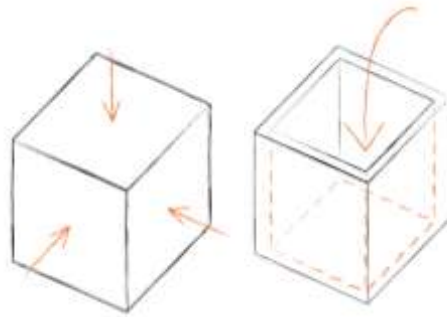


FIGURE 60 EXEMPLE DE PIÈCES SOLIDES ET CREUX

- II. Caractéristique  $\mathcal{A}$  de l'« axe préférentiel »: Sur une pièce, un axe imaginaire peut être normalement identifié. S'il existe plusieurs axes, il y en a un qui sera prédominant sur les autres et celui-ci sera l'axe préférentiel. Cet axe peut être droit ou courbe donnant les alternatives pour cette caractéristique (voir la FIGURE 61).

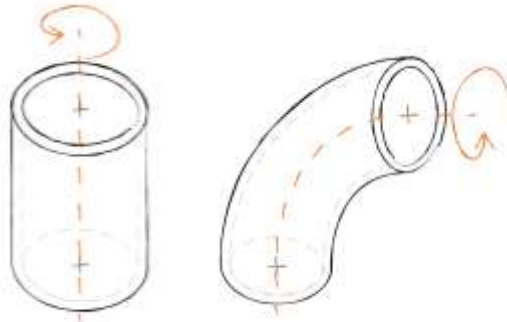


FIGURE 61 EXEMPLE DE L'AXE PRÉFÉRENTIEL DROIT ET COURBE

- III. Caractéristique  $\mathcal{S}$  de « Section Transversale » : La section obtenue par la coupe perpendiculaire à l'axe préférentiel peut être constante ou variable tout au long de l'axe préférentiel (voir la FIGURE 62)
- Constante : quand la section transversale ne change pas tout au long de l'axe préférentiel.
  - Variable : avec les changements de forme ou de taille le long de l'axe préférentiel.

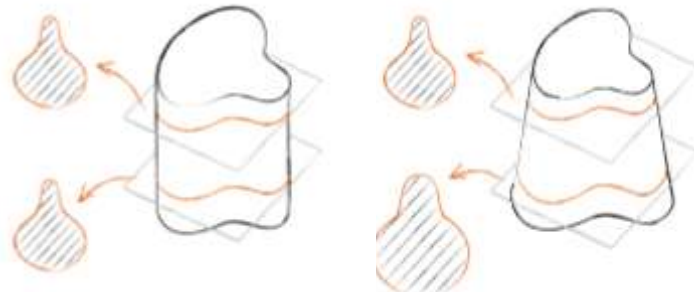


FIGURE 62 EXEMPLE DE LA SECTION TRANSVERSALE CONSTANTE ET VARIABLE

- IV. Caractéristique  $\mathcal{E}$  de l'« épaisseur » : l'épaisseur de la section transversale peut être constante ou variable (FIGURE 63). Ceci va se voir sur 2 sections droites différentes :

- Constante : quand il y a une seule épaisseur en différentes sections transversales.
- Variable : quand il y a des épaisseurs différentes ou variables dans les sections transversales.

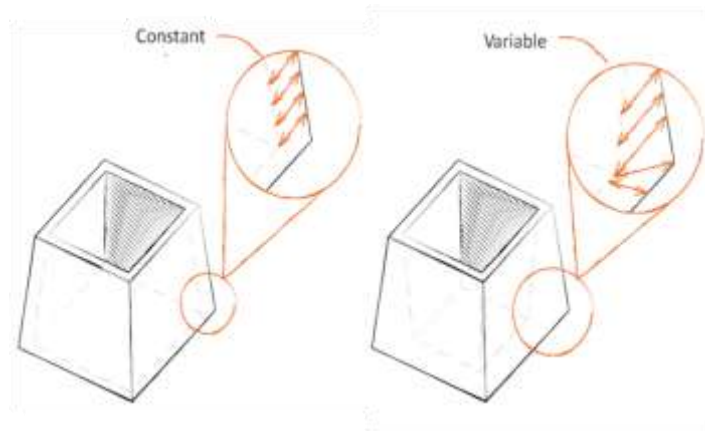


FIGURE 63 EXEMPLE DES ÉPAISSEURS CONSTANTE ET VARIABLE

V. Caractéristique  $\mathcal{C}$  du « Contour » : C'est l'analyse du contour défini par les limites de la section transversale de la pièce. Le contour peut être donc (FIGURE 64).

- Plane: Si la coupe a tous les contours plans, elle sera considéré comme un contour plan.
- Courbe : Si la coupe a, au moins, un contour courbe, elle sera considéré comme un contour courbe.
- Circulaire : Si la coupe a un contour circulaire, elle sera considéré comme un contour circulaire.

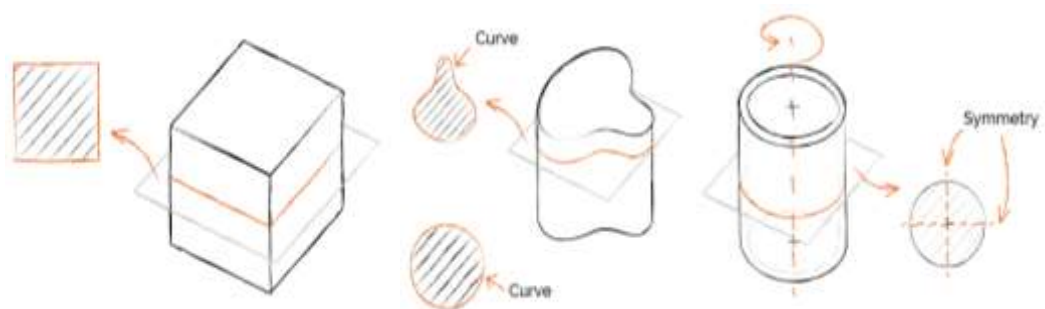


FIGURE 64 EXEMPLE DES CONTOURS PLANS, COURBE ET CIRCULAIRE

VI. Caractéristique  $\mathcal{D}$  des « détails » : Les détails sur la surface sont de petits changements dans la surface, mais qui sont obtenues par le même procédé qui donne la forme initiale (FIGURE 65). De cette manière la pièce peut :

- Avoir des détails sur la surface : si le procédé d'obtention laisse des caractéristiques sur la surface.
- Ne pas avoir des détails sur la surface : si le procédé d'obtention laisse la surface lisse et sans détails

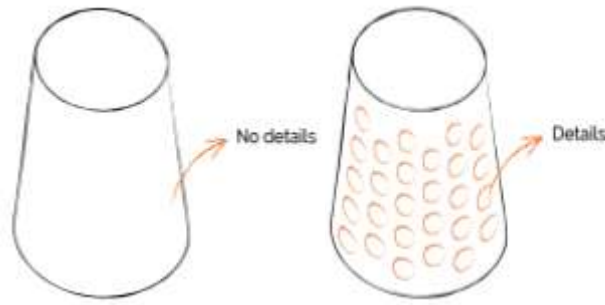


FIGURE 65 EXEMPLE DE DÉTAILS SUR LA SURFACE

En résumé, la FIGURE 59 présente toutes les possibilités de parcours dans la classification des formes sur une arborescence hiérarchique qui synthétise donc la taxonomie de forme proposé.

### 3.3.2.1. Utilisation de la taxonomie pour classifier une forme

Le processus de construction de la taxonomie s'est réalisé à partir de plusieurs tests de classification (plus de 30 pièces de géométries très variables, évalués par 3 personnes différentes). Au final, nous obtenons un  $n$ -uplet, où  $n$  correspond aux six caractéristiques morphologiques et leurs possibilités de choix alternatifs.

Le concepteur suit une analyse par caractéristiques et sera capable de décrire une forme avec un sextuplet (6), dans lequel les propriétés sont instanciées à partir des possibilités pour chaque caractéristique. Cela permettra la comparaison des formes au moyen d'analyses successives. Le cas d'une forme en particulier peut être exprimé de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \text{Forme}(x): F &\rightarrow \mathcal{P}(x) \times \mathcal{A}(x) \times \mathcal{S}(x) \times \mathcal{E}(x) \times \mathcal{C}(x) \times \mathcal{D}(x) & (6) \\ x &\mapsto \text{Forme}(x) \equiv (p_x, a_x, s_x, e_x, c_x, d_x) \end{aligned}$$

Avec :

$$\mathcal{P}(x) = \{\text{Creuse, Solide}\}$$

$$\mathcal{A}(x) = \{\text{Droit, Courbe}\}$$

$$\mathcal{S}(x) = \{\text{Constante, Variable}\}$$

$$\mathcal{E}(x) = \{\text{Constante, Variable}\}$$

$$\mathcal{C}(x) = \{\text{Plane, Courbe, Circulaire}\}$$

$$\mathcal{D}(x) = \{\text{Avec\_détails, Sans\_détails}\}$$

La FIGURE 66 illustre un exemple d'utilisation de la taxonomie de forme. Nous voulons maintenant vérifier s'il est possible de caractériser chaque pièce avec les six caractéristiques de la taxonomie proposée.

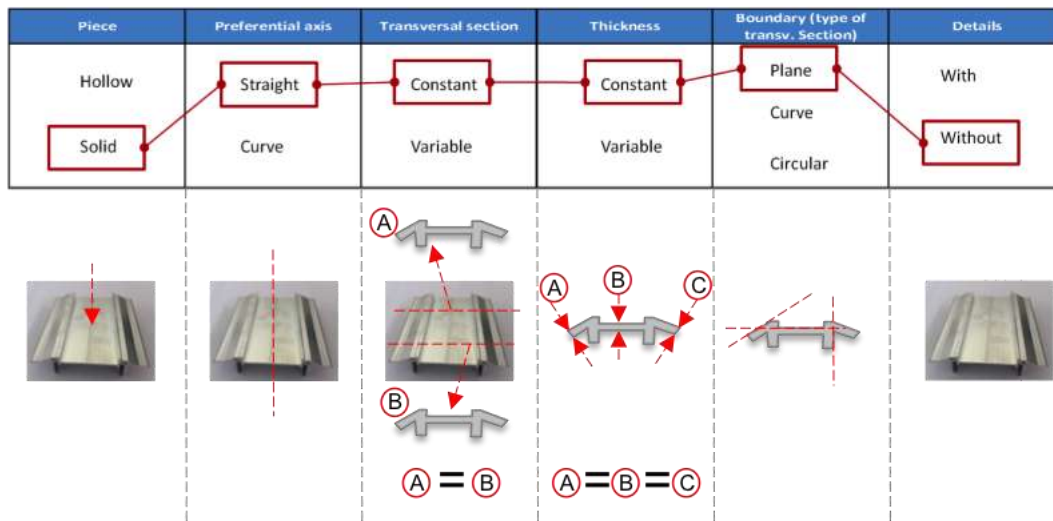


FIGURE 66 EXEMPLE D'UTILISATION DE LA CLASIFICATION DE FORME

Pour cet exemple, soit la pièce  $x$ , la description de forme serait (7) :

$$Forme(x) = [\text{Solid, Straight, Constant, Constant, Plane, Without details}] \quad (7)$$

De cette façon chaque pièce peut être décrite par ses six caractéristiques morphologiques et puissent être reliés aux procédés et matériaux.

### 3.3.2.2. Validation : Profil non concepteur

Basé sur la description antérieure, il a été décidé de choisir un ensemble de pièces avec des caractéristiques différentes pour faire des tests de validation, avec des personnes externes à l'équipe de travail.

Pour ce faire, 15 membres du réseau *EcoSD*<sup>11</sup> de différentes disciplines de recherche (matériaux, éco-conception, mécanique et innovation) ont participé à un test. Les testeurs de cette validation ne sont pas des concepteurs. La taxonomie a été présentée très succinctement et la fiche de présentation est disponible dans l'annexe C.

L'ensemble de trois pièces a été montré aux testeurs. Chaque participant devait trouver les six caractéristiques de forme de chaque pièce. Nous les comparons ensuite avec un vecteur de référence avec les six caractéristiques que décrivent mieux la forme. Ce vecteur de référence est présenté dans la première ligne des tableaux de résultats (voir TABLEAU 6).

Les résultats de ces tests sont présentés ci-après :

- Test de pièce #1 : Profil de construction métallique ( $P_1$ ).

Pour la première pièce FIGURE 67 qui est une pièce métallique extrudée en alliage d'aluminium, un degré élevé de coïncidence a été relevé par rapport à la classification attendue.

<sup>11</sup> ECOSD est une association française avec l'objectif principal d'encourager la collaboration entre les chercheurs universitaires et industriels afin d'échanger et de propager des connaissances avancées dans les domaines d'éco-conception.

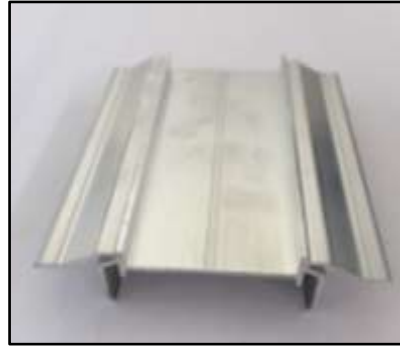


FIGURE 67 PIÈCE 1 (  $P_1$  ) : PROFIL DE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

Pour cette pièce, l'équipe de recherche a défini un sextuplet de référence qui décrit la forme selon la classification proposée (8) :

$$Forme(P_1) = [\text{Solid, Straight, Constant, Constant, Plane, Without details}] \quad (8)$$

Les résultats du teste son consolidées dans le TABLEAU 6. Les zones ombragées représentent les caractéristiques pour lesquelles il n'y avait pas concordance avec le sextuplet de référence et qui est aussi souligné en gris-foncé dans la première ligne du tableau.

Testeur	Piece	Preferential axis	Transversal section	Thickness	Boundary	Details
<i>Référence</i>	<b>Solid</b>	<b>Straight</b>	<b>Constant</b>	<b>Constant</b>	<b>Plane</b>	<b>without surface details</b>
1	Hollow	Straight	Constant	Variable	Plane	with surface details
2	Hollow	Straight	Constant	Variable	Plane	with surface details
3	Solid	Straight	Constant	Constant	Plane	with surface details
4	Solid	Straight	Constant	Constant	Plane	without surface details
5	Solid	Straight	Constant	Constant	Plane	without surface details
6	Solid	Straight	Constant	Constant	Curve	without surface details
7	Solid	Straight	Constant	Constant	Plane	without surface details
8	Solid	Straight	Constant	Constant	Curve	without surface details
9	Solid	Straight	Constant	Constant	Plane	with surface details
10	Solid	Straight	Constant	Constant	Plane	without surface details
11	Solid	Straight	Constant	Constant	Plane	with surface details
12	Solid	Straight	Constant	Constant	Plane	with surface details
13	Solid	Straight	Constant	Constant	Plane	without surface details
14	Solid	Straight	Constant	Variable	Plane	with surface details
15	Hollow	Straight	Constant	Variable	Plane	with surface details

TABLEAU 6 CARACTERISTIQUES- PIECE 1

Nous pouvons extraire que la ambiguïté principale concerne la sixième caractéristique (correspondant aux détails sur la surface). Pour 8 testeurs, la pièce comporte des détails à cause des petites rainures sur les côtés, alors que selon le principe de classification ces rainures ne sont pas des détails sur la surface. En résumé, les similitudes se présentent dans la FIGURE 68. Globalement, 80% de testeurs ont trouvé la classification attendue.

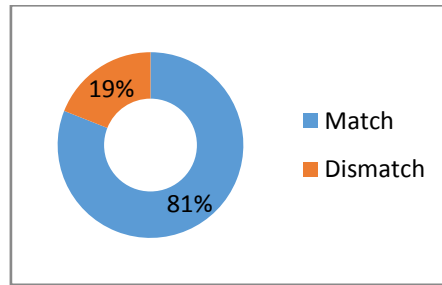


FIGURE 68 EVALUATION - PIÈCE 1

- Test de pièce #2 : Petit carter plastique ( $P_2$ ).

Concernant la deuxième pièce (FIGURE 69), le sextuplet de référence qui décrit la forme est (9)

$$Forme (P_2) = [Hollow, Straight, Variable, Variable, Curve, Without details] \quad (9)$$



FIGURE 69 PIÈCE 2 : CARTER EN MATIÈRE PLASTIQUE

Le TABLEAU 7 présente les résultats où nous voyons que la caractéristique qui présente des ambiguïtés est la troisième qui permet de définir la section transversale. Huit des testeurs ont défini la section comme constante, sans remarquer que la pièce changeait de section sur la partie arrière.

Testeur	Piece	Preferential axis	Transversal section	Thickness	Boundary	Details
Référence	Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	with surface details
1	Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	with surface details
2	Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	with surface details
3	Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	with surface details
4	Hollow	Straight	Variable	Constant	Curve	without surface details
5	Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	with surface details
6	Hollow	Straight	Constant	Variable	Curve	with surface details
7	Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	with surface details
8	Hollow	Straight	Constant	Constant	Curve	with surface details
9	Hollow	Straight	Constant	Constant	Curve	with surface details
10	Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	with surface details
11	Hollow	Straight	Constant	Constant	Curve	with surface details
12	Hollow	Straight	Constant	Variable	Curve	with surface details
13	Hollow	Straight	Constant	Variable	Curve	with surface details
14	Hollow	Straight	Constant	Variable	Curve	with surface details
15	Hollow	Straight	Constant	Variable	Curve	with surface details

TABLEAU 7 CARACTÉRISTIQUES - PIÈCE 2

Cependant, la coïncidence est meilleure que pour la première pièce, soit 86% (FIGURE 70)

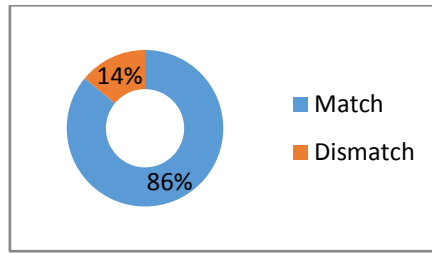


FIGURE 70 EVALUATION - PIECE 2

- Test pièce #3 : Aube de turbine ( $P_3$ ).

Pour la dernière pièce (FIGURE 71) qui a été évaluée, la coïncidence était moins proche que pour les deux premières pièces analysées (FIGURE 72).



FIGURE 71 PIÈCE 3 ( $P_3$ ) : AUBE DE TURBINE

Pour cette aube de turbine, le sextuplet de référence qui décrit la forme est (10) :

$$Forme (P_3) = [\text{Solid, Straight, Variable, Variable, Curve, Without details}] \quad (10)$$

Une grande majorité de testeur ont opté pour un axe préférentiel courbe (TABLEAU 8). Dans la référence de forme, nous avons défini que la pièce présente un axe préférentiel droit, parce que l'axe central est rectiligne mais la surface (qui est courbe) vrille autour de l'axe.

Testeur	Piece	Preferential axis	Transversal section	Thickness	Boundary	Details
Référence	Solid	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details
1	Solid	Curve	Constant	Constant	Curve	without surface details
2	Solid	Curve	Constant	Constant	Curve	with surface details
3	Solid	Curve	Variable	Variable	Curve	without surface details
4	Solid	Curve	Variable	Variable	Curve	without surface details
5	Solid	Curve	Constant	Constant	Curve	without surface details
6	Solid	Curve	Variable	Variable	Curve	without surface details
7	Solid	Curve	Variable	Constant	Curve	without surface details
8	Solid	Straight	Variable	Constant	Curve	without surface details
9	Solid	Curve	Variable	Variable	Curve	without surface details
10	Solid	Curve	Variable	Constant	Curve	without surface details
11	Solid	Curve	Variable	Constant	Curve	without surface details
12	Solid	Curve	Variable	Variable	Curve	with surface details
13	Solid	Curve	Variable	Variable	Curve	without surface details
14	Solid	Curve	Variable	Variable	Curve	without surface details
15	Solid	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details

TABLEAU 8 CARACTÉRISTIQUES - PIÈCE 3



Cette pièce a été la moins bien décrite des trois pièces analysées avec un 71% de coïncidence (voir FIGURE 72)

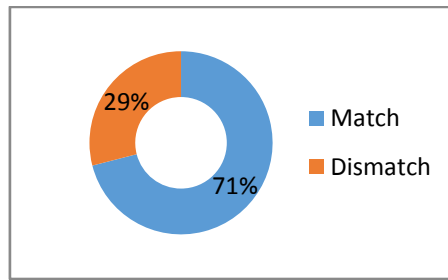


FIGURE 72 EVALUATION - PIÈCE 3

Cette pièce a été la moins bien décrite des 3 pièces analysées avec un 71% de coïncidence (FIGURE 72).

À la fin de l'exercice de validation, nous avons une coïncidence correcte et le groupe de mots définis pour la taxonomie est compréhensible. Toutefois, nous devons continuer de valider avec les gens qui ont un profil de concepteur.

### 3.3.2.3. Validation : Profil concepteur

Afin de renforcer la validation de l'utilisation de la taxonomie proposée, une autre validation avec six étudiants de la dernière année d'Ingénierie de Conception du Produit (Université EAFIT - Colombie) a été faite.

Pour cette validation cinq pièces avec des formes différentes ont été choisies et nous avons extrait deux de ces cas pour les analyser (FIGURE 73 et FIGURE 76). De la même manière que la validation précédente, une classification a été définie comme point de comparaison pour trouver la coïncidence globale par pièce. De plus la coïncidence est identifiée pour chaque caractéristique.

- Test pièce #1 : joint thermoplastique ( $P'_1$ ).

La première pièce de cette validation ( $P'_1$ ) est un joint thermoplastique (voir FIGURE 73)



FIGURE 73 JOINT THERMOPLASTIQUE ( $P'_1$ ).

Les résultats de l'expérience sont consolidés au

TABLEAU 9 dont le sextuplet de référence qui décrit la forme est (11):

$$Forme (P'_1) = [\text{Solid, Straight, Variable, Variable, Plane, Without details}] \quad (11)$$

Testeur	Piece	Preferential axis	Transversal section	Thickness	Boundary	Details
Référence	solid	straight	variable	Variable	plane	without
1	solid	straight	variable	Constant	plane	without
2	solid	straight	variable	Constant	plane	without
3	solid	straight	variable	Constant	plane	without
4	solid	straight	variable	Constant	plane	without
5	solid	straight	variable	Variable	plane	without
6	solid	straight	variable	Variable	plane	without

TABLEAU 9 CARACTÉRISTIQUES - JOINT THERMOPLASTIQUE

Parmi les caractéristiques définies par les participants, il a été noté que pour cette pièce, la caractéristique avec le moins de coïncidence (FIGURE 74) est celle qui définit l'épaisseur d'une pièce solide. Il n'a pas été facile de comprendre que l'épaisseur doit être définie en liaison avec la section transversale, cela signifie que si la section est variable, l'épaisseur serait également variable.

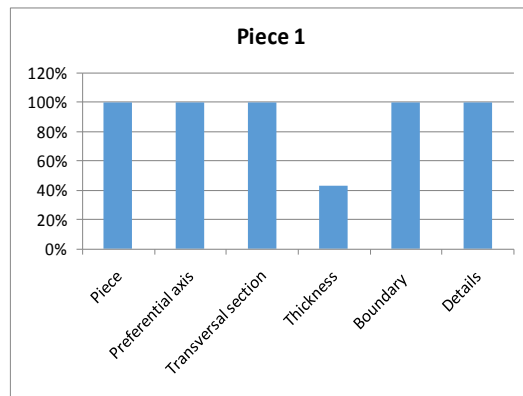


FIGURE 74 COÏNCIDENCE PAR CARACTÉRISTIQUE - PIÈCE 1

Pour cette première pièce, la coïncidence globale était de 91% par rapport aux caractéristiques définies. (FIGURE 75).

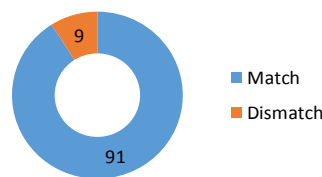


FIGURE 75 COÏNCIDENCE - PIÈCE 1

- Test pièce #1 : engrenage thermodurcissable ( $P'_2$ ).

La deuxième pièce de cette validation ( $P'_2$ ) est un engrenage thermodurcissable (FIGURE 76).



FIGURE 76 ENGRENAGE THERMODURCISSABLE ( $P'_2$ ).

Les résultats de l'expérience sont consolidés au TABLEAU 10 dont le sextuplet de référence qui décrit la forme est (12) :

$$Forme (P'_2) = [\text{Solid, Straight, Variable, Variable, Curve, Without details}] \quad (12)$$

La caractéristique épaisseur a posé des problèmes (FIGURE 77). Quatre participants n'ont pas remarqué que l'épaisseur varie non seulement en dehors de la partie mais aussi à l'intérieur. De la même manière, pour la dernière caractéristique qui définit les détails de la surface, quatre participants ont dit que la pièce avait des détails superficiels en considérant les trous centraux de la pièce sans se rendre compte que les détails sont faits par un procédé supplémentaire du procédé qui donne la forme initiale.

Testeur	Piece	Preferential axis	Transversal section	Thickness	Boundary	Details
<i>Référence</i>	<b>solid</b>	<b>straight</b>	<b>variable</b>	<b>variable</b>	<b>curve</b>	<b>without</b>
1	solid	straight	variable	variable	curve	with
2	solid	straight	variable	Constant	curve	with
3	solid	straight	variable	Constant	curve	with
4	solid	straight	Constant	Constant	curve	without
5	solid	straight	Constant	Constant	curve	without
6	solid	straight	variable	variable	curve	with

TABLEAU 10 CARACTÉRISTIQUES PIÈCE ROUGE

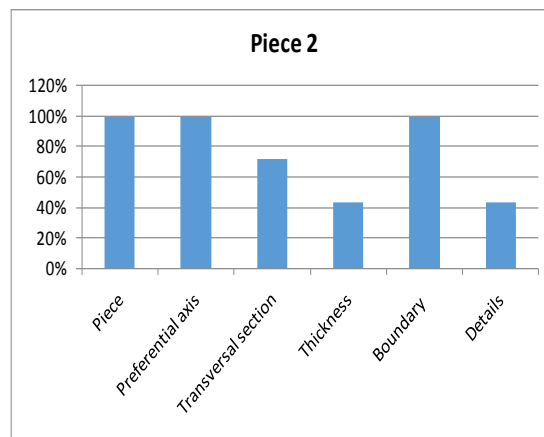


FIGURE 77 COÏNCIDENCE PAR CARACTÉRISTIQUE - PIÈCE ROUGE

C'est la pièce avec le moins de coïncidences (FIGURE 78) des cinq pièces analysées dans cette validation.

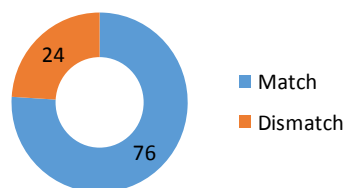


FIGURE 78 COÏNCIDENCE - PIECE 2

### 3.3.2.4. Analyse générale des tests avec des concepteurs.

La FIGURE 79 récapitule les résultats de ce test. Nous remarquons que l'épaisseur et la section transversale doivent être mieux expliquées et bien préciser que l'épaisseur des pièces solides est directement liée à la section transversale. Pour voir le détail complet de l'analyse des 5 pièces l'annexe D peut être consultée.

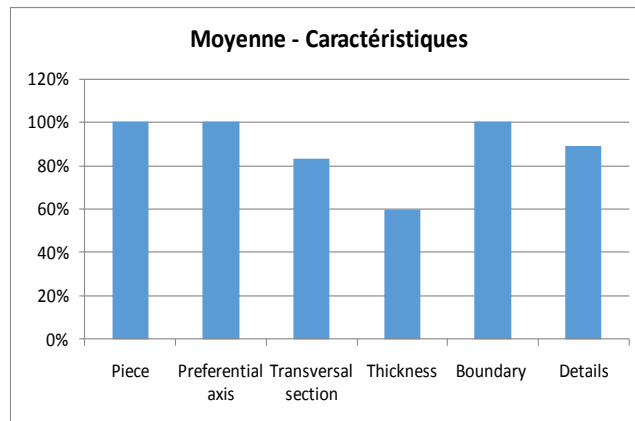


FIGURE 79 MOYENNE PAR CARACTERISTIQUE

***La taxonomie permet de caractériser les formes et de décrire tout type de pièce. Cependant, nous sommes conscients que l'appropriation de la taxonomie demande une certaine habitude et peut être l'utilisation d'un tutoriel.***

## 3.4. ESTIMATION DU VOLUME

Le volume est une variable déterminante pour l'estimation de l'impact environnemental car il nous permet de calculer la masse de matériau. Il est étroitement lié à la forme.

On ne va connaître sa valeur réelle que lors de la conception détaillée. Il faut donc que nous puissions faire une estimation pour avoir une valeur lors des phases préliminaires de la conception. Nous proposons une série de formes pouvant être envisagé à ce stade. Ces formes sont réalisables par tous les procédés de notre classification.

### 3.4.1. PROPOSITION D'ESTIMATION DE VOLUME

Le concepteur commence par sélectionner un Solide de Base (*BS*)<sup>12</sup> puis nous lui donnons la possibilité d'enlever de la matière (*RM*). Cet enlèvement de matière est compatible avec les procédés d'enlèvement de matière (perçage, fraisage, tournage).

Pour essayer de couvrir la plus partie des possibilités, la sélection du Solide de Base (*BS*) est proposé de se faire en choisissant entre deux solides de base tel que proposé par les FIGURE 80 et FIGURE 81 soit un cône tronqué et une pyramide tronquée. Chacun permet trois variations possibles : solides pleins, creux avec ou sans fond. Si les bases sont égales nous pourrons définir, respectivement, un cylindre de section circulaire et un parallépipède à base rectangulaire ou carré. La sélection des solides de référence (cône et pyramide) cherche à couvrir le plus grand nombre possible de solides (cônes, cylindres, pyramides et prismes rectangulaires) entrant la quantité minimale de dimensions possibles,

<sup>12</sup> De l'anglais « *Base Solid* »

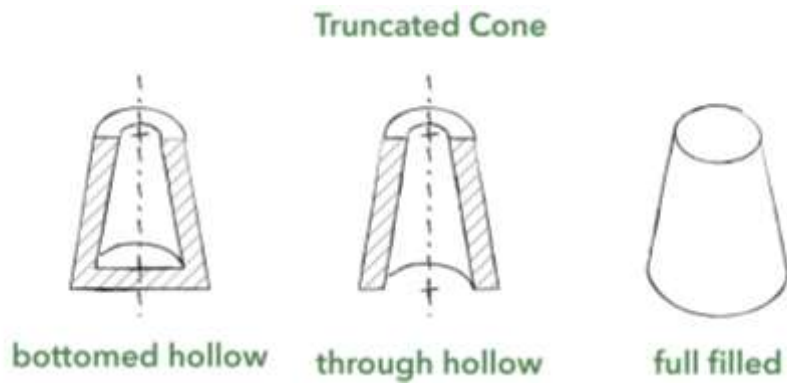


FIGURE 80 SOLIDE DE BASE - CÔNE TRONQUE

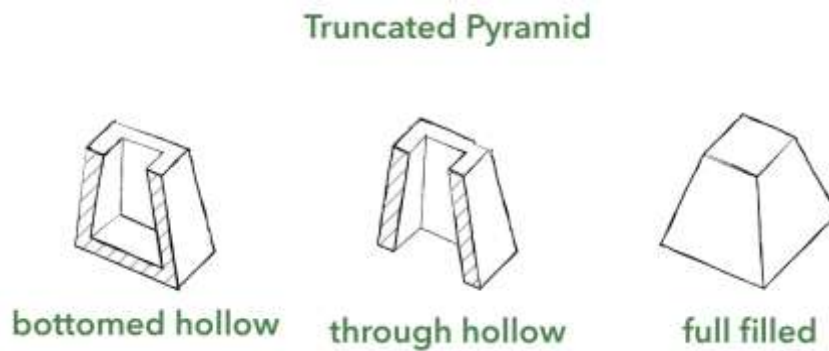


FIGURE 81 SOLIDE DE BASE - PYRAMIDE TRONQUÉE

Une fois le concepteur soit aux phases conceptuelles du processus de conception et il y a des concepts à évaluer, il choisit, parmi les six variantes possibles, le solide plus proche du volume du concept généré. Par exemple, si nous cherchons à définir la pièce FIGURE 82, nous choisissons le cône plein. Si les deux rayons sont identiques, nous obtenons comme approximation un cylindre comme le montre la FIGURE 83.

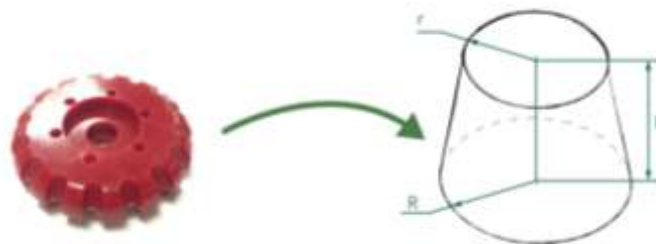


FIGURE 82 EXEMPLE AVEC UNE SB - CÔNE

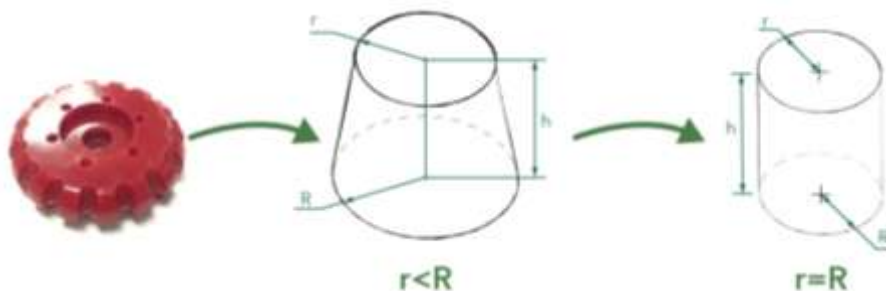


FIGURE 83 EXEMPLE AVEC UNE CÔNE DE  $R=R$

Pour simuler un cube, il faut sélectionner la pyramide tronquée pleine avec les côtés ( $W1$ ,  $W2$ ) et les profondeurs ( $D1$ ,  $D2$ ) égaux (FIGURE 84).

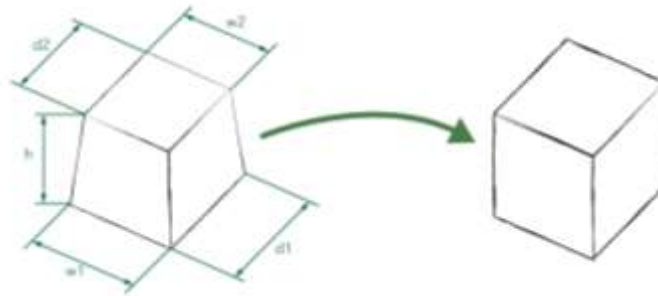


FIGURE 84 PYRAMIDE ET CUBE

La sélection de la Matière Enlevée ( $RM$ )<sup>13</sup> se fait par référence à tout trou réalisé par perçage et les procédés de fraisage et tournage. Pour le perçage le concepteur a la possibilité de choisir un volume cylindrique (variations de rayon ou de longueur. Il peut travailler avec deux cylindres de différentes tailles, avec x quantités chacun).

Pour la pièce représentée sur la FIGURE 85, nous pouvons voir dans le centre de la pièce différents types de trous. Un trou (a) avec six répétitions, un trou (b) qui ne traverse pas la pièce et un trou (c) traversant avec un rayon plus petit que le trou (b). Dans ce cas, étant donné que le concepteur a, au plus, deux cylindres nous pouvons faire le choix suivant :

- Cylinder 1: Hole (a) (x6)
- Cylinder 2: Hole (c) (x1)

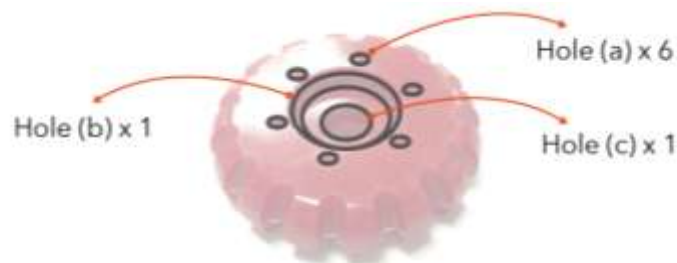


FIGURE 85 EXEMPLE AVEC DIFFÉRENTES TROUS

Dans ce cas en particulier, il a été considéré qu'un trou traversant a un impact plus important sur l'estimation du volume final.

Ainsi, le concepteur a choisi le BS et RM (*perçage*.) Pour compléter l'estimation, le concepteur doit entrer les dimensions globales du BS et MR dans les champs requis pour le solide sélectionné (FIGURE 86).

<sup>13</sup> De l'anglais « *Removed Material* »



FIGURE 86 DESCRIPTION DU CONCEPT - DIMENSIONS GLOBALES

Il est important que le concepteur prenne en compte le fait que l'épaisseur ( $t$ ) est une variable importante dans le choix des procédés de fabrication. Il est donc recommandé de prendre des précautions particulières lors de la saisie de la valeur numérique de cette variable.

Pour améliorer la précision du matière enlevée, nous pouvons définir un pourcentage de matière enlevée par tournage ou fraisage. De même, nous avons la possibilité de préciser si nous envisageons des pliages ou des cisailages comme procédés supplémentaires. Ces données seront utilisées par la suite pour calculer l'impact environnemental global et nous les définirons dans le Tableau de description du concept - DCT<sup>14</sup>. Le procédé de cisailage n'est pas dans les bases d'indicateurs environnementaux, mais nous avons construit un indicateur, pour pouvoir le prendre en compte - voir annexe G.

Ainsi, à la fin de la sélection BS et RM, nous devons estimer les dimensions globales de la forme choisie et de ses perçages. Le concepteur doit compléter les informations du concept relatives à des procédés d'enlèvement de matière comment le pourcentage de matière enlevée par tournage et fraisage, des procédés supplémentaires comment le nombre de pliages et de cisailages. Tout cette démarche est consolidé dans un écran comme illustré dans la FIGURE 87. Ces processus doivent être considérés seulement quand la pièce le requiert.



FIGURE 87 COMPLETEUDE - DESCRIPTION DU CONCEPT

<sup>14</sup> De l'anglais « Description Concept Table »

Aide à la décision en conception préliminaire par l'estimation des impacts environnementaux

Il faut rappeler que toutes ces décisions sont des estimations et n'ont pas de valeur définitive ou absolue, mais relative pour faire des analyses comparatives comme aide à la décision en conception préliminaire.

Exemple d'estimation du volume :

Pour clarifier cette démarche d'estimation du volume, nous avons pris une pièce de référence (FIGURE 88).



FIGURE 88 PRODUIT DE RÉFÉRENCE

Le concepteur, doit en premier lieu, choisir son *BS* et *MR*. Dans ce cas, *BS* est défini comme une pyramide tronquée creuse (FIGURE 89). La pièce n'a pas de trous ou de perforations, donc  $MR=0$ .

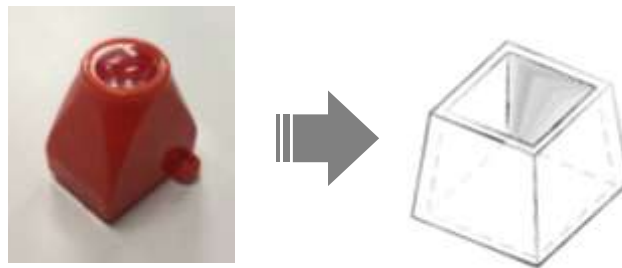


FIGURE 89 SÉLECTION DU SOLIDE DE BASE - SB

L'étape suivante consiste à faire des estimations des les dimensions globales du solide choisi (FIGURE 90)

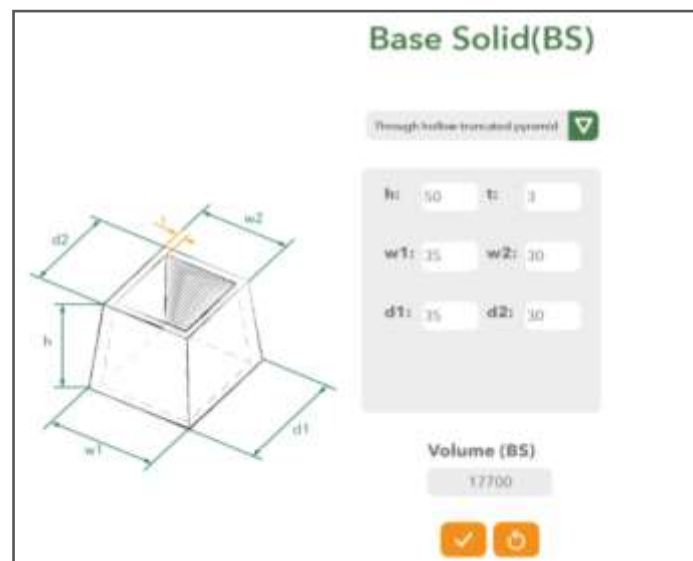


FIGURE 90 ENTRÉE DES DIMENSIONS DU SOLIDE DE BASE - DESCRIPTION DU CONCEPT



La prochaine étape est de définir s'il y a des procédés d'enlèvement de matière liés à la forme de la pièce. Aucune autre particularité n'est à prendre en compte (FIGURE 91) donc les variables de procédés supplémentaires ne sont pas affectées.

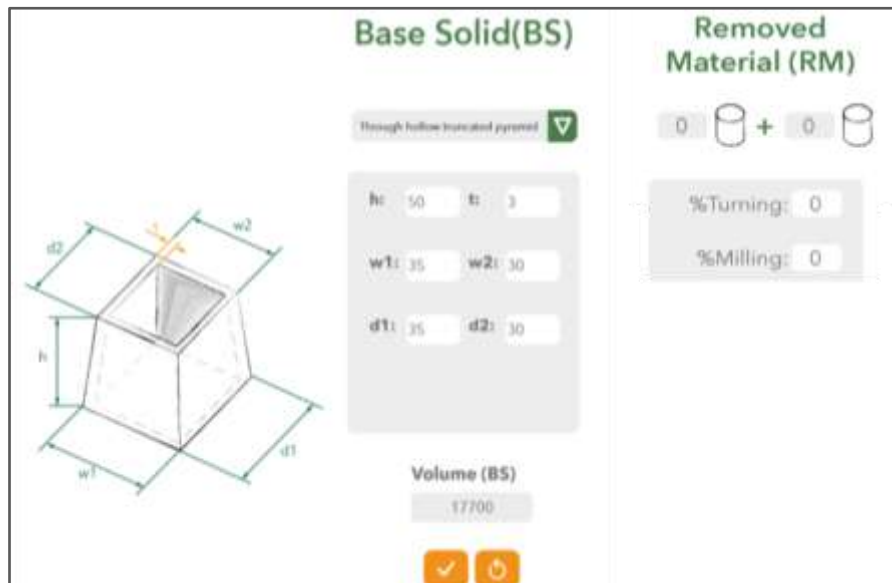


FIGURE 91 VOLUME ESTIMÉ

Donc, pour cet exemple, le volume estimé avec les dimensions globales données par le concepteur serait égal à 17700 mm<sup>3</sup>.

Après cet exemple d'estimation, nous présenterons une validation, pour vérifier si la méthode proposée est non seulement compréhensible mais donne des résultats reproductibles et proches du volume réel.

### 3.4.2. COMPARAISON AVEC LE VOLUME REEL CALCULE

Pour vérifier si la méthode proposée pour estimer le volume est appropriée pour les étapes préliminaires, il a été décidé de faire une modélisation 3D de cinq pièces avec différents TRIPLETS (procédé - matériau - forme) existants (FIGURE 92) pour en déduire la valeur du volume. Le rapport complet est disponible dans l'annexe E.



FIGURE 92 EXEMPLE PIÈCES EN SOLIDWORKS® - PIÈCES RÉELLES

Pour cet exercice, il a été décidé de travailler avec cinq ingénieurs (en faisant des études de troisième cycle). Chaque personne doit choisir son BS et estimer les dimensions globales pour la géométrie sélectionnée. Avec ces données ils estiment le volume des cinq pièces, puis les

Aide à la décision en conception préliminaire par l'estimation des impacts environnementaux

comparer avec le volume «réel» délivré par *SolidWorks*® (voir exemple dans la FIGURE 93) et ensuite analyser la proximité entre eux.



FIGURE 93 EXEMPLE DE PROPRIÉTÉS PHYSIQUES - SOLIDWORKS®

Par exemple, pour la pièce  $P'_1$  présenté lors de la validation de la taxonomie (

FIGURE 94), avec un volume réel = 186.840 mm<sup>3</sup> donné par la modélisation en *SOLIDWORKS*®, les cinq personnes ont trouvé les volumes énumérés sur la FIGURE 95 avec un pourcentage d'erreur moyenne de 28% pour cette pièce.

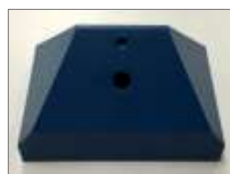


FIGURE 94 PIÈCE BLEUE

Pièce Bleu	étudiant 1	étudiant 2	étudiant 3	étudiant 4	étudiant 5	% erreur (moyenne)
ABS	Piramid Plein	Piramid Plein	Piramid Plein	Piramid Plein	Piramid Plein	
Injection	129478	119143	124097	124019	172743	28%
d: 1020 kg/m <sup>3</sup>						
v: 186840 mm <sup>3</sup>	30%	36%	33%	33%	8%	

FIGURE 95 ESTIMATION DU VOLUME - PIÈCE BLEUE

Ce pourcentage d'erreur pour chaque pièce a été trouvée dans l'équation (13) :

$$\% \text{ erreur} = \frac{|Valeur \text{ Théorique} - Valeur \text{ Experimentale}|}{Valeur \text{ Théorique}} \quad (13)$$

**La plupart des participants ont choisi le même solide de base - SB ce qui a conduit à trouver de volumes très proches. La méthode est rapide et facile à utiliser, ce qui est positif dans les étapes préliminaires du processus de conception.**

**Bien que pour certaines pièces nous avons un pourcentage d'erreur important, il faut être conscient que les pièces sélectionnées pour cette validation imposaient des procédés supplémentaires et des finitions de surface, ce qui rend difficile d'estimer le volume très précisément. Il convient de rappeler que, dans les étapes préliminaires le concepteur ne peut pas concevoir les pièces avec ce niveau de détail.**

### 3.5. CONSTRUCTION DE LA BASE DE DONNEES

Nous avons défini une classification des matériaux (voir la section 3.1.2) et des procédés (section 3.2.2), puis nous avons proposé une taxonomie de forme (section 3.3.2) avec une méthode d'estimation de volume (section 3.4.1). Le concepteur dispose maintenant des informations nécessaires pour faire une estimation de l'impact environnemental de son concept.

Mais, la question maintenant est, comment choisir une combinaison de éléments, cohérent et faisable? Parce que les éléments peuvent être sélectionnés et calculer un impact. Mais l'ensemble d'éléments est possible de les réaliser ? C'est à dire :

- Il faut choisir un matériau qui puisse être fabriqué avec un procédé
- ce procédé doit pouvoir obtenir la forme du concept.

Pour cela, nous créons une base de données initiale où le TRIplet matériau/procédé/forme et ses paramètres pertinents sont liés d'une manière cohérente.

#### 3.5.1. DEFINITION DU « VECTEUR DE COHERENCE »

Nous avons des variables simples mais qui, pour l'instant, ne peuvent être sélectionnés aléatoirement, ce qui peut donner des informations incohérentes. Nous souhaitons pouvoir créer une structure de données qui puisse contenir toute une série d'éléments. Nous allons maintenant aborder un des principaux apports de ce projet : la gestion des variables de conception liées aux impacts environnementaux (matériau, procédé, forme) de façon cohérente. Notre proposition permettra effectivement de facilement créer, stocker mais, surtout, naviguer dans une structure de données, présentée sous le nom de « vecteur de cohérence ».

En informatique, un vecteur<sup>15</sup> désigne un ensemble d'éléments ordonnés et accessibles par des indices, dont la taille est dynamique. Le vecteur de cohérence est le vecteur qui contient les variables nécessaires pour l'estimation de l'impact et les relations possibles entre elles. Pour comprendre ce concept, nous récapitulons les variables principales et leurs définitions sous la syntaxe classique d'algèbre relationnelle pour définir les structures de données et

---

<sup>15</sup> De la définition de vecteur en informatique comme structure des donnés. Source: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Vecteur\\_\(structure\\_de\\_données\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Vecteur_(structure_de_données))

orienter la construction de la base de données. Le vecteur dynamique permet la mise à jour automatique de la table lors d'ajouts ou de suppressions d'éléments.

### 3.5.1.1. Structure de données pour la variable « Matériau » ( $M_i$ )

Selon la classification des matériaux (section 3.1.2) et les propriétés caractéristiques des matériaux, nous proposons une structure qui organise l'ensemble de propriétés qui nous permet de les labéliser, les classifier et les rendre utiles pour fournir des informations sur les matériaux dans les phases de qualification du processus de conception et, surtout, pour exploiter les propriétés liées aux impacts environnementaux : les éco-indicateurs.

La définition d'un matériau pour un concept  $x$ , est défini par la liaison entre la classification du matériau (selon sa taxonomie) et ses propriétés physiques, mécaniques et environnementales.

Pour la classification du matériau, nous avons défini le vecteur  $MatClass(x)$  décrit dans l'équation(14) :

$$\begin{aligned} MatClass(x): Mc &\rightarrow Famille(x) \times Classe(x) \times Type(x) \\ x &\mapsto MatClass(x) = (f_x, cl_x, t_x) \end{aligned} \quad (14)$$

Avec :

$f_x$  : est la Famille<sup>16</sup> du matériau.

$cl_x$  : est la Classe du matériau.

$t_x$  : est le Type du matériau.

Pour les propriétés du matériau, nous avons défini le vecteur  $MatProp(x)$  décrit dans l'équation (15) :

$$\begin{aligned} MatProp(x): Mp &\rightarrow \mathcal{N}_m(x) \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \dots \times \mathbb{R} \\ x &\mapsto MatProp(x) = (Nm_x, I_x, E_x, \rho_x, \dots) \end{aligned} \quad (15)$$

Avec :

$Nm_x$  : est le nom du matériau (de l'ensemble fini des matériaux).

$I_x$  : est l'impact environnemental du matériau [Points].

$E_x$  : est le module d'élasticité du matériau [Gpa].

$\rho_x$  : est la masse volumique du matériau [Kg/m<sup>3</sup>].

... : est ainsi de suite, avec d'autres propriétés du matériau.

Nous obtenons donc, la structure de données pour la description du matériau, soit (16) :

$$M_i(x) = (f_x, cl_x, t_x, Nm_x, I_x, E_x, \rho_x, \dots) \quad (16)$$

<sup>16</sup> De l'ensemble fini d'alternatives provenant de la taxonomie de classification (Section 3.1.2).

### 3.5.1.2. Structure de données pour la variable « Procédé » ( $P_i$ )

Selon la classification des procédés (section 3.2.2), et les propriétés caractéristiques des procédés, nous proposons une structure qui organise l'ensemble de propriétés qui nous permet de les labelliser, classifier et les rendre utiles pour fournir des informations du procédé dans les phases de qualification du processus de conception et, surtout, pour exploiter les propriétés liées aux impacts environnementaux : les éco-indicateurs.

La définition d'un procédé pour un concept  $x$ , est définie par la liaison entre la classification du procédé (selon sa taxonomie) et ses propriétés en relation avec des matériaux.

Pour la classification du procédé, nous avons défini le vecteur  $ProClass(x)$  décrit dans l'équation (17) :

$$\begin{aligned} ProClass(x): Pc &\rightarrow Fonction(x) \times Type(x) \\ x &\mapsto ProClass(x) = (fn_x, ty_x) \end{aligned} \quad (17)$$

Avec :

$fn_x$  : est la Fonction du procédé.

$ty_x$  : est le type du procédé.

Pour les propriétés du procédé, nous avons défini le vecteur  $ProProp(x)$  décrit dans l'équation (18) :

$$\begin{aligned} ProProp(x): Pp &\rightarrow \mathcal{N}_p(x) \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \dots \times \mathbb{R} \\ x &\mapsto ProProp(x) = (Np_x, R_x, Pv_x, T_x, \dots) \end{aligned} \quad (18)$$

Avec :

$Np_x$  : est le nom du procédé (de l'ensemble fini des procédés).

$R_x$  : est le domaine de l'épaisseur [mm].

$Pv_x$  : est le volume de production minimum [units\*cost].

$T_x$  : est les tolérances [mm].

... : est ainsi de suite, avec d'autres propriétés du procédé.

Nous obtenons donc, la structure de données pour la description du procédé, soit (19) :

$$P_i(x) = (fn_x, ty_x, Np_x, R_x, Pv_x, T_x, \dots) \quad (19)$$

### 3.5.1.3. Structure de données pour la variable « Forme » ( $S_i$ )

La définition de la forme pour un concept  $x$ , est définie par la taxonomie du forme (section 3.3.2)

Pour la classification de la forme, nous avons défini le vecteur  $ShapeClass(x)$  décrit dans l'équation (20) :

$$\begin{aligned} \text{ShapeClass}(x): Fc &\rightarrow \text{Piece}(x) \times \text{Prefaxis}(x) \times \text{TransSection}(x) \times \text{Thickness}(x) \times \text{Boundary}(x) \times \text{Details}(x) \\ x &\mapsto \text{ShapeClass}(x) = (Pi_x, Pa_x, Ts_x, Th_x, B_x, D_x) \end{aligned} \quad (20)$$

Avec :

$Pi_x$  : est le type de pièce

$Pa_x$  : est le type d'axe préférentiel.

$Ts_x$  : est le type de section transversale

$Th_x$  : est le type d'épaisseur

$B_x$  : est le type de contour de la pièce.

$D_x$  : est si la pièce a des détails de surface ou non.

Nous obtenons donc, la structure de données pour la description de la forme, soit (21) :

$$S_i(x) = (Pi_x, Pa_x, Ts_x, B_x, D_x) \quad (21)$$

#### 3.5.1.4. Structure de données pour la « cohérence » des variables

Avec les structures de données précédentes il est maintenant possible de les relier de façon cohérente. Nous proposons un « Vecteur de Cohérence (VC) » qui relie les structures de données du TRIPLET (Matériau/Procédé/Forme) et en ajoutant un attribut pour déterminer la cohérence. Ce vecteur est défini par l'équation suivante (22) :

$$VC = [M_i, P_i, S_i, Co] \quad (22)$$

où:

$M_i$  : est la description d'un matériau en particulier.

$P_i$  : est la description d'un procédé en particulier.

$S_i$  : est la description d'une forme en particulier.

$Co$  : est le niveau de cohérence, ou relation viable, de la combinaison de  $M_i$ ,  $P_i$  et  $F_i$ .

Matériaux disponibles à l'intérieur de notre classification La valeur de  $Co$  a été défini come binaire : soit le TRIPLET est faisable (la valeur est de 1), soit il ne l'est pas (la valeur est 0). D'une façon générale, ces deux états sont repérés « Cohérent » et « Pas-Cohérent » et nous attribuons :

- à l'état « Cohérent » la valeur de  $Co = 1$ ;
- à l'état « Pas-Cohérent » la valeur de  $Co = 0$ .

Basé sur les domaines de chaque variable, nous pouvons visualiser le vecteur étendu qui a les caractéristiques décrites sur l'équation (23) et qui conforme la structure de données qui va constituer, une fois remplie, la base de connaissances sur les TRIPLETs faisables.

$$VC_{étendu} = \left[ \underbrace{f, c, t, Nm, I, E, \rho, \dots}_{M_i}, \underbrace{fn_x, ty_x, Np_x, R_x, \dots}_{P_i}, \underbrace{Pi_x, Pa_x, Ts_x, B_x, D_x}_{S_i}, Co \right] \quad (23)$$

Une fois le vecteur de cohérence défini, nous avons recherché et défini les relations possibles entre les variables du TRIPLET. Pour cela, nous construisons un diagramme entre les entités qui précise les relations entre les variables.

### 3.5.2. MODELE ENTITE - ASSOCIATION

Pour comprendre mieux comment le vecteur de cohérence est implémenté et comment la base de données a été construite, nous avons réalisé un Modèle Entité-Association (ER)<sup>17</sup>.

Un modèle ER décrit les liaisons entre entités dans un domaine spécifique de la connaissance. Un modèle ER est composé de types d'entités et précise les relations qui peuvent exister entre des instances de ces types d'entités (Rouse, 2014).

Le diagramme ER proposé pour notre base de données selon le vecteur de cohérence est précisé sur la FIGURE 96 Il a été choisi de travailler dans *MySQL Workbench*, outil visuel de conception de bases de données caractérisé par son utilisation simple et intuitive.

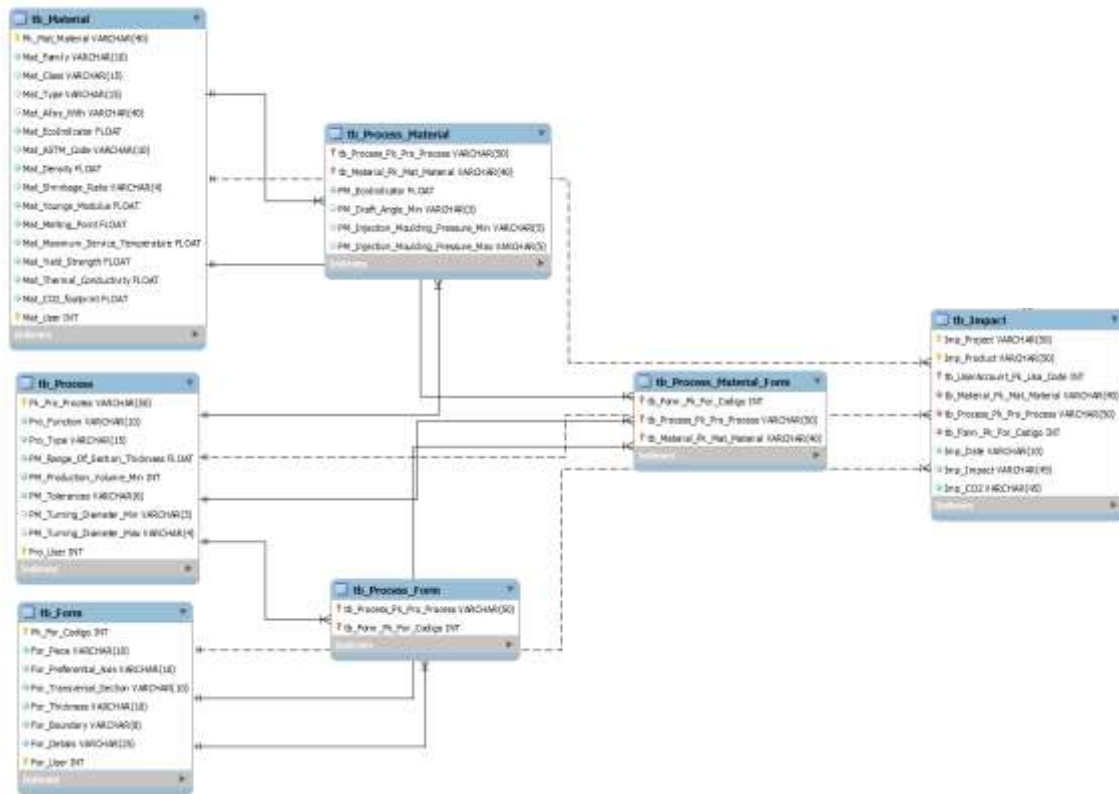


FIGURE 96 MODELE FINAL DE L'ESTRUCTURE DE DONNEES - ENTITE-ASSOCIATION

Ce diagramme montre comment, à partir de chaque variable, la relation est construite à l'égard des autres. Par exemple, identifier quel type de procédés ( $P_i$ ) et avec quel type de formes ( $S_i$ ) sont possibles d'obtenir pour un matériau ( $M_i$ ), par exemple, la famille des polymères.

Les lignes continues et en pointillés traduisent les relations de dépendance. Les lignes en pointillés veulent dire qu'il n'y a pas de dépendance avec les tableaux traversés.

<sup>17</sup> En anglais : « Entity Relationship Diagram »

3.5.3. DEMONSTRATEUR (EXCEL)

Comme point de départ pour bien comprendre les relations possibles (TRIPLET) entre  $P_i$ ,  $M_i$  et  $S_i$ , nous avons construit une base de données qui relie et contient le vecteur de cohérence défini précédemment. Chaque variable est définie et liée à d'autres variables et sa cohérence est mise en évidence.

La base de données inclut en premier lieu des caractéristiques physiques (TABLEAU 11).

Material	Alloy with	Eco indicator [Points]	ASTM code	Density min [Kg/m³]	Shrinkage ratio min [%]	Shrinkage ratio max [%]
Aluminium alloy	Magnesium	0,884	A370	2,69E+02	N/A	N/A
Chromium steel 18/8	Nickel chromium stainless steel 18-8	1,151	A743	7,83E+02	N/A	N/A
Cast iron	Carbon and Silicon	0,250	A644-14	7,15E+02	N/A	N/A
Steel	Iron and Carbon	0,253	A36	7,83E+02	N/A	N/A
Brass	Copper and Zinc	9,218	B36	8,22E+02	N/A	N/A
Copper	N/A	3,780	B152	8,94E+02	N/A	N/A
PET - Polyethylene terephthalate	N/A	0,423	N/A	1,34E+02	0,20	0,40
PE - Polyethylene	N/A	0,418	N/A	9,49E+01	1,30	3,00
PEHD - Polyethylene high density	N/A	0,316	N/A	9,49E+02	2,00	6,00
PBDD - Polyethylene low density	N/A	0,324	N/A	9,10E+02	1,30	3,00
PP - polypropylene	N/A	0,334	N/A	9,00E+02	1,00	2,30
PVC - Polyvinyl chloride rigid	N/A	0,260	N/A	1,43E+02	0,10	0,20
PA 6,6 - Polyamide - Nylon	N/A	0,770	N/A	1,13E+02	0,30	1,30
PS - polystyrene	N/A	0,434	N/A	1,04E+02	0,40	0,70
EPS - Expandable polystyrene	N/A	0,430	N/A	1,60E+02	0,30	0,60
HIPS - High impact polystyrene	N/A	0,436	N/A	1,60E+02	0,30	0,60
PMMA - Polymethylmethacrylate pellets	N/A	0,753	N/A	1,19E+02	0,10	0,40
PC - polycarbonate	N/A	0,729	N/A	1,17E+02	0,30	0,70
PU - Flexible polyurethane	N/A	0,348	N/A	1,13E+02	0,10	0,40
PUR - Rigid polyurethane	N/A	0,320	N/A	1,18E+02	0,10	0,40
ABS - Acrylonitrile Butadiene Styrene	N/A	0,306	N/A	1,11E+02	0,40	0,90
BR - Polybutadiene rubber	N/A	0,489	N/A	-	0,20	0,80
SPDM - Synthetic rubber	N/A	0,451	N/A	9,00E+01	0,20	0,80
Ceramic tile	N/A	0,239	N/A	2,37E+02	N/A	N/A
Barbotine	N/A	0,226	N/A	-	N/A	N/A
Glass	N/A	0,130	N/A	2,46E+02	N/A	N/A
Glass Fibre	N/A	0,302	N/A	1,86E+02	N/A	N/A

TABLEAU 11 INFORMATION PERTINENTE DU MATÉRIAU

Puis elle relie les procédés et les matériaux disponibles de la base de données ReCiPe, impliqués dans la conception du produit et génère ainsi une relation «Procédé-Matériau» (TABLEAU 12).

Function	Type	Process	Eco indicator	Family	Material	Range of section thickness [mm]	Production volume min [units/cock]	Tolerances [mm]
Shaping	Reduction	Turning	1,364	Metals	Aluminium alloy	0,2-300	1	0,015-0,4
Shaping	Reduction	Turning	4,502	Metals	Brass	0,2-300	1	0,015-0,4
Shaping	Reduction	Turning	0,595	Metals	Cast iron	0,2-300	1	0,015-0,4
Shaping	Reduction	Turning	0,529	Metals	Steel	0,2-300	1	0,015-0,4
Shaping	Reduction	Turning	1,557	Metals	Chromium steel 18/8	0,2-300	1	0,015-0,4
Shaping	Reduction	Drilling	1,345	Metals	Aluminium alloy	0,2-300	1	0,05-0,4
Shaping	Reduction	Drilling	1,332	Metals	Chromium steel 18/8	0,2-300	1	0,05-0,4
Shaping	Reduction	Drilling	4,487	Metals	Brass	0,2-300	1	0,05-0,4
Shaping	Reduction	Drilling	0,554	Metals	Cast iron	0,2-300	1	0,05-0,4
Shaping	Reduction	Drilling	0,517	Metals	Steel	0,2-300	1	0,05-0,4
Shaping	Reduction	Milling	1,371	Metals	Aluminium alloy	0,2-300	1	0,02-0,5
Shaping	Reduction	Milling	1,371	Metals	Brass	0,2-300	1	0,02-0,5
Shaping	Reduction	Milling	0,401	Metals	Cast iron	0,2-300	1	0,02-0,5
Shaping	Reduction	Milling	0,532	Metals	Steel	0,2-300	1	0,02-0,5
Shaping	Reduction	Milling	1,581	Metals	Chromium steel 18/8	0,2-300	1	0,02-0,5
Shaping	Deformation	Diecasting	13,730	Metals	Aluminium alloy	4-10	1	0,4-0,8
Shaping	Deformation	Castng	0,660	Metals	Aluminium alloy	1-75	1	0,05-0,25
Shaping	Deformation	Castng lost-wax	11,000	Metals	Aluminium alloy	3-999	1	0,5-3
Shaping	Deformation	Castng lost-wax	2,899	Metals	Steel	3-999	1	0,5-3
Shaping	Deformation	Castng	0,009	Metals	Brass	1-75	1	0,05-0,25
Shaping	Deformation	Injection moulding	0,136	Polymers	PA 6,6 - Polyamide - Nylon	0,4-6,3	1000	0,07-1
Shaping	Deformation	Injection moulding	0,136	Polymers	PE - Polyethylene	0,4-6,3	1000	0,07-1
Shaping	Deformation	Injection moulding	0,136	Polymers	PEHD - Polyethylene high density	0,4-6,3	1000	0,07-1
Shaping	Deformation	Injection moulding	0,136	Polymers	PBDD - Polyethylene low density	0,4-6,3	1000	0,07-1
Shaping	Deformation	Injection moulding	0,136	Polymers	PP - polypropylene	0,4-6,3	1000	0,07-1
Shaping	Deformation	Injection moulding	0,136	Polymers	PS - polystyrene	0,4-6,3	1000	0,07-1
Shaping	Deformation	Injection moulding	0,136	Polymers	PET - Polyethylene terephthalate	0,4-6,3	1000	0,07-1
Shaping	Deformation	Glass blowing	0,165	Ceramics	Glass	1,0-3,0	1	± 10
Shaping	Deformation	Blow moulding	0,169	Polymers	PA 6,6 - Polyamide - Nylon	0,4-3	1000	0,25-1
Shaping	Deformation	Blow moulding	0,169	Polymers	PE - Polyethylene	0,4-3	1000	0,25-1



TABLEAU 12 EXTRAIT DE "PROCÉDÉ-MATÉRIAU"

Ensuite, la relation entre les «Procédé-forme» a été réalisée, afin d'obtenir des caractéristiques de forme qui sont réalisables par les procédés de fabrication. (TABLEAU 13).

Avec cette relation, il est possible d'obtenir la relation indirecte de la «Forme - Matériau» (TABLEAU 14), à la fin, il est possible d'obtenir le TRIPLET «Matériau - Procédé - Forme» (TABLEAU 15) sous format Excel. L'annexe H précise tous les TRIPLETS de notre base de données.

Piece	Preferential axis	Transversal section	Thickness	Boundary	Details	Process
Hollow	Straight	Constant	Simple	Plane	without surface details	Injection moulding
<b>Hollow</b>	<b>Straight</b>	<b>Constant</b>	<b>Simple</b>	<b>Plane</b>	<b>without surface details</b>	<b>Extrusion</b>
Hollow	Straight	Constant	Simple	Plane	without surface details	Diecasting
<b>Hollow</b>	<b>Straight</b>	<b>Constant</b>	<b>Simple</b>	<b>Plane</b>	<b>with surface details</b>	<b>Casting</b>
Hollow	Straight	Constant	Simple	Plane	without surface details	Casting
<b>Hollow</b>	<b>Straight</b>	<b>Constant</b>	<b>Simple</b>	<b>Plane</b>	<b>without surface details</b>	<b>Impact extrusion, 1 stoke</b>
Hollow	Straight	Constant	Simple	Plane	with surface details	Diecasting
<b>Hollow</b>	<b>Straight</b>	<b>Constant</b>	<b>Simple</b>	<b>Plane</b>	<b>with surface details</b>	<b>Injection moulding</b>
Hollow	Straight	Constant	Simple	Curve	without surface details	Injection moulding
<b>Hollow</b>	<b>Straight</b>	<b>Constant</b>	<b>Simple</b>	<b>Curve</b>	<b>without surface details</b>	<b>Extrusion</b>
Hollow	Straight	Constant	Simple	Curve	without surface details	Diecasting
<b>Hollow</b>	<b>Straight</b>	<b>Constant</b>	<b>Simple</b>	<b>Curve</b>	<b>without surface details</b>	<b>Casting</b>
Hollow	Straight	Constant	Simple	Curve	with surface details	Casting
<b>Hollow</b>	<b>Straight</b>	<b>Constant</b>	<b>Simple</b>	<b>Curve</b>	<b>without surface details</b>	<b>Blow moulding</b>
Hollow	Straight	Constant	Simple	Curve	without surface details	Deep drawing
<b>Hollow</b>	<b>Straight</b>	<b>Constant</b>	<b>Simple</b>	<b>Curve</b>	<b>without surface details</b>	<b>Impact extrusion, 1 stoke</b>
Hollow	Straight	Constant	Simple	Curve	with surface details	Impact extrusion, 1 stoke
<b>Hollow</b>	<b>Straight</b>	<b>Constant</b>	<b>Simple</b>	<b>Curve</b>	<b>with surface details</b>	<b>Deep drawing</b>
Hollow	Straight	Constant	Simple	Curve	with surface details	Diecasting
<b>Hollow</b>	<b>Straight</b>	<b>Constant</b>	<b>Simple</b>	<b>Curve</b>	<b>with surface details</b>	<b>Injection moulding</b>
Hollow	Straight	Constant	Simple	Plane	with surface details	Deep drawing
<b>Hollow</b>	<b>Straight</b>	<b>Constant</b>	<b>Simple</b>	<b>Plane</b>	<b>with surface details</b>	<b>Impact extrusion, 1 stoke</b>
Hollow	Straight	Constant	Simple	Plane	without surface details	Deep drawing

TABLEAU 13 EXTRAIT "FORME-PROCÉDÉ"

Piece	Preferential axis	Transversal section	Thickness	Boundary	Details	Material
Hollow	Straight	Constant	Constant	Plane	without surface details	Steel
Hollow	Straight	Constant	Constant	Plane	without surface details	Aluminium alloy
Hollow	Straight	Constant	Constant	Curve	without surface details	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Straight	Constant	Constant	Plane	without surface details	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Curve	Constant	Constant	Plane	without surface details	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Curve	Constant	Constant	Curve	without surface details	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Curve	Variable	Constant	Plane	without surface details	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Curve	Variable	Constant	Plane	with surface details	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Straight	Variable	Constant	Curve	with surface details	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Straight	Variable	Constant	Curve	without surface details	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Curve	Variable	Constant	Curve	with surface details	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Curve	Variable	Constant	Curve	without surface details	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Straight	Constant	Constant	Curve	without surface details	PE - Polyethylene
Hollow	Straight	Constant	Constant	Plane	without surface details	PE - Polyethylene
Hollow	Curve	Constant	Constant	Plane	without surface details	PE - Polyethylene
Hollow	Curve	Constant	Constant	Curve	without surface details	PE - Polyethylene
Hollow	Curve	Variable	Constant	Plane	with surface details	PE - Polyethylene
Hollow	Straight	Variable	Constant	Curve	with surface details	PE - Polyethylene
Hollow	Straight	Variable	Constant	Curve	without surface details	PE - Polyethylene
Hollow	Curve	Variable	Constant	Curve	with surface details	PE - Polyethylene
Hollow	Curve	Variable	Constant	Plane	without surface details	PE - Polyethylene
Hollow	Curve	Variable	Constant	Plane	with surface details	PE - Polyethylene
Hollow	Straight	Constant	Constant	Curve	without surface details	PEHD - Polyethylene high density
Hollow	Straight	Constant	Constant	Plane	without surface details	PEHD - Polyethylene high density
Hollow	Curve	Constant	Constant	Plane	without surface details	PEHD - Polyethylene high density
Hollow	Curve	Constant	Constant	Curve	without surface details	PEHD - Polyethylene high density
Hollow	Curve	Variable	Constant	Plane	without surface details	PEHD - Polyethylene high density
Hollow	Curve	Variable	Constant	Plane	with surface details	PEHD - Polyethylene high density
Hollow	Straight	Variable	Constant	Curve	with surface details	PEHD - Polyethylene high density
Hollow	Straight	Variable	Constant	Curve	without surface details	PEHD - Polyethylene high density
Hollow	Curve	Variable	Constant	Curve	with surface details	PEHD - Polyethylene high density

TABLEAU 14 EXTRAIT "FORME-MATÉRIAU"

Pièce	Preferential axis	Transversal section	Thickness	Boundary	Details	Process	Process Eco indicator	Material
Hollow	Straight	Constant	Constant	Flanc	without surface details	Bending	0,0070	Steel
Hollow	Straight	Constant	Constant	Flanc	without surface details	Bending	0,0401	Aluminium alloy
Hollow	Straight	Constant	Constant	Curve	without surface details	Blow moulding	0,169	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Straight	Constant	Constant	Flanc	without surface details	Blow moulding	0,169	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Curve	Constant	Constant	Flanc	without surface details	Blow moulding	0,169	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Curve	Constant	Constant	Curve	without surface details	Blow moulding	0,169	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Curve	Variable	Constant	Flanc	without surface details	Blow moulding	0,169	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Curve	Variable	Constant	Flanc	with surface details	Blow moulding	0,169	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Straight	Variable	Constant	Curve	with surface details	Blow moulding	0,169	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Straight	Variable	Constant	Curve	without surface details	Blow moulding	0,169	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Curve	Variable	Constant	Curve	with surface details	Blow moulding	0,169	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Curve	Variable	Constant	Curve	without surface details	Blow moulding	0,169	PA 6,6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Straight	Constant	Constant	Curve	without surface details	Blow moulding	0,169	PE - Polyethylene
Hollow	Straight	Constant	Constant	Flanc	without surface details	Blow moulding	0,169	PE - Polyethylene
Hollow	Curve	Constant	Constant	Flanc	without surface details	Blow moulding	0,169	PE - Polyethylene
Hollow	Curve	Constant	Constant	Curve	without surface details	Blow moulding	0,169	PE - Polyethylene
Hollow	Curve	Variable	Constant	Flanc	without surface details	Blow moulding	0,169	PE - Polyethylene
Hollow	Curve	Variable	Constant	Flanc	with surface details	Blow moulding	0,169	PE - Polyethylene
Hollow	Straight	Variable	Constant	Curve	with surface details	Blow moulding	0,169	PE - Polyethylene
Hollow	Straight	Variable	Constant	Curve	without surface details	Blow moulding	0,169	PE - Polyethylene
Hollow	Curve	Variable	Constant	Curve	with surface details	Blow moulding	0,169	PE - Polyethylene
Hollow	Curve	Variable	Constant	Curve	without surface details	Blow moulding	0,169	PE - Polyethylene
Hollow	Straight	Constant	Constant	Curve	without surface details	Blow moulding	0,169	PE HD - Polyethylene high density
Hollow	Straight	Constant	Constant	Flanc	without surface details	Blow moulding	0,169	PE HD - Polyethylene high density
Hollow	Curve	Constant	Constant	Flanc	without surface details	Blow moulding	0,169	PE HD - Polyethylene high density
Hollow	Curve	Constant	Constant	Curve	without surface details	Blow moulding	0,169	PE HD - Polyethylene high density
Hollow	Curve	Variable	Constant	Flanc	without surface details	Blow moulding	0,169	PE HD - Polyethylene high density
Hollow	Curve	Variable	Constant	Flanc	with surface details	Blow moulding	0,169	PE HD - Polyethylene high density
Hollow	Straight	Variable	Constant	Curve	with surface details	Blow moulding	0,169	PE HD - Polyethylene high density
Hollow	Straight	Variable	Constant	Curve	without surface details	Blow moulding	0,169	PE HD - Polyethylene high density

TABLEAU 15 EXTRAIT "TRIPLET"

### 3.5.4. VALIDATION PRELIMINAIRE DU TRIPLET

Une fois construite et complétée la base de données et connaissant les différents TRIPLETS possibles, une validation a été réalisée sur 30 pièces (FIGURE 97). L'idée principale de cette validation a été d'utiliser la base de données pour trouver un TRIPLET cohérent pour chaque pièce.



FIGURE 97 EXTRAIT PIECES ANALYSEES

Par exemple, pour la pièce « carter en matière plastique » (FIGURE 98) nous pouvons utiliser l'opération « sélection » de l'algèbre relationnelle.



FIGURE 98 EXEMPLE DE PIÈCE ANALYSÉE

Nous implémentons une sélection dans la Base de Données des TRIPLETS ( $Bdd_{TRIPLETS}$ ), par exemple, avec le filtre de la forme ( $\sigma_{S_1}$ ) fixé avec la référence pour la pièce d'exemple, et nous obtenons une matrice de résultats  $R$  avec  $n$  résultats:

$$\sigma_{(p_x=\text{Hollow}, a_x=\text{Straight}, s_x=\text{Variable}, e_x=\text{Variable}, c_x=\text{Curve}, d_x=\text{Without details})}(Bdd_{TRIPLETS}) = R$$

Ce filtre avec ces caractéristiques de forme ( $S_{P_2}$ ), permet au concepteur d'obtenir les procédés possibles ( $S_{P_2}$ ), par filtrage dans la base de données et en obtenant par les fonctions de « Projection », les résultats suivants:

$$\begin{aligned} \pi_{Np} R &= (\text{Casting, Casting\_lost\_wax, Diecasting, Injection\_Moulding, Milling}) \\ \pi_{Nm} R &= (\text{Aluminium\_alloy, Brass, Steel, Pa, PE, PEHD, PELD, PP, PS, PET, Cast\_iron, Chromium\_steel}) \end{aligned}$$

D'après ces équations, le TABLEAU 16 permet de les visualiser où nous trouvons des procédés comme : fonderie sous pression, fonderie, fonderie à cire perdue, Injection et fraisage comme procédé d'enlèvement de matière pour arrive a la forme définie. Nous obtenons également des matériaux ( $M_i$ ) possibles comme : alliage d'aluminium, laiton, acier, polymères comme PA, PE, PEHD, PELD, PP, PS, PET, etc.

Forme						Process	Material
Pièce	Preferential axis	Transversal section	Thickness	Boundary	Details	Process	Material
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Casting	Aluminium alloy
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Casting	Brass
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Casting lost-wax	Aluminium alloy
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Casting lost-wax	Steel
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Die casting	Aluminium alloy
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Injection moulding	PA 6.6 - Polyamide - Nylon
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Injection moulding	PE - Polyethylene
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Injection moulding	PEHD - Polyethylene high density
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Injection moulding	PELD - Polyethylene low density
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Injection moulding	PP - polypropylene
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Injection moulding	PS - polystyrene
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Injection moulding	PET - Polyethylene terephthalate
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Injection moulding	Glass Fibre
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Milling	Aluminium alloy
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Milling	Brass
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Milling	Cast iron
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Milling	Steel
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Milling	Chromium steel 1.8/8

TABLEAU 16 EXEMPLE DU TRIPLET FILTRÉ PAR  $F_i$

Si le concepteur veut réduire ses variables, il peut sélectionner par exemple un procédé comme l'injection de plastiques et il obtiendra, seulement les matériels pour cette forme avec ce procédé (voir TABLEAU 17).

Piece	Forme					Process	Material
	Preferential axis	Transversal section	Thickness	Boundary	Details	Process	Material
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Injection moulding	PA 6,6- Polyamide- Nylon
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Injection moulding	PE- Polyethylene
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Injection moulding	PBHD - Polyethylene high density
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Injection moulding	PELD - Polyethylene low density
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Injection moulding	PP- polypropylene
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Injection moulding	PS- polystyrene
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Injection moulding	PET - Polyethylene terephthalate
Hollow	Straight	Variable	Variable	Curve	without surface details	Injection moulding	Glass Fibre

TABLEAU 17 TRIPLET TROUVEE

La base de données construite peut continuer à être alimentée selon les progressions technologiques et la connaissance de nouveaux indicateurs environnementaux.

Une fois que le concepteur a obtenu son TRIPLET qui satisfait ses nécessités de conception, il a certain les indicateurs de base pour estimer l'impact environnemental (*Ei*). Nous devons maintenant préciser les données dimensionnelles et préciser les procédés de finition. C'est ce qui sera regroupé dans ce que nous appellerons le « tableau de description du concept DCT ».

### 3.6. TABLEAU DE DESCRIPTION DU CONCEPT « DCT »

On dispose maintenant des informations et des données dimensionnelles qui décrivent le volume  $v_i$ . Pour pouvoir exprimer complètement l'impact environnemental  $Ei$ , il nous est nécessaire d'associer à cette description les caractérisations  $A_j$  de certains procédés additionnels :

- Le nombre de pliages et section du pliage
- Le nombre de cisailages
- Le nombre de sciages

Cette description du volume, la définition de procédés d'enlèvement de matière (Perçage, tournage et fraisage) et la description de procédés supplémentaires (pliages, cisailages ou sciage) constitue le tableau de description du concept DCT (FIGURE 99). Si le concepteur fait un analyse d'un produit qui est composé de deux parties soudées, il devra définir le périmètre du cordon de soudure.

FIGURE 99 TABLEAU DE DESCRIPTION DU CONCEPT DCT

Le DCT recèle d'autres informations que le concepteur va pouvoir utiliser. En effet, nous lui avons demandé de choisir un Solide de Base « BS », il a donc commencé à concevoir. D'autre part le DCT définit aussi les différents perçages qu'il doit effectuer sur la pièce. Nous allons voir, dans le chapitre 04, que nous allons proposer l'utilisation de ces éléments du DCT dans la méthode de conception.

### 3.7. ESTIMATION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL AVEC LA BASE DE DONNEES PROPOSEE

L'estimation de l'impact s'appuie sur la base de données proposée (TABLEAU 15) dont les valeurs sont issues de la base d'éco indicateurs ReCiPe à partir du Vecteur de Cohérence (section 3.5.1). L'impact global (24) est la somme de l'impact dû au matériau sélectionné et de tous les impacts dus aux différents procédés, celui qui réalise le solide de base et ceux que nous additionnons pour réaliser la pièce complète. Les procédés additionnels sont énumérés et qualifiés par le DCT. Cela concerne les procédés d'enlèvement de matière (perçage, tournage, fraisage), les procédés de pliage, de sciage et de cisailage, puis, le soudage procédé d'interaction pour les pièces soudées.

$$E_i = [m_{SB} * in_M] + [m_{SB} * in_P] + [m_{RM} * in_D] + [m_{\%T} * in_T] + [m_{\%M} * in_M] \quad (24) \\ + [A_B * in_B] + [A_S * in_S] + [A_{sw} * in_{sw}] + [p_W * in_W]$$

où:

$m_{SB}$ : masse du Solide de Base

$in_M$ : Indicateur ReCiPe du matériau sélectionné

$in_P$ : Indicateur ReCiPe du procédé sélectionné

$m_{RM}$ : masse de matière enlevée

$in_D$ : Indicateur ReCiPe du perçage

$m_{\%T}$ : pourcentage en masse de matière enlevée par tournage

$in_T$ : Indicateur ReCiPe du tournage

$m_{\%M}$ : pourcentage en masse de matière enlevée par fraisage

$in_M$ : Indicateur ReCiPe du fraisage

$A_B$ : Section du pliage

$in_B$ : Indicateur ReCiPe de pliage

$A_S$ : Nombre de cisaillement

$in_S$ : Indicateur du cisailage

$A_{sw}$ : Nombre de sciage

$in_{sw}$ : Indicateur du sciage

$p_W$ : périmètre de soudage

$in_W$ : Indicateur ReCiPe du soudage

L'équation (24) peut être décomposée en 4 parties:

I. Solide de base

- Impact matériau (25) :

$$\text{Material impact} = [m_{SB} * in_M] \quad (25)$$

- Impact de réalisation du solide de base (26) :

$$\text{Process impact} = [m_{SB} * in_P] \quad (26)$$

II. Enlèvement de matière

- Impact du perçage (27) :

$$\text{Drilling impact} = [m_{RM} * in_D] \quad (27)$$

- Impact du tournage (28) :

$$\text{Tourning impact} = [m_{\%T} * in_T] \quad (28)$$

- Impact du fraisage (29) :

$$\text{Milling impact} = [m_{\%M} * in_M] \quad (29)$$

III. Procédés supplémentaires

- Impact du pliage (30) :

$$\text{Bending impact} = [A_B * in_B] \quad (30)$$

- Impact du cisailage (31) :

$$\text{Shearing impact} = [A_S * in_S] \quad (31)$$

- Impact du sciage (32) :

$$\text{Sawing impact} = [A_{sw} * in_{sw}] \quad (32)$$

IV. Procédé d'interaction : soudage

- Impact du soudage (33) :

$$\text{Welding impact} = [p_W * in_W] \quad (33)$$

L'équation initiale d'impact environnemental a évolué vers l'équation **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, en incluant les procédés d'enlèvement de matière et les procédés supplémentaires. Ainsi, nous avons amélioré la précision du calcul de l'impact.

### 3.8. OUTIL « ECOTRIAL » – L'ESTIMATION ASSISTÉE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Pour réaliser d'une manière dynamique et systématique un processus de conception avec notre outil, nous avons développé un outil, à travers d'une application web simple (FIGURE 100) dénommée «ECOTRIAL», pour une vérification rapide et compréhensible de la méthode.

Derrière tout développement de logiciels, il y a toujours un processus impliquant une série de mesures à prendre afin que nous puissions parvenir à un produit de qualité. Dans l'annexe F, nous avons donné la description technique de l'application.

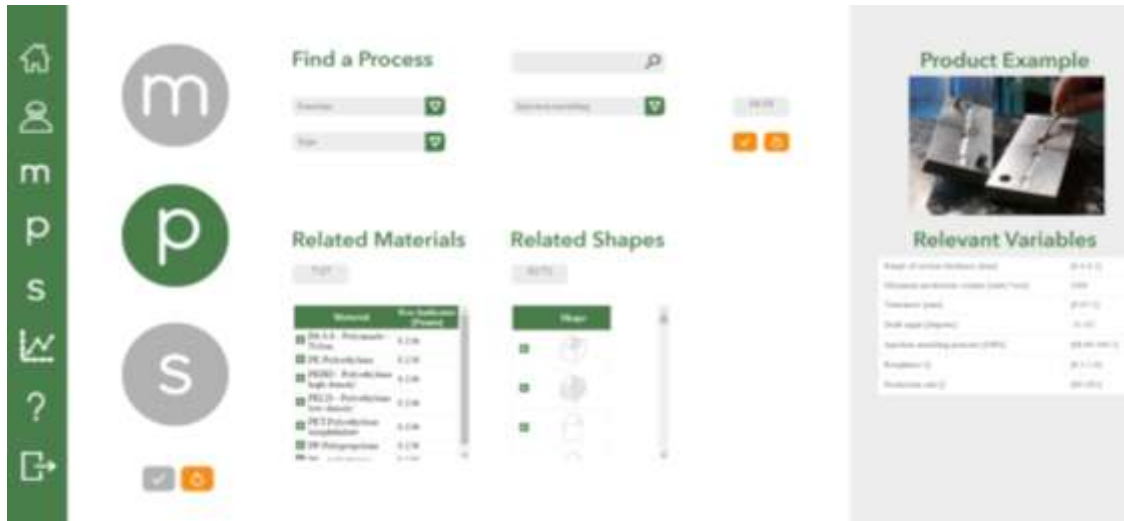


FIGURE 100 ENVIRONNEMENT DU LOGICIEL « ECOTRIAL»

Différents tests ont été réalisés pour vérifier l'utilisabilité avec des groupes d'élèves ingénieurs.

Après avoir défini le Vecteur de Cohérence et la façon comme le concepteur peut trouver son TRIplet et estimer l'impact du produit, il reste maintenant à l'intégrer dans le processus de conception.

Nous voulons définir une logique de conception s'appuyant sur le TRIplet et le tableau de description (DCT) pour constituer une réelle aide à la conception. Elle est proposée dans le chapitre suivant.

### 3.9. CONCLUSION

Nous avons réalisé, dans ce chapitre, le socle sur lequel s'appuiera notre méthode de conception.

Nous avons défini tous les éléments pour décrire notre TRIplet :

- Une classification des matériaux,
- Une classification des procédés,
- Une taxonomie de forme.

Ces éléments sont regroupés dans une base de données structurée par un vecteur de cohérence. La construction du vecteur est liée à la base ReCiPe et à notre taxonomie de forme. Cette vecteur intègre les limites de la base ReCiPe. Mais il pourra évoluer en fonction de l'évolution de la base.

Notre proposition de taxonomie de forme a été qualifiée par différents tests, cependant il sera sûrement utile d'associer en tutoriel à la taxonomie.

L'expression de l'impact environnemental demande la connaissance du volume des pièces analysées et de caractéristiques liées à des procédés particuliers. Ces éléments sont regroupés dans le tableau de description de concept DCT. Pour réaliser ce tableau, il est demandé au

Aide à la décision en conception préliminaire par l'estimation des impacts environnementaux

concepteur de choisir un Solide de Base BS qui pourra être ultérieurement en phase de conception.

L'outil ECOTRIAL gère la base de données à partir du vecteur de cohérence. Il permet donc d'associer matériau, procédé et forme pour constituer les TRIPLETS possible selon ReCiPe et notre taxonomie de forme. Il propose un écran ergonomique pour définir le DCT. Il estime alors automatiquement l'impact environnemental.