

CHAPITRE : LES PROCÉDES DE MISE EN FORME

Ce qu'il faut savoir

Les procédés de mise ayant une incidence directe sur les caractéristiques morphologiques et mécaniques des pièces, il est nécessaire de connaître les principes physiques et technologiques de ceux-ci afin de concevoir efficacement nos produits.

Le choix d'un procédé de mise en forme est fonction du matériau retenu et des caractéristiques produit. En effet, chaque procédé dépend d'une famille de matériaux et impose ses règles de tracé. De la même manière, les caractéristiques pièces peuvent imposer un procédé.

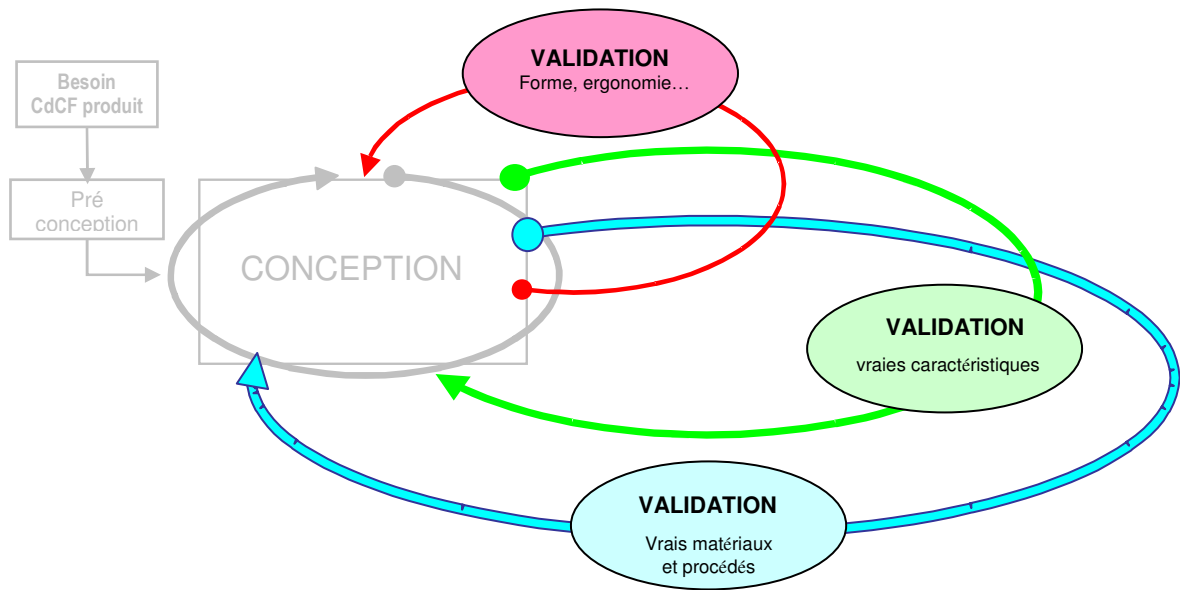
Exemple :

- Le procédé de forgeage est retenu pour la fabrication d'essieu de camion car il améliore les caractéristiques mécaniques du matériau.
- Le procédé d'injection plastique est retenu pour la fabrication de coque de téléphone portable car il permet de grande cadence de production à faible coût.

D'autre part, les procédés peuvent être associés :

Exemple :

- Une obtention de pièce en fonderie, puis une reprise en usinage.
- Une obtention de pièce en frittage laser métal puis rectification.



CHAPITRE : LES PROCEDES DE MISE EN FORME..... 1

I. Typologie des procédés..... 3

II. Classification des procédés de mise en forme..... 4

III. Identification des procédés en fonction du matériau et du programme de production..... 5

IV. Réalisation par enlèvement de matière 6

1. Usinage à l’outil coupant 7

2. Usinage par étincelage 11

3. Usinage par abrasion..... 15

V. Réalisation par ajout de matière 17

VI. Réalisation par moulage 22

1. Fonderie à cire perdue..... 23

2. Injection plastique..... 27

3. MIM..... 30

4. Coulée sous vide 31

5. Mise en œuvre des composites **Erreur ! Signet non défini.**

VII. Réalisation par déformation 33

1. Matricage – Estampage..... 34

2. Découpage - Cambrage - Emboutissage 36

3. Thermoformage 38

VIII. Aspect économique des procédés 39

Identification des paramètres..... 39

Notion de performance économique 40

IX. Gestion des déchets 41

Fiche Ressource : Performances géométriques et économiques des procédés. 42

I. Typologie des procédés

On peut classer les procédés en trois catégories suivant le degré de finition de la pièce :

- Primaire : Mise en forme à partir d'un semi-produit
- Secondaire : Mise en forme de surface fonctionnelle
- Tertiaire : Augmente la qualité pièce (polissage)

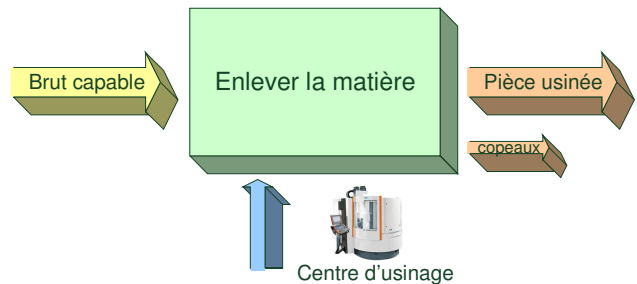
Exemple :

II. Classification des procédés de mise en forme

On entend par procédé de mise en forme tout moyen permettant de passer du virtuel au réel.
On peut classer les procédés dans quatre familles suivant la méthode de mise en forme.

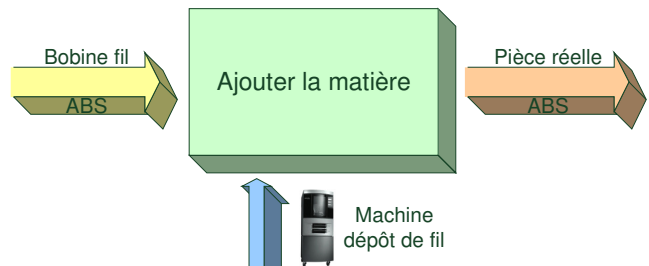
1. Par enlèvement de matière

On part d'un bloc, et on crée les formes de la pièce en enlevant la matière à l'aide d'un outil
Exemple : usinage



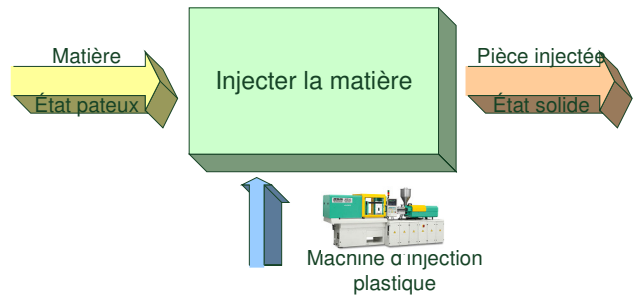
2. Par ajout de matière

On part d'un plateau vide, et on ajoute de la matière pour créer la pièce.
Exemple : dépôt de fil abs



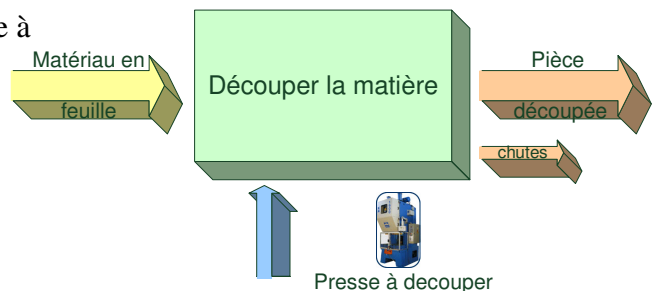
3. Par transformation (moulage)

On coule la matière à l'état liquide ou pâteux dans un moule, et on obtient la pièce après solidification.
Exemple : Injection plastique



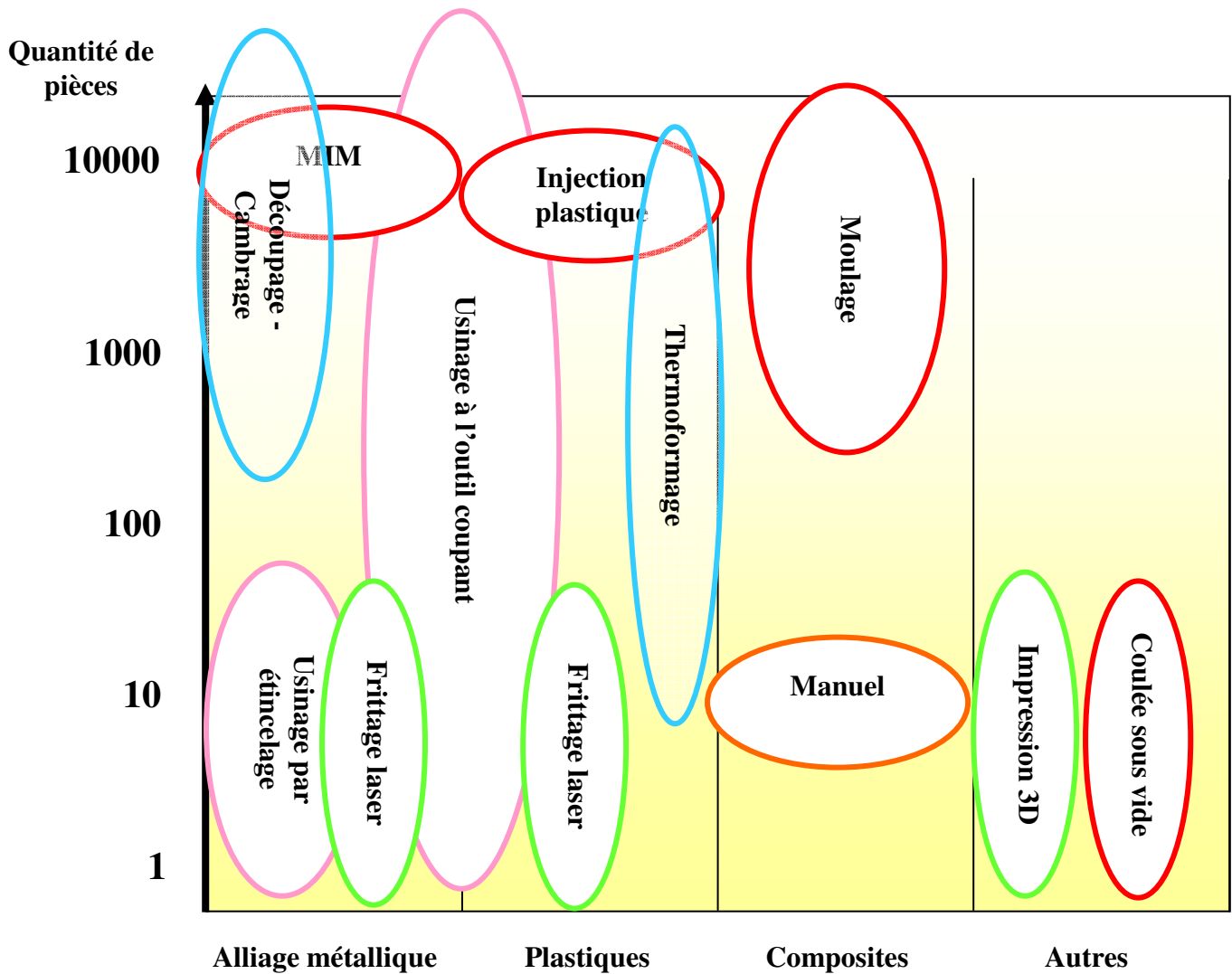
4. Par déformation

On part d'un matériau en feuille que l'on déforme à l'aide d'un outillage spécifique.
Exemple : Découpage



III. Identification des procédés en fonction du matériau et du programme de production

Chaque procédé dépend essentiellement du matériau et du nombre de pièce à réaliser. On retrouve ainsi le triptyque **Produit – Matériau – Procédé**.



IV. Réalisation par enlèvement de matière

Les procédés de réalisation pas enlèvement de matière les plus courant sont :

- L'usinage à l'outil coupant
- L'électroérosion (usinage par étincelage)
- L'enlèvement de matière par abrasion



L'usinage à l'outil coupant regroupe les opérations de fraisage, de tournage et de perçage. La mise en œuvre se fait sur des machines spécifiques (centre de tournage ou centre de fraisage) ou sur des machines à cinématique « multiprocess » (Tournage et fraisage).



L'usinage par étincelage regroupe l'électroérosion par enfonçage et l'électroérosion à fil. Le premier consiste à reproduire l'empreinte d'une électrode et le second utilise un fil de laiton dont le parcours constitue le contour de la pièce.

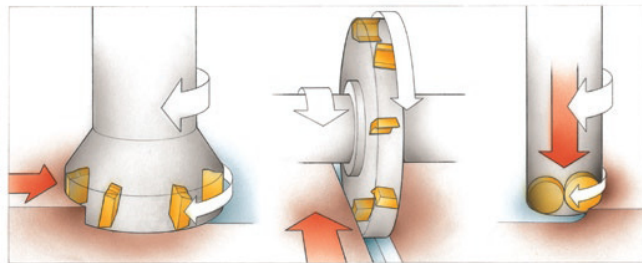
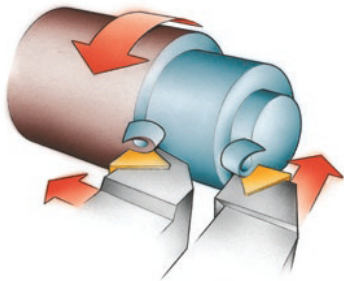
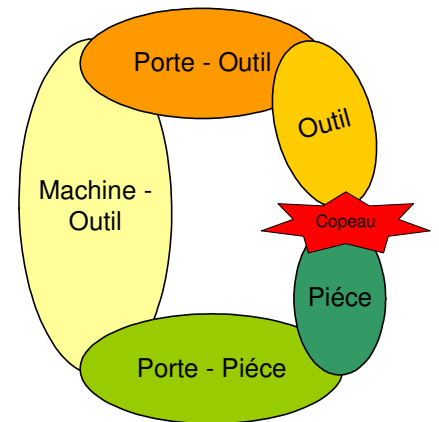


1. Usinage à l'outil coupant

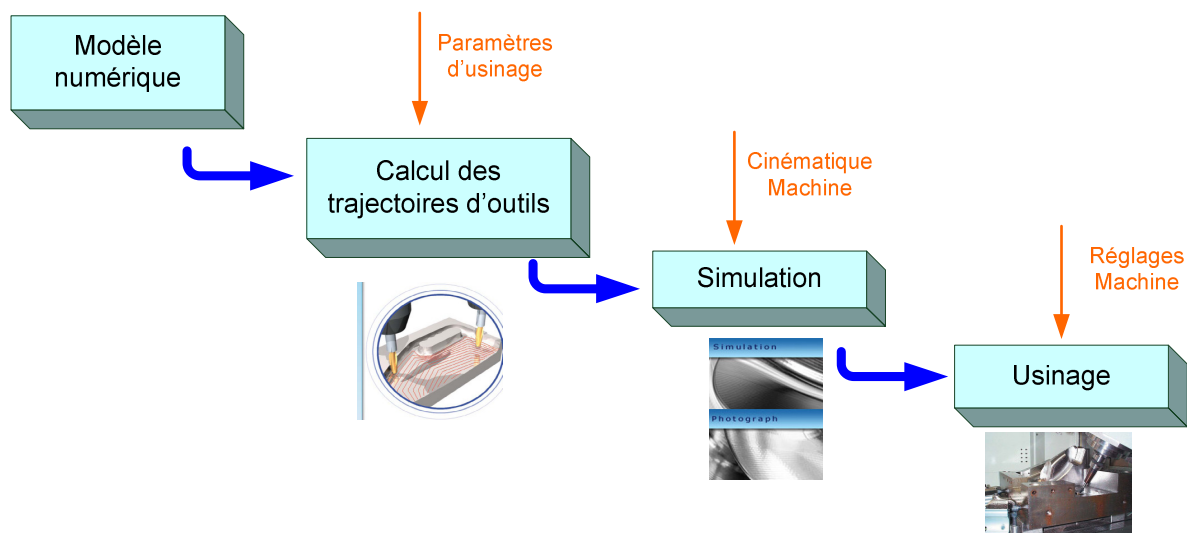
Principe général

Pour réaliser un usinage il est nécessaire que l'outil et la pièce soient animés de mouvements adaptés. Ainsi, au contact de la pièce et de l'outil, en fonction des vitesses de déplacement, des trajectoires choisies, se crée un copeau provenant de la pièce usinée.

Cette cellule d'usinage se compose d'une **machine outil**, d'un ensemble **porte-outil – outil** et d'un ensemble **porte pièce – pièce**.



A partir du modèle numérique de la pièce et d'un logiciel de **Fabrication assisté par ordinateur**, l'opérateur génère les parcours d'outils en précisant les différents paramètres de l'usinage. Le logiciel génère alors un fichier à télécharger dans la machine permettant la réalisation de la pièce.

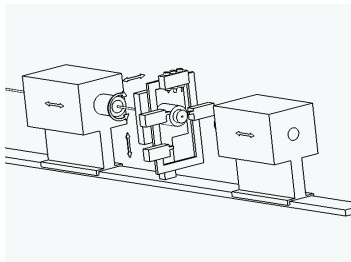


Caractéristiques cinématiques et géométriques des moyens

Il existe principalement deux grandes familles de cinématique.

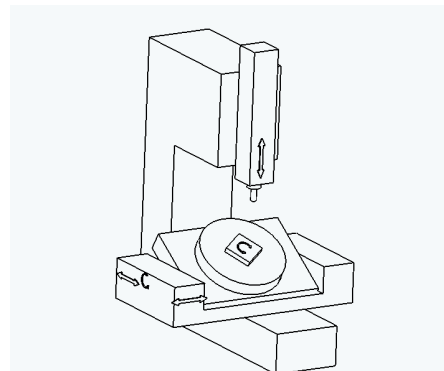
- **Cinématique tournage**

Cette cinématique permet l'obtention de pièce de révolution.
Le mouvement de rotation est donné à la pièce.



- **Cinématique fraisage**

Cette cinématique permet l'obtention de pièce prismatique.
Le mouvement de rotation est donné à l'outil.



- **Cinématique multiprocédé**

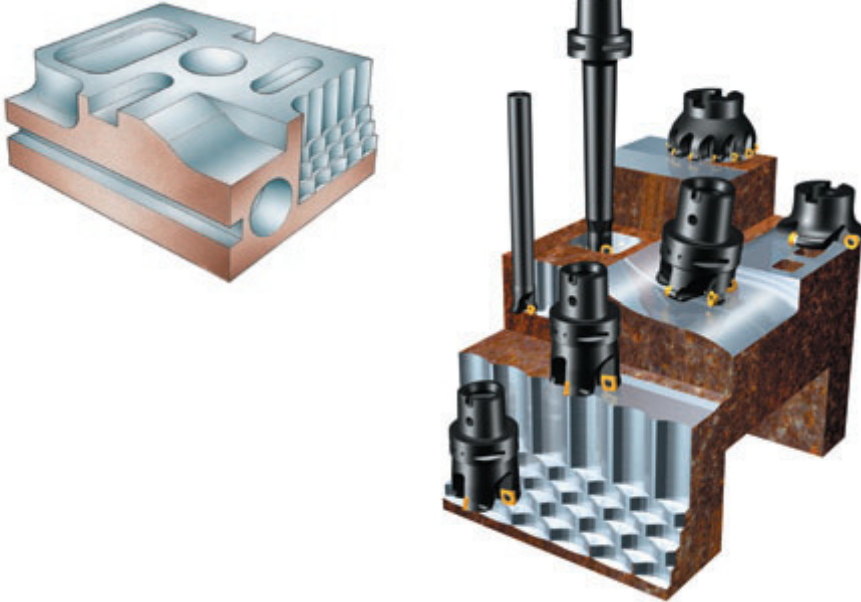
Des machines alliant cinématique tournage et fraisage permettent l'usinage de pièce complexe sans démontage de pièce. Elles peuvent être à dominante tournage ou perçage.



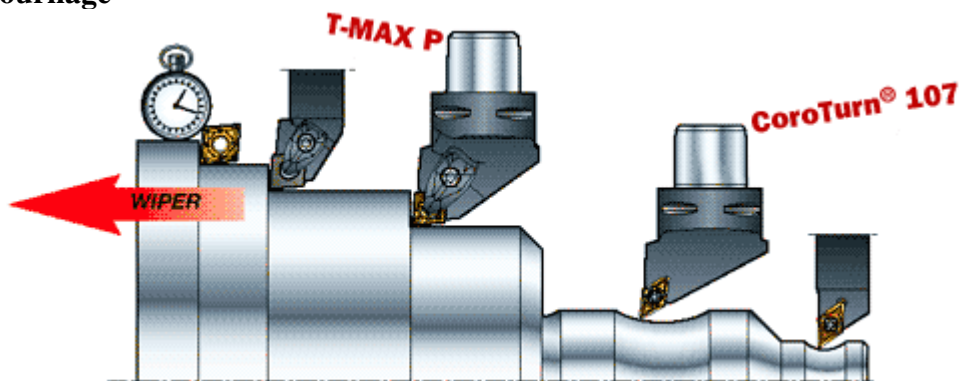
Morphologique des pièces obtenues

On classe les formes usinables en 3 catégories:

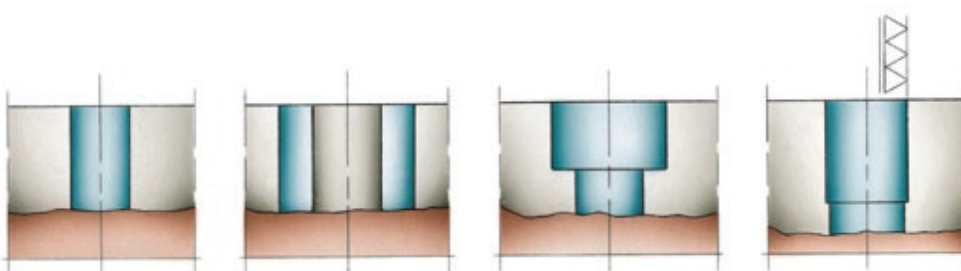
- **Fraisage**



- **Tournage**



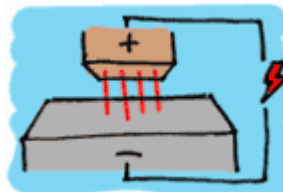
- **Perçage**







2. Usinage par étincelage

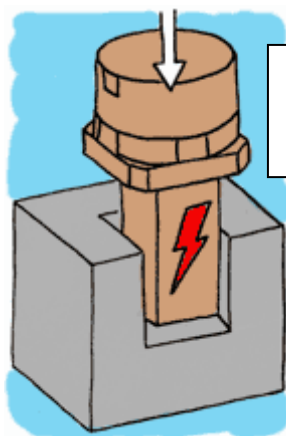
Principe général

L'électroérosion est un procédé d'usinage qui consiste à enlever de la matière dans une pièce en utilisant des décharges électriques comme moyen d'usinage. Cette technique se caractérise par son aptitude à usiner tous les matériaux conducteurs de l'électricité (métaux, alliages, carbures, graphites, etc.) quelle que soit leur dureté.

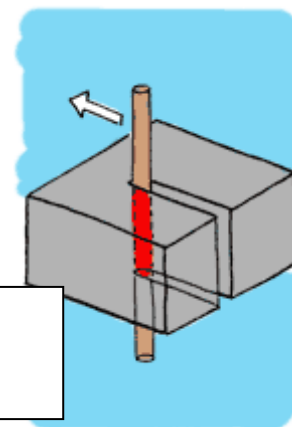


-  Une électrode
-  Une pièce
-  Du diélectrique
-  De l'électricité

On distingue deux procédés d'enlèvement de matière basé sur le principe de l'usinage par étincelage : **L'enfonçage** et **l'électroérosion à fil**

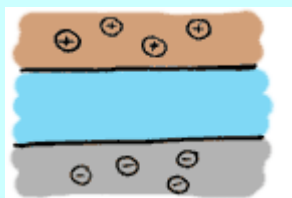


Enfonçage :
Reproduction de l'empreinte dans la pièce

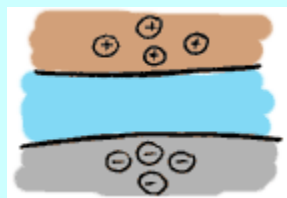


Fil:
Le parcours du fil décrit la forme de la pièce

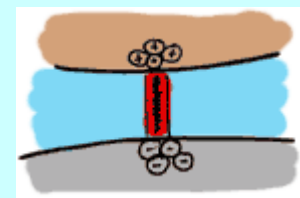
Principe physique : On reproduit artificiellement le principe de la foudre.



1 Approche de l'électrode vers la pièce. Les deux éléments sont sous tension.



2 Concentration du champ électrique vers le point où l'espace électrode-pièce est le plus faible.

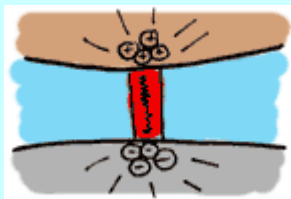
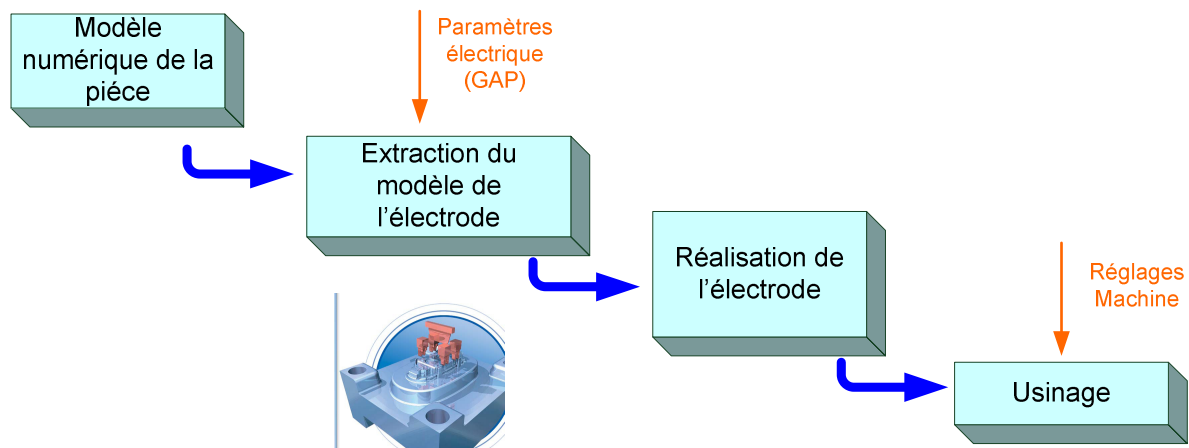


3 Création d'un canal ionisé entre l'électrode et la pièce

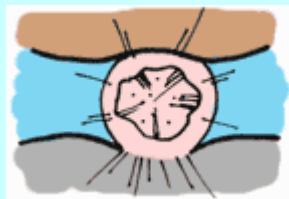


Mise en œuvre du procédé :

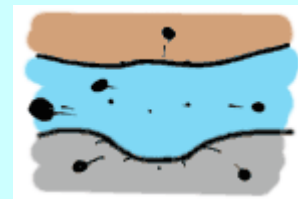
- **En électroérosion à fil** la mise en œuvre est basée sur le modèle numérique, et on génère la trajectoire du fil à l'aide d'un logiciel de FAO de la même manière qu'en fraisage.
- **En enfonçage**, il s'agit de concevoir puis de réaliser l'électrode, généralement en usinage.



4 Claquage de l'étincelle. La matière de la pièce fusionne localement, se



5 Coupure du courant. Implosion de l'étincelle. subit une faible usure.



6 Evacuation des particules métalliques par subit une faible usure.

Caractéristiques cinématiques et géométriques des moyens

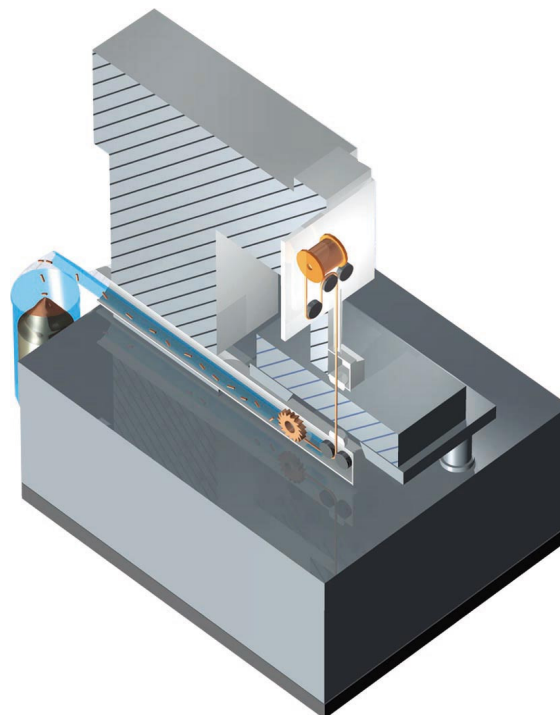
Une machine d'usinage par électroérosion comprend, par conséquent, les éléments suivants:

- -un bâti comportant un bac d'usinage au fond duquel se trouve une table porte-pièce animée suivant deux axes numérisés. Solidaire du bâti, la tête d'usinage possède un troisième axe qui contrôle le mouvement d'avance du porte-électrode en direction de la table;
- -un générateur qui délivre des impulsions de tension donnant lieu aux étincelles;
- -un ensemble constitué d'un bac, d'une pompe et de filtres pour le stockage, la circulation et le recyclage du liquide diélectrique.

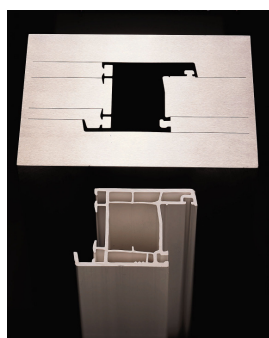


Des machines spécialisées dans le perçage rapide de matériaux durs utilisent le principe de l'électroérosion par enfonçage avec des électrodes tubulaires de faible diamètre et de grandes longueurs.

Les machines d'électroérosion à fil, possèdent quatre axes numérisés permettant d'incliner le fil. Ce qui permet l'obtention de pièces complexes. Le cinquième axe assurant la hauteur du guide fil supérieur peut également être numérisé.



Morphologique des pièces obtenues

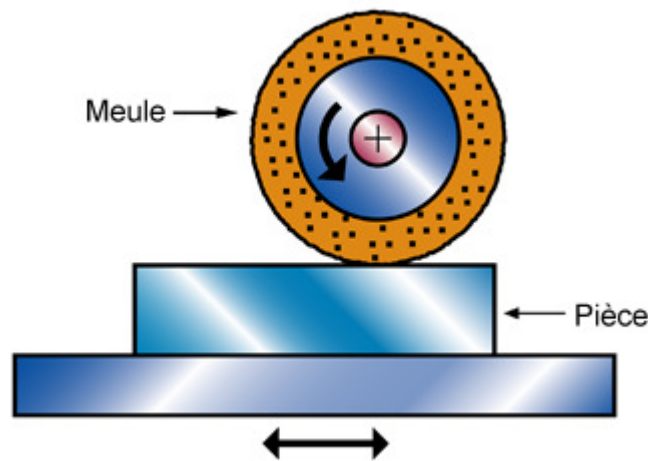


3. Usinage par abrasion

Il existe beaucoup de procédés de mise en forme basée sur le principe d'usinage par abrasion et notamment les procédés de rectification.

Le principe est d'utiliser une meule animée d'un mouvement de rotation et de faire translater la pièce afin d'enlever une fine couche de matière (environ 0,02 mm).

Ces procédés ne permettent pas de mettre en forme la pièce, mais sont utilisés afin d'améliorer les caractéristiques géométriques d'une surface fonctionnelle.

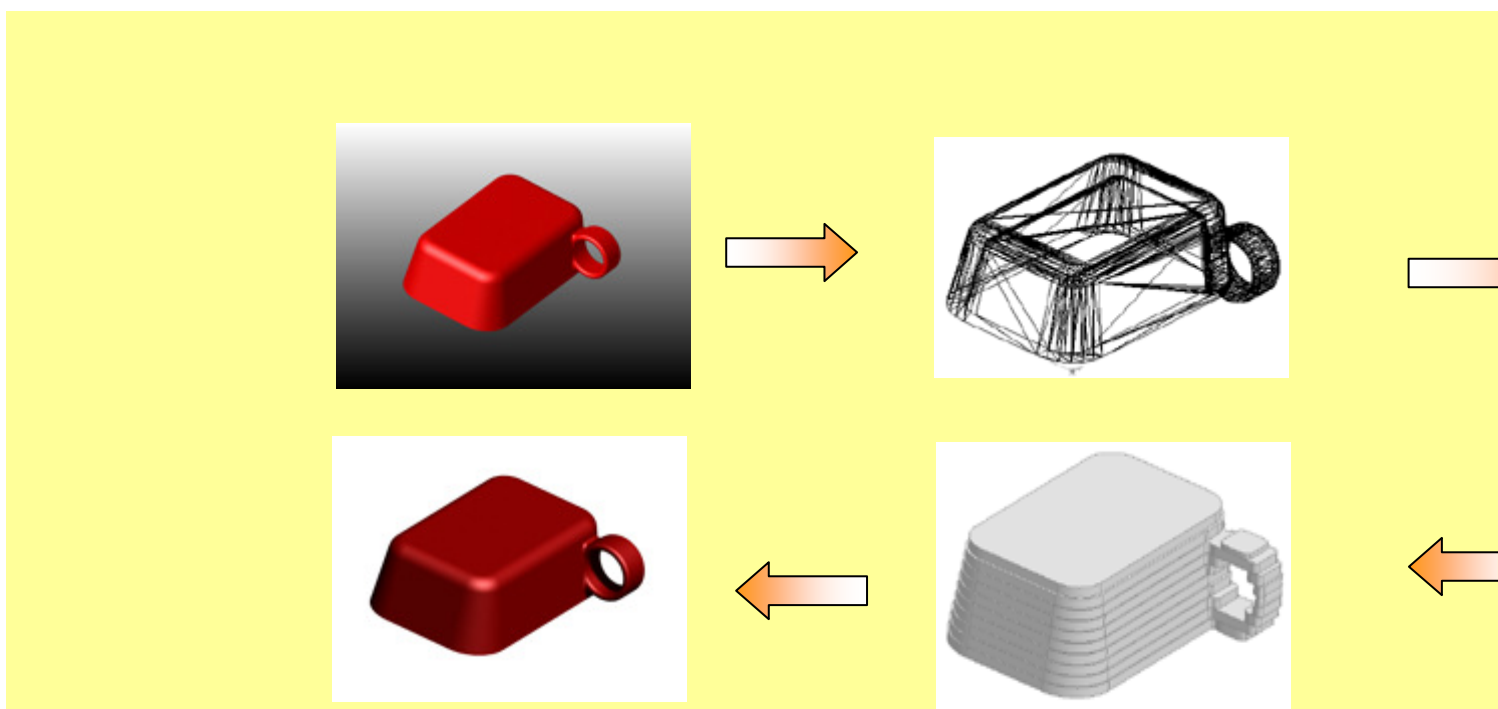
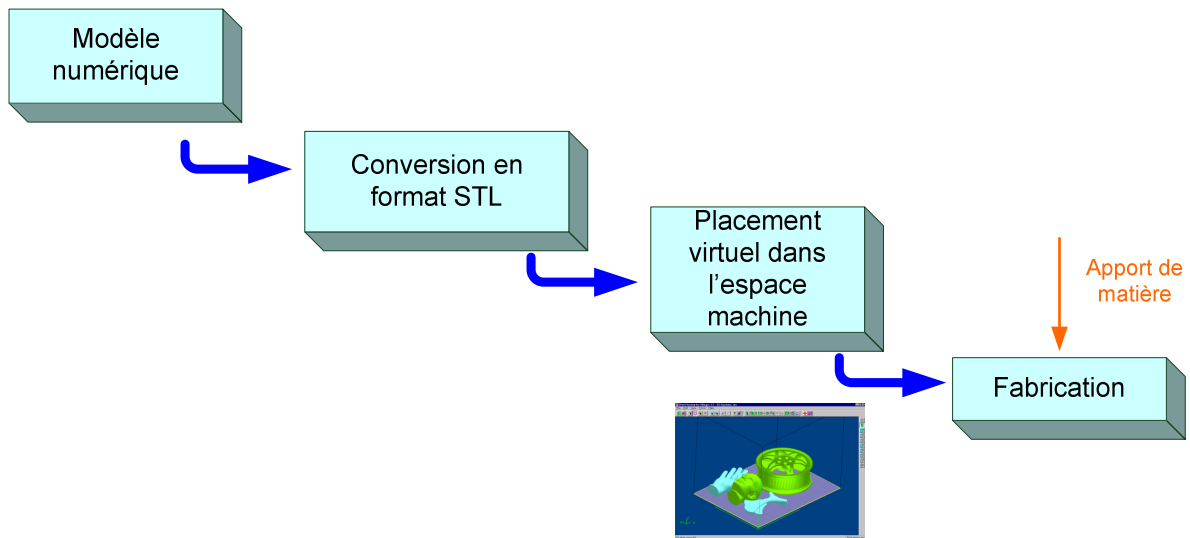


Ce procédé permet, dans les matériaux métalliques même très durs, d'obtenir des qualités géométriques et micro-géométriques très élevées.

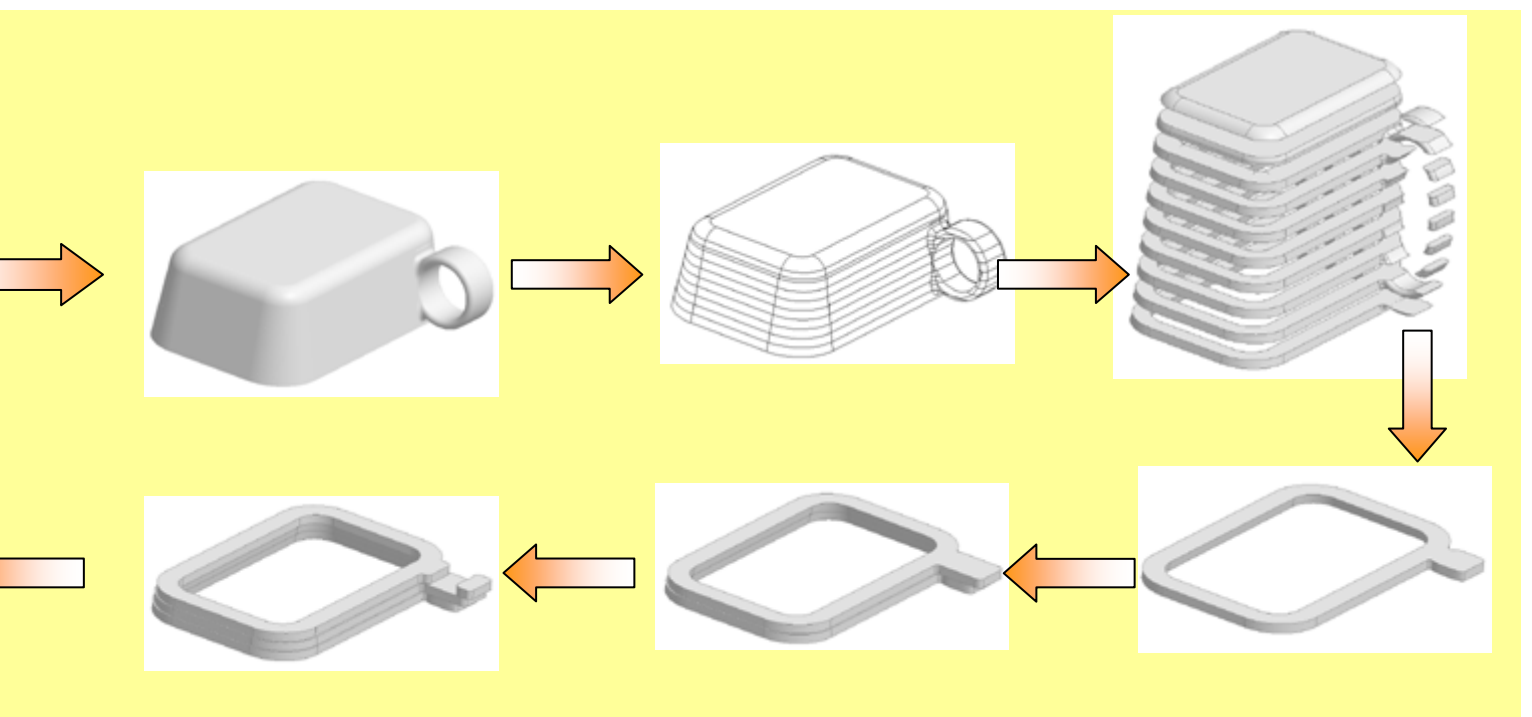
V. Réalisation par ajout de matière

Principe général

On regroupe sous le terme de réalisation par ajout de matière les procédés de prototypage rapide, ces procédés sont essentiellement utilisés en validation car ils ne nécessitent aucun outillage et aucune mise en œuvre de processus spécifique. En effet, ils permettent de réaliser la pièce directement à partir de son modèle numérique.



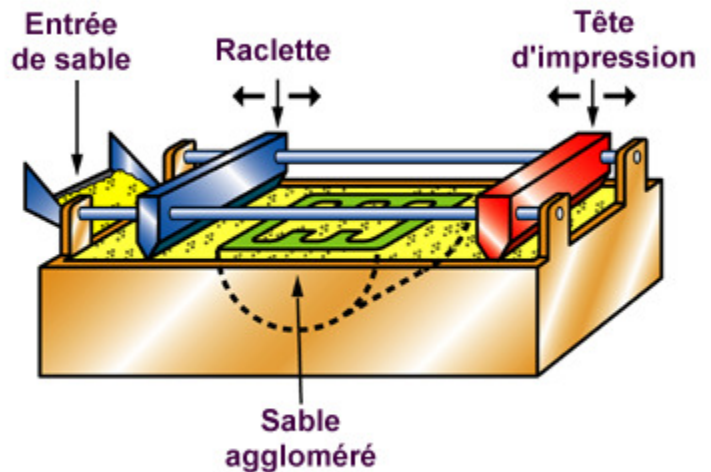
Dans des cas précis (concernant le matériau et la série souhaités), ces procédés de fabrication par ajout de matière peuvent être utilisé pour la production des pièces, on parle de **Rapid Manufacturing** (Production rapide).



Caractéristiques cinématiques et géométriques des moyens

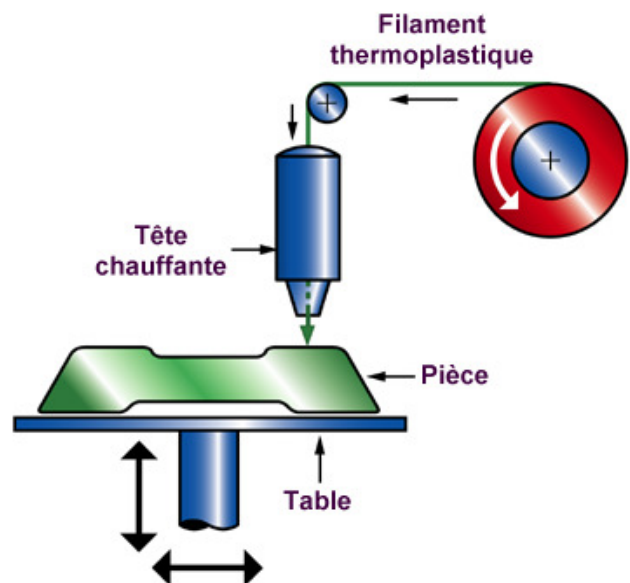
Imprimante 3D

Dans l'IMPRESSION 3D une tête d'impression multi-jets, comme celle d'une imprimante à jet d'encre, dépose une cire ou un polymère pour construire un objet tridimensionnel 3D couche par couche. Certains systèmes utilisent deux têtes d'impression, une pour déposer le matériau du prototype et l'autre pour déposer le matériau sacrificiel dans les parties vides du prototype pour supporter les parties en surplomb et pour soutenir le matériau du prototype jusqu'à ce qu'il se soit totalement durci. Le matériau sacrificiel est choisi pour être soluble dans un solvant, parfois de l'eau, ce qui permet de l'enlever facilement lorsque le modelage est terminé. Les pièces obtenues peuvent servir de modèles à une coulée cire perdue ou servir à la création de moule silicone.



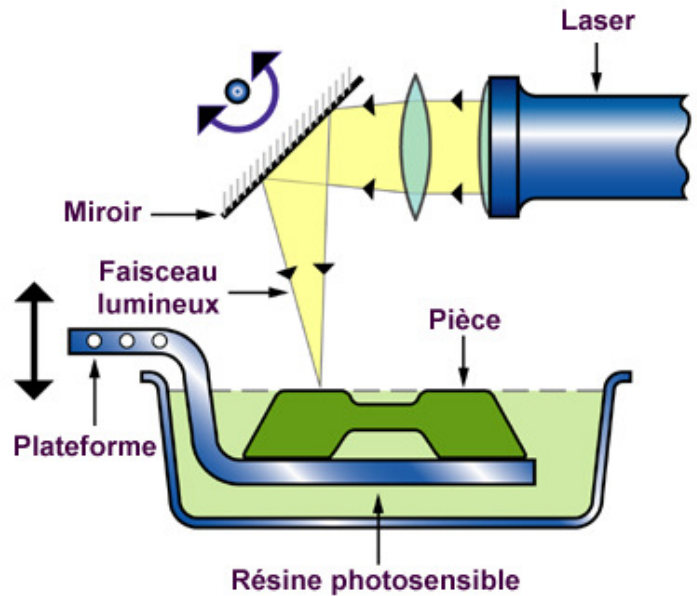
Prototypage par dépôts

L'illustration montre une des variantes de cette technologie. Dans le prototypage par dépôt d'un fil fondu (dont l'abréviation courante est FDM pour le nom anglais de "Fused Deposition Modelling") un filament fin de thermoplastique ou de cire est déposé suivant les axes x et y par une tête d'extrusion chauffée. Le polymère fondu ou la cire est extrudée de la tête chauffée et déposé en couches (typiquement de 0,1 mm d'épaisseur, une couche à la fois en partant de la base). Les couches successives sont liées par fusion thermique. Le procédé est bien adapté pour utiliser de l'ABS, du polycarbonate et du nylon (il est aussi possible d'utiliser un élastomère ce qui permet de faire des prototypes souples). Dans la technique BPM (abréviation du nom anglais "Ballistic Particle Manufacture") des particules de thermoplastique fondu sont projetées par un jet piézo-électrique et se figent lorsqu'elles touchent l'objet. La tête qui projette ce jet balaie la surface, créant une nouvelle couche à chaque passage; une série de thermoplastiques et de cires peuvent être utilisés dans le jet.

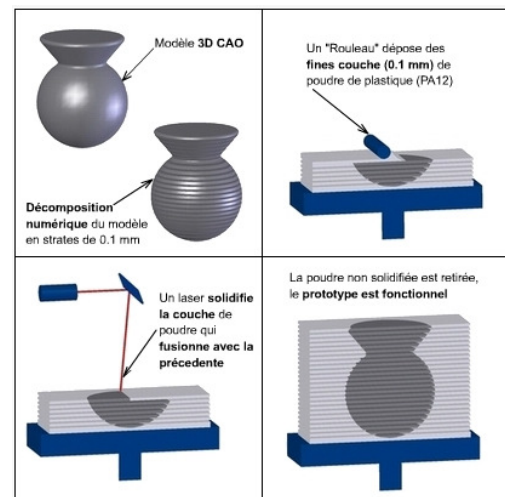


Prototypage par lasers

En stéréolithographie (SL), le plus ancien de tous les systèmes commerciaux, une résine photosensible est polymérisée par un rayon laser UV qui balaie la surface d'un bain contenant la résine liquide (voir illustration). Chaque passage crée une fine couche de l'objet; lorsqu'un balayage est complet la plate-forme sur laquelle repose la pièce partiellement construite s'enfonce légèrement (typiquement de 0,1 mm) ce qui permet de recouvrir la surface de liquide frais qui sera polymérisé lors du prochain passage. L'objet est ainsi construit couche après couche en commençant par le bas. Un traitement de post-réticulation est nécessaire pour compléter la polymérisation



En frittage sélectif par laser SLS (généralement décrit par les initiales de son nom anglais de "Selective Laser Sintering"), la résine liquide est remplacée par une poudre fine thermofusible (un thermoplastique ou une cire) qui est fondue par le balayage du faisceau laser, créant une seule couche de l'objet. La table est alors abaissée et une nouvelle couche de poudre est répandue à la surface, prête pour le balayage suivant. En utilisant de la poudre de nylon ou d'ABS, on peut faire un objet totalement fonctionnel avec des fixations encliquetables, des parties filetées et des charnières intégrées. La méthode a été maintenant étendue au frittage des métaux, offrant une nouvelle voie pour faire des filières et des moules complexes ou des ailettes de turbine



Morphologique des pièces obtenues

Le prototypage rapide autorise toute forme de pièce, il y a très peu de restrictions d'ordre morphologique. Cependant les procédés par ajout de matière sont généralement utilisés à des fins de validation, et dans ce cas ils n'interviennent pas dans le tracé de la pièce. D'autre part les matériaux utilisés dans ces procédés peuvent être très particulier et ne pas correspondre aux caractéristiques du matériau dans le contexte du procédé réel de production. Il est donc nécessaire, dans le cas de validation, de choisir judicieusement le procédé de réalisation rapide en fonction des caractères à valider.

Ces procédés permettent également de réaliser des ensembles non montables et indémontables. En effet, il est possible de construire toutes les pièces déjà assemblées.

VI. Réalisation par moulage

Le principe de ces procédés est de couler le matériau à l'état liquide ou pâteux dans un moule, et après solidification d'ouvrir ou de détruire le moule afin de récupérer la pièce.

On peut mouler tout type de matériaux (plastique, métallique, résine).

Ces procédés nécessitent la réalisation d'un moule, et sont donc réservés à la fabrication de pièces en série, mais les techniques de prototypage rapide peuvent être utilisées afin d'optimiser l'utilisation de ces procédés.

Les moules peuvent être :

- Permanent : Dans ce cas le moule est en plusieurs parties et s'ouvre pour libérer la pièce
- Non permanent : Dans ce cas, le moule est détruit pour récupérer la pièce.

Suivant le matériau à mouler et le nombre de pièces souhaité, les moules sont réalisés en silicone, en plâtre, en sable ou en acier.

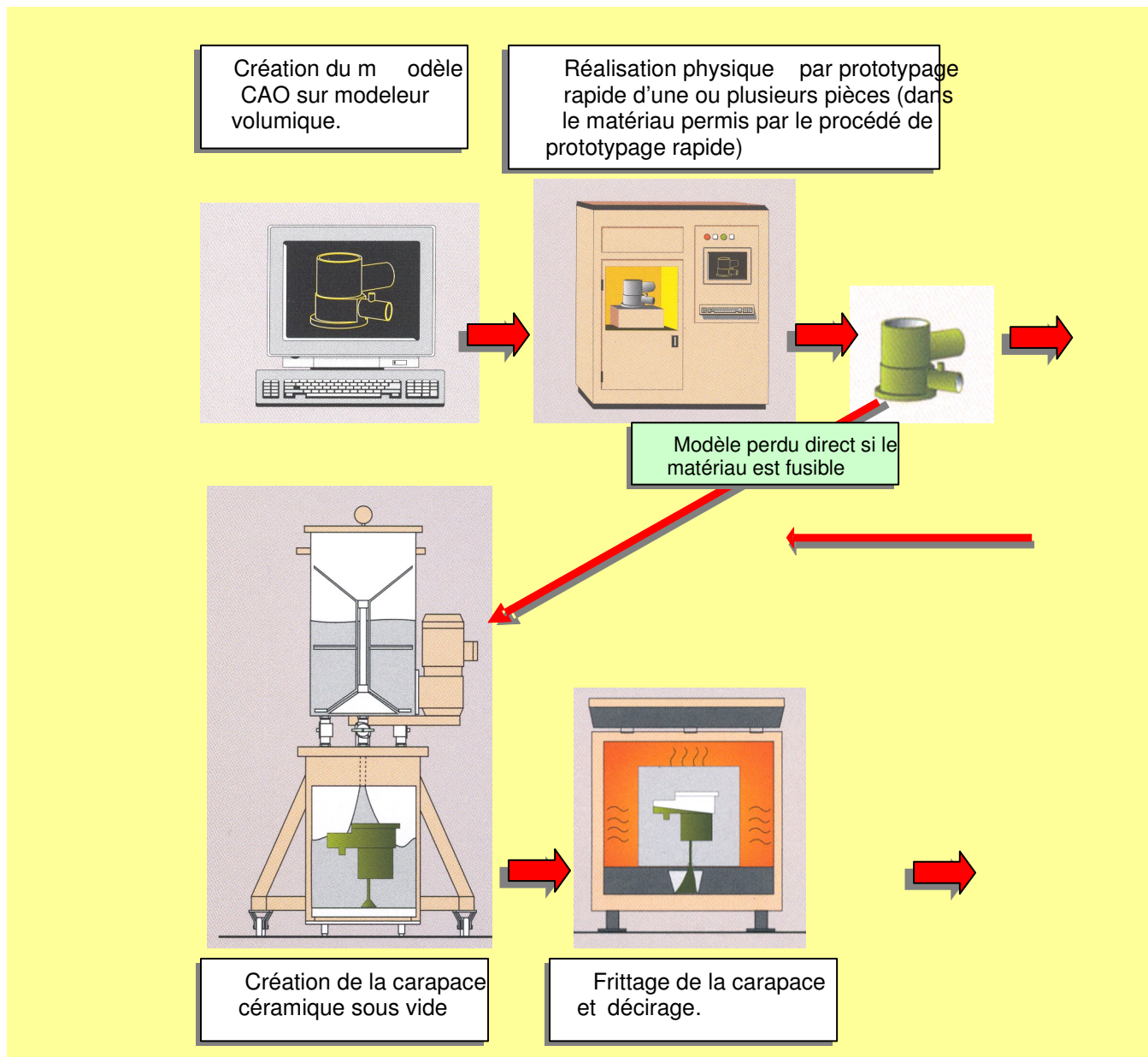
Certains procédés utilisant des modèles perdus permettent la réalisation de pièces de grande précision et de grande complexité.



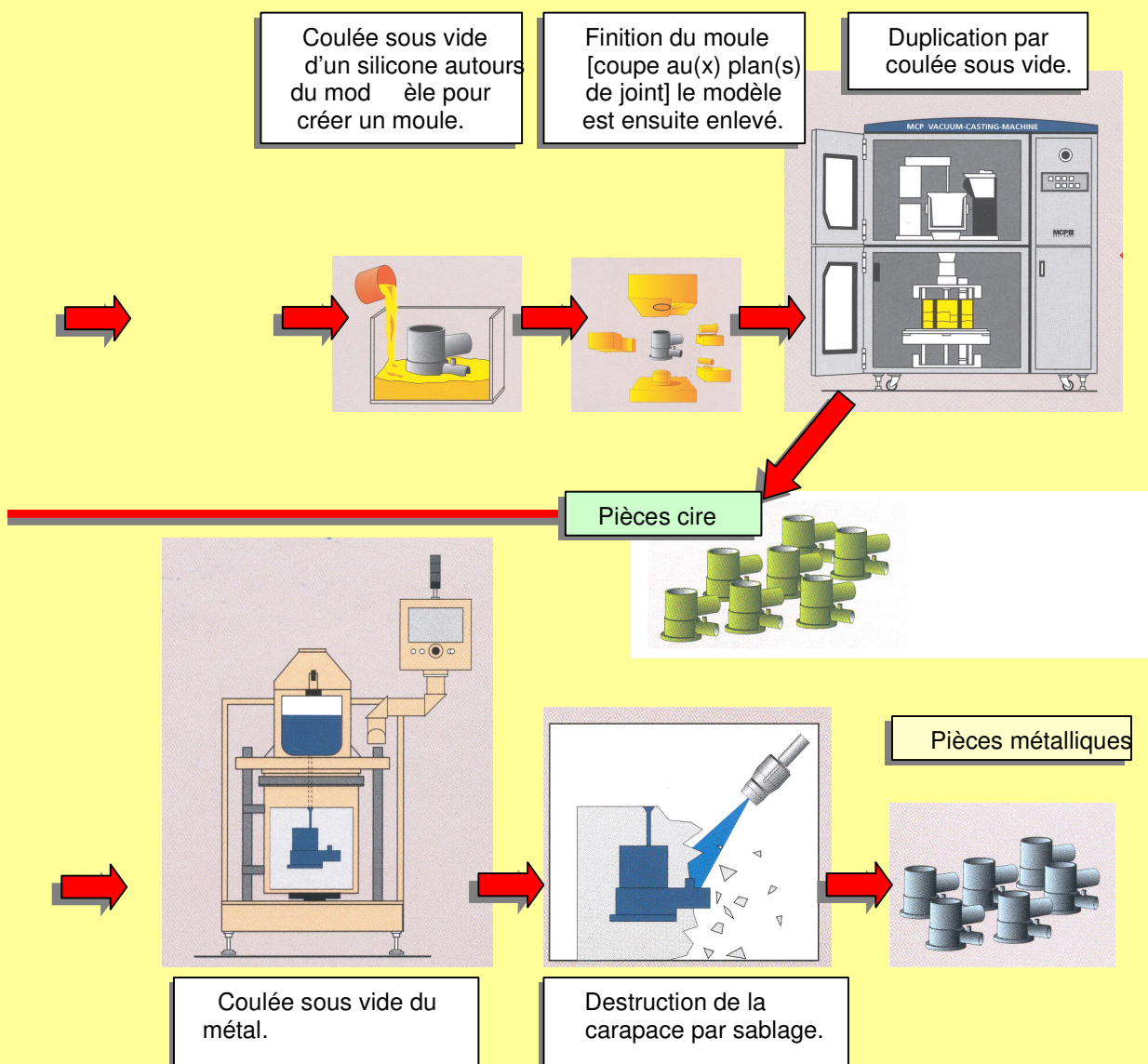
1. Fonderie à cire perdue

Principe général

Le principe de ce procédé est de réaliser un moule non permanent autour d'un modèle qui seront détruits avant ou pendant la coulée. Ce procédé peut être utilisé en fabrication unitaire, dans ce cas les modèles sont réalisés en prototypage rapide, ou être utilisé en série dans ce cas les modèles peuvent être réalisés par injection.



Caractéristiques cinématiques et géométriques des moyens



Morphologique des pièces obtenues

Les pièces réalisées en fonderie cire perdue doivent respectées certaines règles de tracé. Il est nécessaire de concevoir ces pièces avec une épaisseur constante et n'ayant pas d'angle vif. Cependant ce procédé ne nécessite aucun plan de joint ou de système d'éjection. Il est donc possible de concevoir des pièces d'une grande complexité

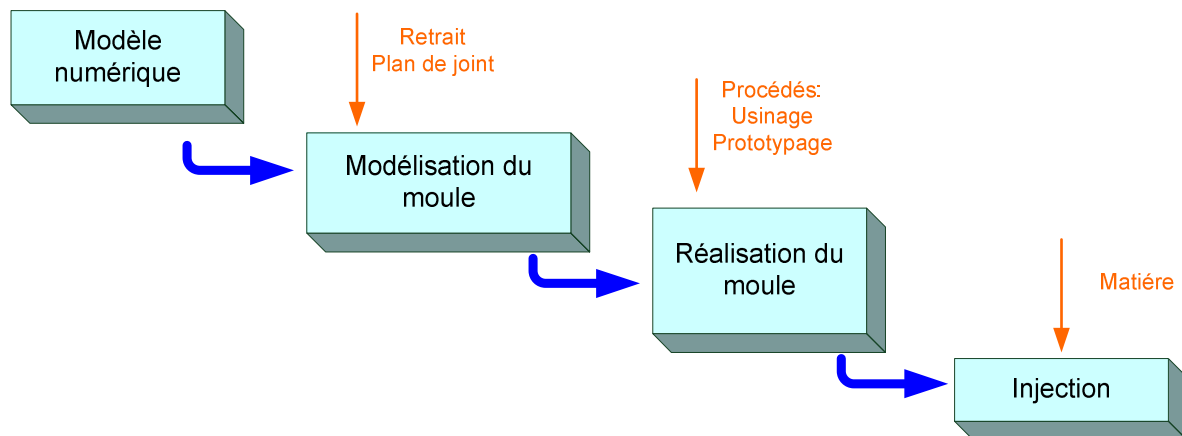
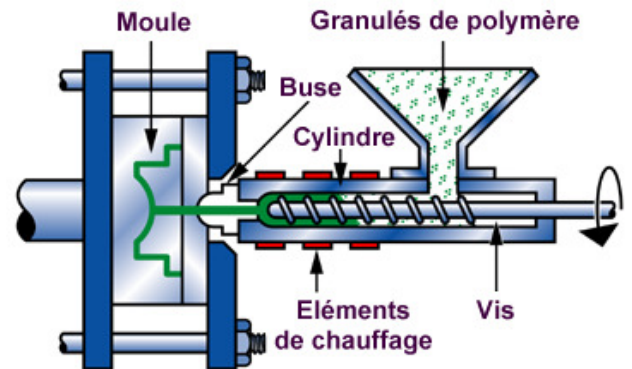
2. Injection plastique

Principe général

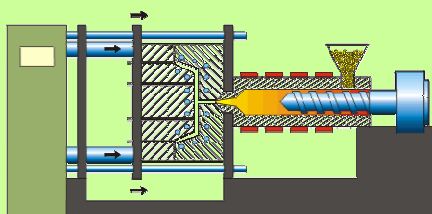
L'injection plastique utilise un moule permanent généralement métallique, dans lequel on injecte sous pression un polymère à l'état pâteux. Après solidification, le moule s'ouvre et la pièce est éjectée.

Ce procédé permet de grande cadence de production et est donc utilisé dans le cadre de fabrication série.

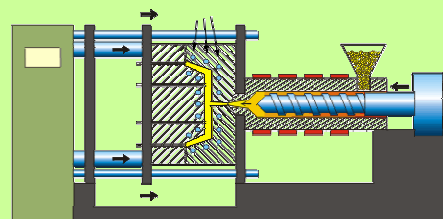
La modélisation et la réalisation du moule sont basés sur le modèle numérique pièce. En effet, les modelers possèdent des outils spécifiques de moulage.



CYCLE D'INJECTION



1. Fermeture du moule et plastification



2. Injection

Caractéristiques cinématiques et géométriques des moyens

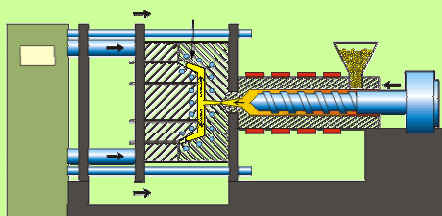
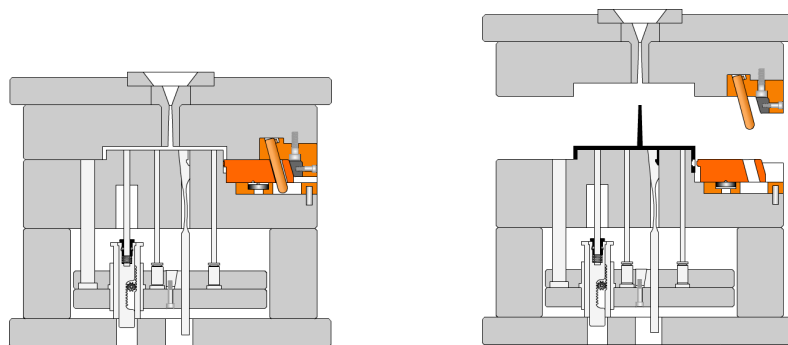
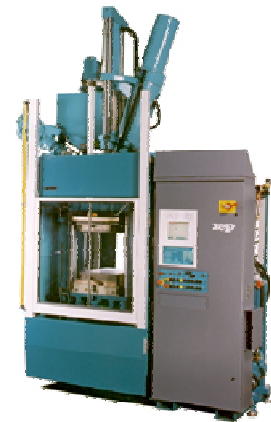
Les presses d'injection plastique se composent :

- D'un bâti :
- D'une unité de plastification :
- D'une unité d'injection
- D'une unité d'éjection

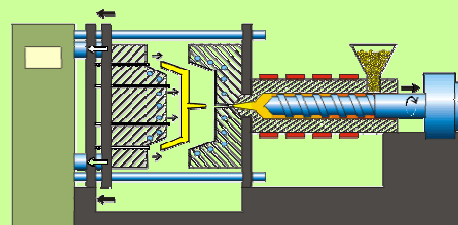
Le bâti peut être horizontal ou vertical. Ce dernier est utilisé dans le cas de surmoulage (Moulage autour d'un insert, le plus souvent métallique)

Le moule qui comprend une partie fixe, une partie mobile et un système d'éjection se monte sur la machine par bridage sur deux plateaux.

Pour une pièce complexe, avec contre dépouille, le moule peut être équipé de tiroirs ou de cinématique d'ouverture particulière.



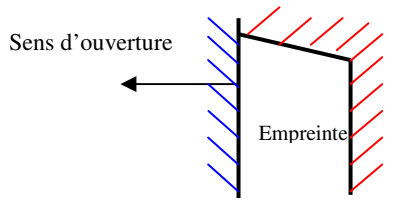
3. Maintien en pression et solidification



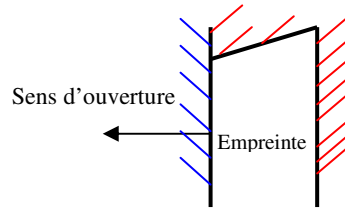
4. Ouverture du moule et éjection de la pièce

Morphologique des pièces obtenues

Ce procédé impose la présence de un ou plusieurs plan de joint, il est donc nécessaire de limiter au maximum les contre dépouilles.

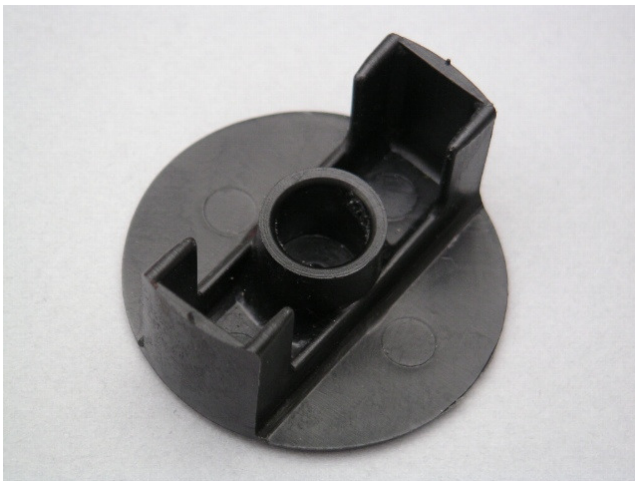


DEPOUILLE

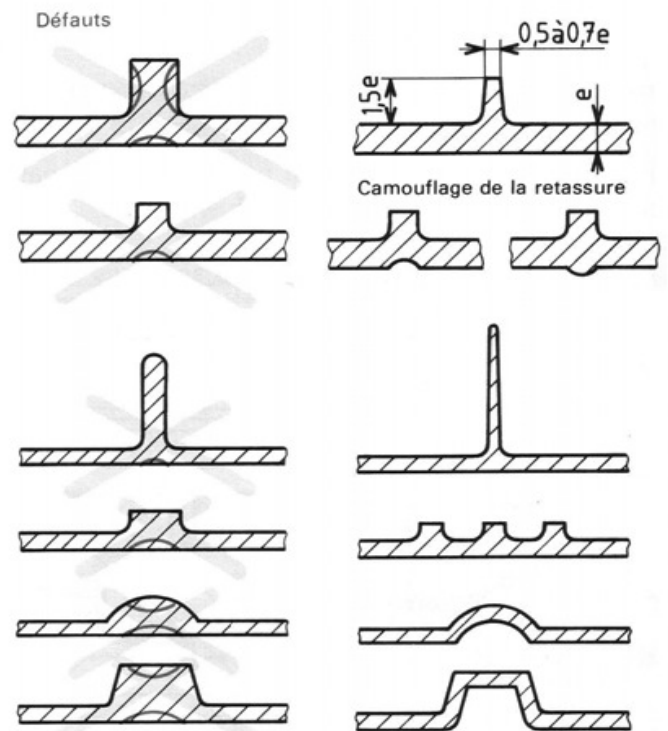


CONTRE DEPOUILLE

La notion d'épaisseur constante est à respecter pour permettre un remplissage efficace de l'empreinte et minimiser les défauts de la pièce.



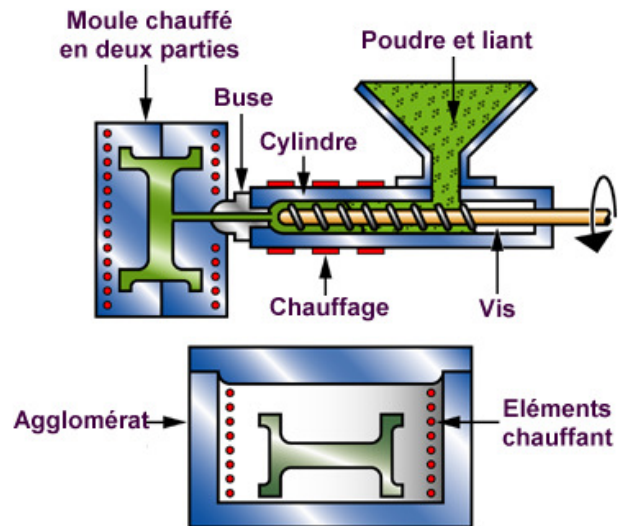
3.



MIM

Le procédé MIM (Moulage par injection de métal) est un dérivé de l'injection plastique. On injecte un mélange poudre métallique - polymère dans un moule chauffé à l'aide d'une presse à injecter classique. La pièce obtenue, dite pièce verte, est alors placée dans un four pour une opération de frittage. La pièce subit un retrait de l'ordre de 30%.

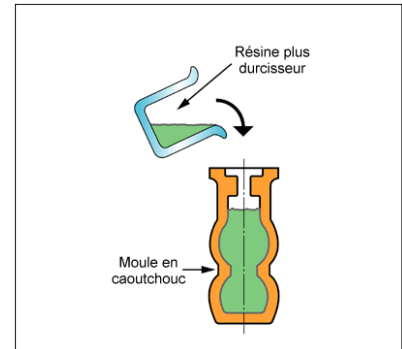
Ce procédé permet d'obtenir des pièces métalliques de formes complexes ayant de fortes caractéristiques mécaniques.



4. Coulée sous vide

Principe général

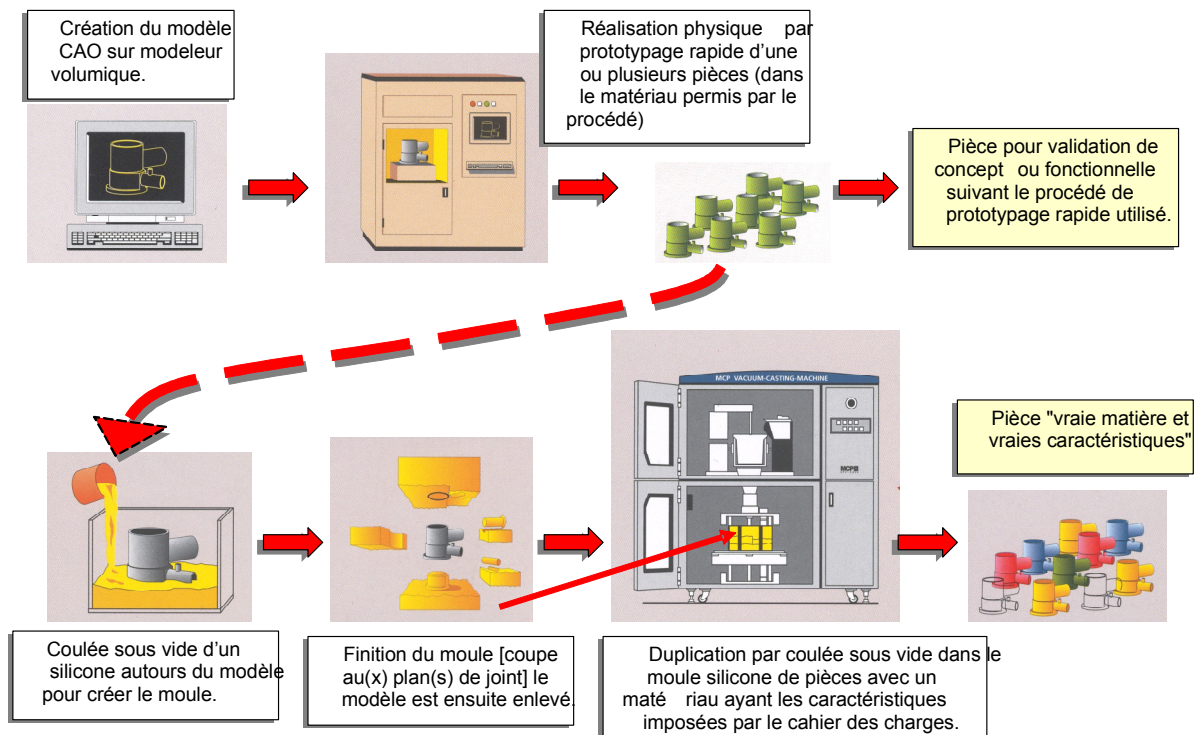
Ce procédé utilise des moules en silicone permettant la coulée de résine polyuréthane. La coulée sous vide est souvent associée aux technologies de prototypage rapide. En effet, cela permet l'obtention rapide du moule ou des modèles.



Ce procédé permet l'obtention de pièce unitaire jusqu'à quelques dizaines de pièces par moule.

La mise en oeuvre s'effectue généralement par duplication d'un modèle réel, mais de nombreuses variantes sont possibles en combinant différents procédés de réalisation.

Les résines polyuréthane possèdent les mêmes propriétés que les principaux polymères injectés. Cela permet d'obtenir très rapidement des pièces de validation.



Caractéristiques cinématiques et géométriques des moyens



Les machines de coulée sous vide sont constituées de 2 chambres :

- Une chambre supérieure permettant le mélange résine - durcisseur sous vide,
- Une chambre inférieure dans laquelle se situe le moule silicone également sous vide

Le remplissage est facilité par une légère surpression de la chambre supérieure pendant la coulée.

Morphologique des pièces obtenues

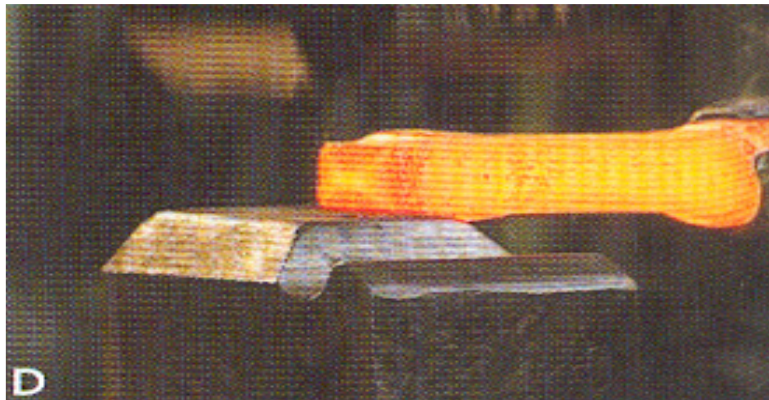
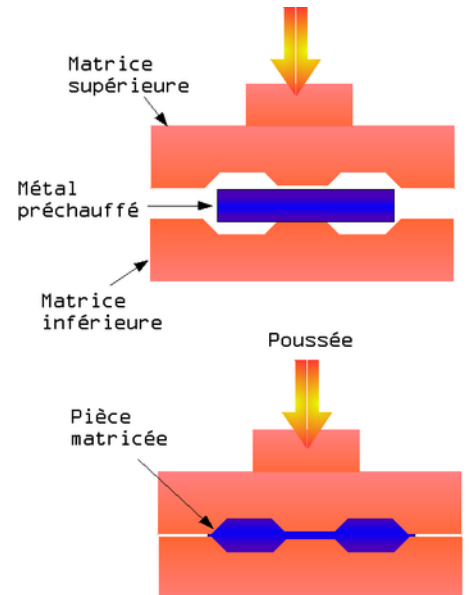
Le procédé de coulée sous vide permet une grande liberté quand à la morphologie des pièces. En effet, il n'y a pas restriction du au démoulage puisque le moule est souple et peut être découpé en plusieurs parties.

5. Réalisation par déformation

Le principe de ce procédé est de déformer un matériau à l'aide d'un outillage spécifique. Cette déformation peut se réaliser a chaud ou a froid sur des matériaux plastique ou métallique.

Les matériaux métalliques à mettre en forme peuvent se présenter sous la forme de tôle ou de lopin. Le principe du procédé est d'amener la déformation dans le domaine plastique à l'aide de matrice, de manière à donner à la matière la forme souhaitée.

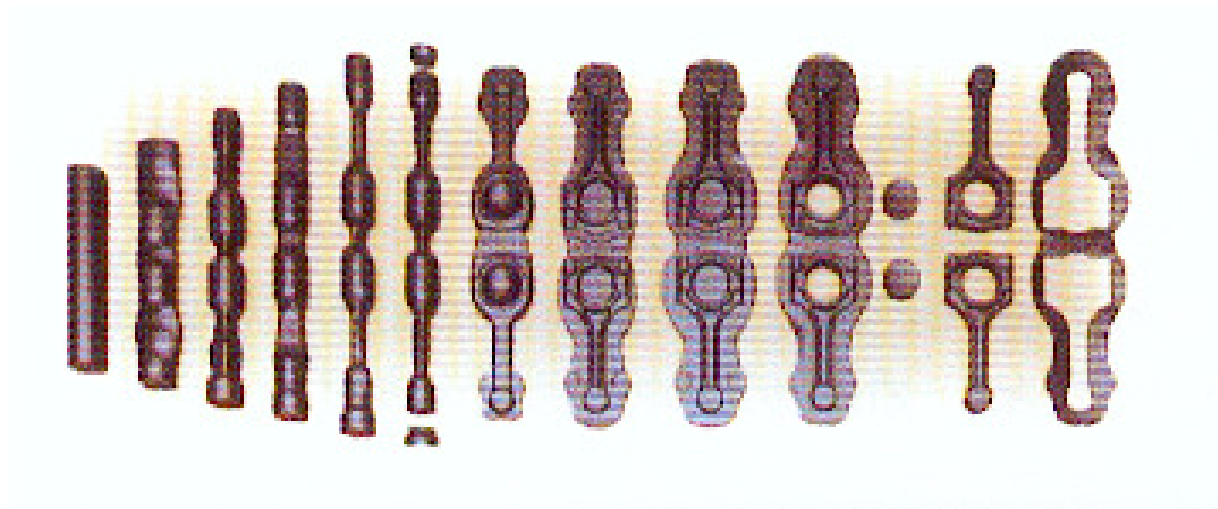
Les procédés de mise en forme par déformation nécessitent la réalisation d'un outillage onéreux, ce qui les destine à la production en série.



1. Matricage – Estampage

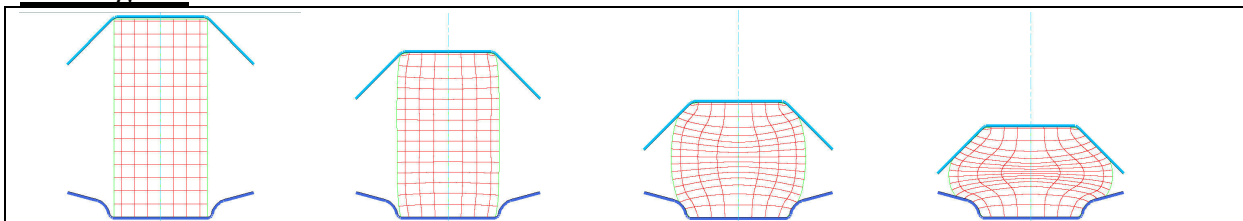
Principe général

Le principe est de mettre en œuvre un matériau ferreux (estampage) ou non ferreux (matricage) à l'aide de matrices par choc ou pression. L'objectif de ce procédé n'est pas seulement de mettre en forme le matériau mais il est de renforcer les caractéristiques mécaniques.

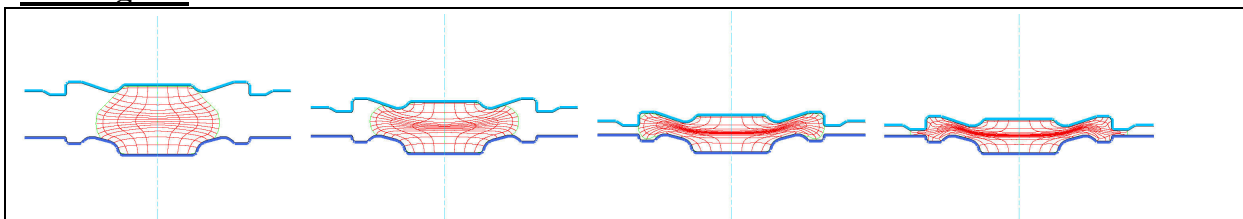


La mise en forme se fait par opérations successives sur des outillage d'ébauche, de finition et d'ébavurage.

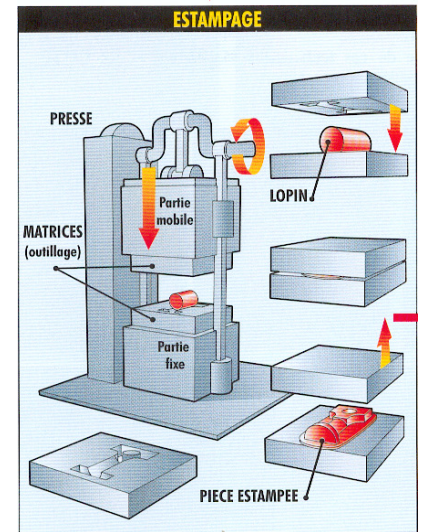
Outillage 1 : réalisation d'une ébauche



Outillage 2 : réalisation de la finition

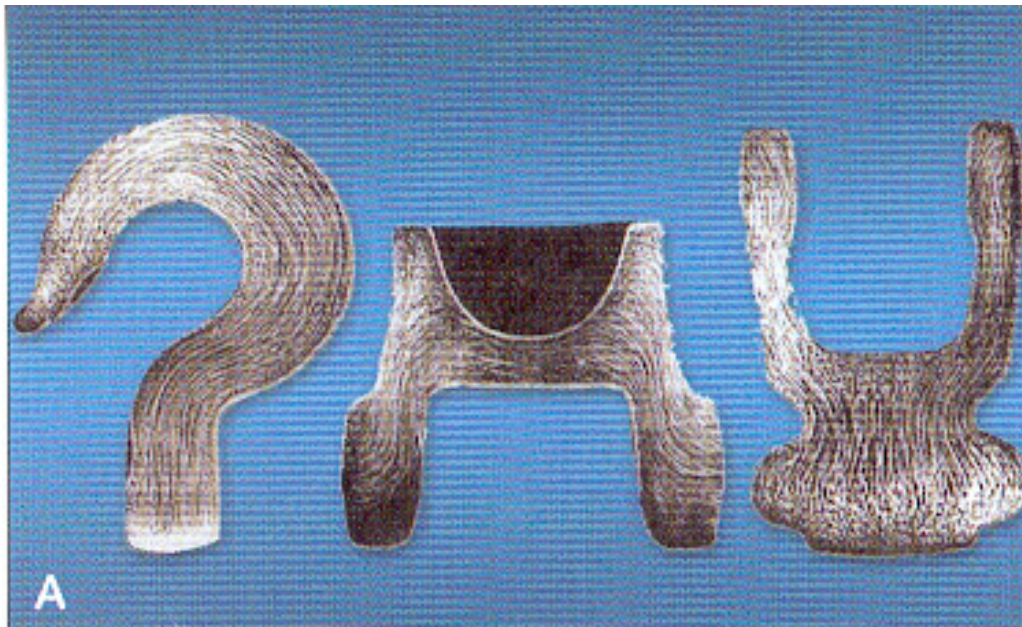


Caractéristiques cinématiques et géométriques des moyens



Morphologique des pièces obtenues

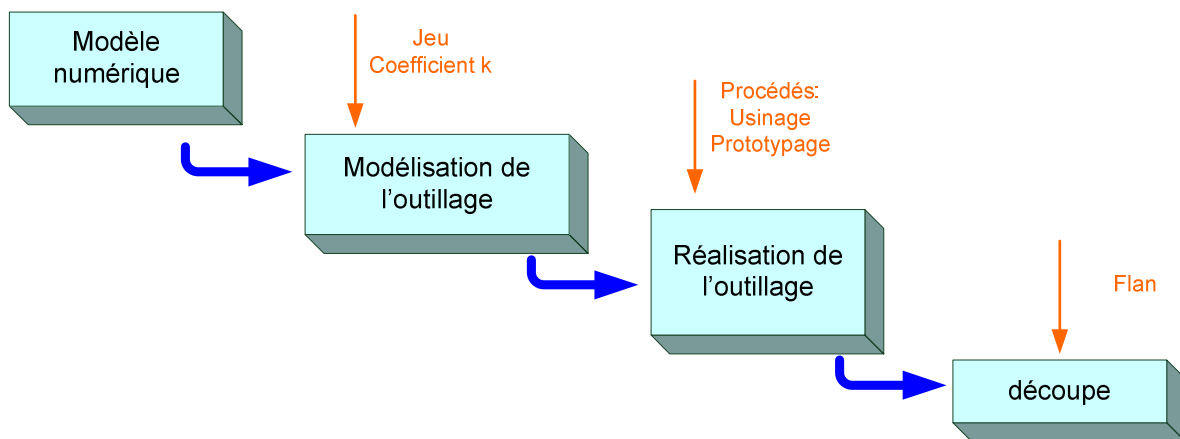
La déformation plastique génère un fibrage qui améliore les performances mécaniques. Ce qui permet de réduire les dimensions, le poids, l'inertie, les vibrations, pour les même efforts



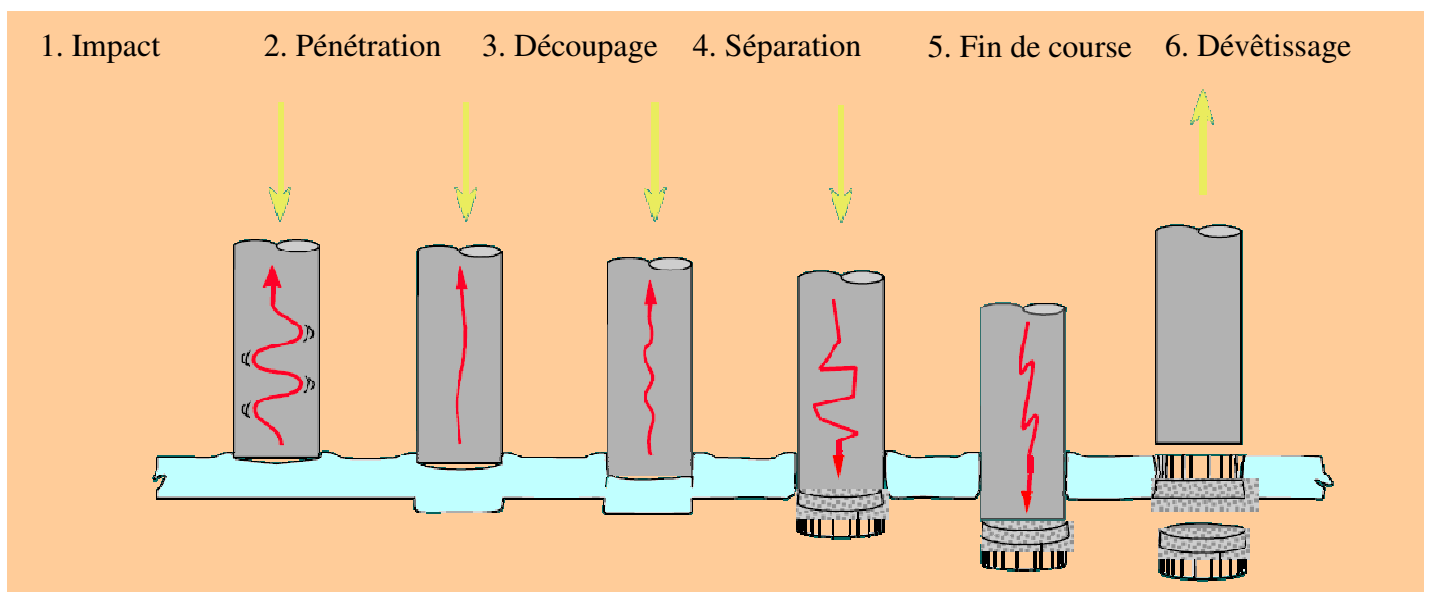
2. Découpage - Cambrage - Emboutissage

Principe général

Le découpage permet à partir d'un flan métallique (tôle), d'effectuer des coupes à l'aide d'un poinçon et d'une matrice. Ce procédé est utilisé en fabrication série car la réalisation de l'outillage a un coût élevé.



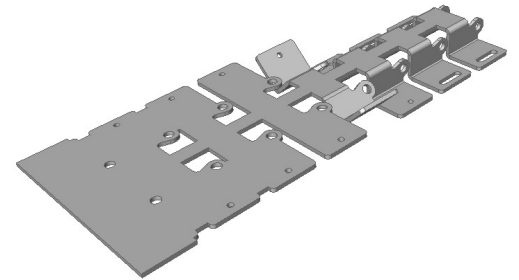
Les poinçons et matrices de l'outillage doivent être d'une grande dureté, afin de limiter l'usure, on utilise généralement des aciers traités. La mise en forme de ces éléments se fait par électroérosion à fil, puis ils sont assemblés dans une carcasse standard.



Deux autres procédés sont complémentaires du découpage :

- **Le cambrage** est une opération consistant à effectuer sur la tôle un pli rectiligne.
- **L'emboutissage** permet de déformer la matière entre un poinçon et une matrice, ce qui entraîne une variation d'épaisseur de la bande.

Ces trois procédés peuvent se retrouver sur le même outillage, ce qui permet sur une même opération, d'obtenir une pièce très complexe.

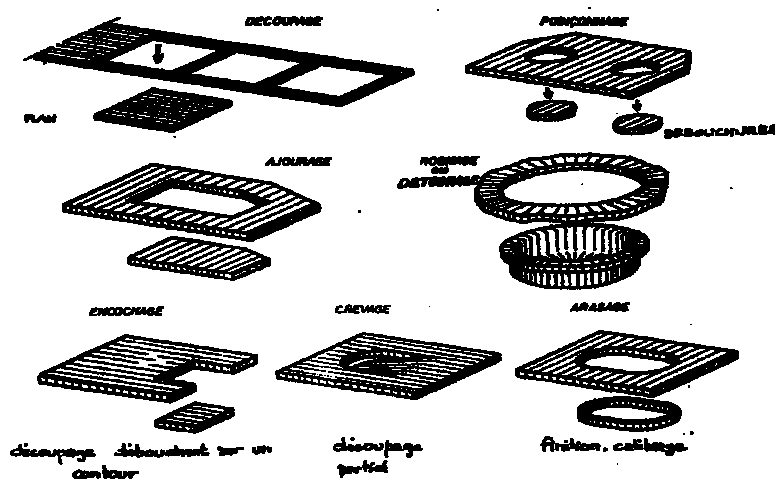


Caractéristiques cinématiques et géométriques des moyens

Ce procédé nécessite l'utilisation d'une presse et d'un outillage spécifique.

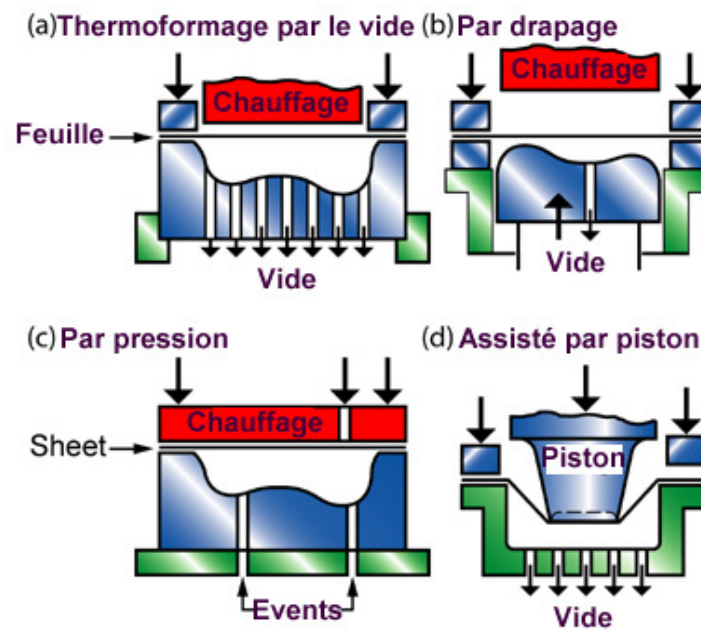


Morphologique des pièces obtenues



3. Thermoformage

On peut mettre en forme de grandes feuilles thermoplastiques de manière économique par thermoformage. Dans le thermoformage par le vide, une feuille thermoplastique, chauffée jusqu'à son point de ramollissement, est aspirée par le vide sur les contours du moule prenant ainsi sa forme; elle est ensuite refroidie, se solidifiant au contact du moule. Le thermoformage sous pression utilise une pression de plusieurs atmosphères pour forcer la feuille de polymère chaude dans le moule. Des moules mâles ou femelles sont possibles et -pour le thermoformage par le vide- peuvent être usinés en bois, en mousse de polymère ou en aluminium (pour les plus grandes séries).

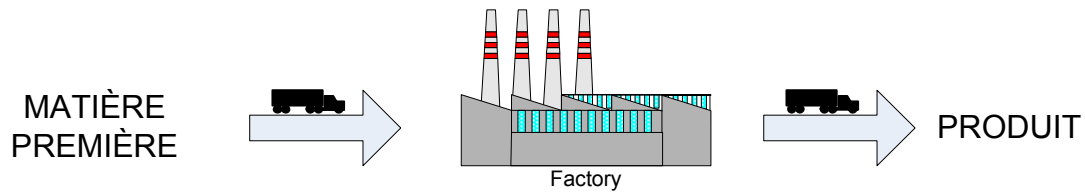


VII. Aspect économique des procédés

Identification des paramètres

Le coût de mise en forme des matériaux dépend de nombreux paramètres situés entre l'arrivée de la matière première dans l'entreprise et la sortie du produit vers le client.

Le coût de fabrication d'un produit dépend donc du coût de la matière première et du coût de la valeur ajoutée, auquel s'ajoute le coût de l'énergie, des transports, etc.



$$\text{PRODUIT} = \text{MATIÈRE PREMIÈRE} + \text{VALEUR AJOUTÉE}$$

On retrouve ainsi les coûts:

- Liés à la pièce : Matière, ,
- Liés aux procédés : Etudes, réalisation des outillages
- Liés à la machine : Amortissement, fonctionnement
- Liés à la production : Temps de mise en œuvre, cadence

Notion de performance économique

Lors du choix d'un procédé, il est souvent nécessaire de comparer les coûts de fabrication en fonctions du nombre de pièces à fabriquer et de déterminer le seuil de rentabilité.

Exemple :

VIII. Gestion des déchets

Fiche Ressource : Performances géométriques et économiques des procédés.