Nancy-Université
Université Henri Poincaré

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

Toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

➢ Contact SCD Nancy 1 : theses.sciences@scd.uhp-nancy.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Nancy-Université
Université Henri Poincaré

FACULTE DES SCIENCES & TECHNIQUES

U.F.R. S.T.M.I.A. (Sciences et Techniques Mathématiques, Informatique et Automatique)
École Doctorale IAEM Lorraine (Informatique, Automatique, Electronique, Mathématiques Lorraine)
Département de Formation Doctorale Automatique, Traitement du Signal et Génie Informatique

Thèse

présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I

en Automatique, Traitement du Signal et Génie Informatique

par **Benoît DELEBECQUE**

Intégration de fonctions avancées à l'inter-strate de pièces réalisées par le procédé de Stratoconception

Méthodologie et développement des outils associés

Soutenance publique le 19 Novembre 2007

Membres du jury :

Président :		
Rapporteurs :	M. Benoît EYNARD	Enseignant-Chercheur HDR, ODIC, Université de Technologie de Compiègne
	M. Yvon VOISIN	Professeur, LE2I, Université de Bourgogne
Examinateurs :	M. Alain BERNARD	Professeur, IRCCyN, Ecole Centrale de Nantes
	M. Gabriel RIS	Professeur, CRAN, UHP Nancy I (Co-directeur de thèse)
	M. Claude BARLIER	Professeur, Directeur du GIP-InSIC, Saint-Dié-des-Vosges (Co-directeur de thèse)

Laboratoire CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy) / Equipe NUMCOP2
Faculté des sciences et techniques – 54500 Vandoeuvre-lès-Nancy

Nancy-Université
Université Henri Poincaré

Laboratoire CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy) / Equipe NUMCOP2
Faculté des sciences et techniques – 54500 Vandoeuvre-lès-Nancy

Intégration de fonctions avancées à l'inter-strate de pièces réalisées par le procédé de Stratoconception - Méthodologie et développement des outils associés

Résumé

Nos travaux de recherche s'inscrivent dans le contexte du prototypage rapide, plus particulièrement dans celui du procédé de fabrication par couches solides, la Stratoconception. Ce procédé consiste en la décomposition automatique de l'objet en une série de couches élémentaires appelées strates, dans lesquelles des inserts de positionnement sont placés. Chacune de ces strates est directement mise en panoplie, puis fabriquée par micro-fraisage rapide 2,5 axes ou par découpe 5 axes à partir de matériaux en plaques. Tous ces éléments sont ensuite assemblés afin de reconstituer la pièce finale. Si l'usinage est aujourd'hui entièrement automatisé grâce aux logiciels et aux machines dédiés, l'assemblage est une opération qui demande encore une intervention manuelle de l'utilisateur du procédé.

Un bilan des méthodes actuelles utilisées pour l'assemblage des strates (collage, brasage, assemblage mécanique…) montre les inconvénients et les limitations de ces techniques de fixation. L'étape d'assemblage est essentielle car elle influe sur la qualité géométrique, sur la tenue mécanique et sur le temps de réalisation de la pièce. Les techniques utilisées aujourd'hui ne garantissent pas toujours la répétabilité du système et peuvent entraîner une rupture de la chaîne numérique du procédé.

Notre contribution porte sur une nouvelle méthode d'assemblage, l'emboîtement. Elle permet l'intégration d'entités d'assemblage au sein des couches, elle améliore la fixation de celles-ci et elle réduit le temps de montage et surtout les coûts qu'il engendre. Pour cela, nous avons développé un système de génération automatique des entités dans le processus. Ce système permet de réduire le travail nécessaire pour réaliser l'assemblage des pièces et rend ainsi l'opération d'assemblage systématique, en minimisant les interventions manuelles et les incertitudes dues au choix de l'utilisateur. Les outils et méthodes logicielles permettent d'automatiser cette opération, en définissant les entités d'assemblage, leur forme, leur dimensionnement et surtout leur positionnement au sein des couches. Nous présentons diverses approches de localisation de ces entités au travers d'algorithmes de placement par grilles, par forces de répulsion ou par un algorithme génétique de recherche du k-gon maximum inscrit. Le développement d'un algorithme original de localisation automatique des entités par squelettisation a permis d'optimiser le placement des entités par rapport à la géométrie des couches. Ses résultats sont analysés et comparés à une localisation par grille.

Une seconde approche est proposée : l'emboîtement complet. La génération de l'emboîture à partir des contours de l'inter-strate induit la problématique des formes imbricables, c'est-à-dire la création de formes mâles et femelles complémentaires et réalisables par l'outil d'usinage (problème d'accessibilité de l'outil).

Enfin, nous concluons le mémoire en mettant en évidence les premiers résultats industriels au travers des outils implémentés dans le logiciel du procédé et des pièces réalisées par cette nouvelle méthode.

Mots-Clés: Prototypage et Outillage Rapide, Stratoconception, Assemblage, Emboîtement, Entités d'Assemblage, Inter-Strate

Laboratoire CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy) / Equipe NUMCOP2
Faculté des sciences et techniques – 54500 Vandoeuvre-lès-Nancy

Advanced facilities in the parts inter-layer made by Stratoconception process - Methodology and Development of associated tools

Abstract

Our research works are related to rapid prototyping, and specially to a solid layer manufacturing process, the Stratoconception.

The process consists in automatically decomposing the object into a series of elementary layers, called strata, into which positioning inserts are placed. Each of these strata is directly laid out, and then manufactured using high-speed 2.5 axis micro-milling or 5-axis laser cutting of slabs of material. All of these elements are then assembled in order to reconstruct the final part. Today, if machining is automated by dedicated software and machines, assembling is a manual task made by the process operator.

An assessment of the current used methods for layers assembly (glueing, brazing, mechanical assembly…) show the disadvantages and the limitations of these fixing techniques. The stage of assembly is essential because it influences the geometrical quality of the part, the mechanical resistance and the manufacturing time. The used techniques do not guarantee the system repeatability and can break the numerical chain of the process.

Our contribution relates to a new assembly method: jointing. It allows the integration of assembly features into layers, it improves fixing and reduces the manufacturing time and costs. We developed a process planning system in the process to generate this features. This system makes it possible to reduce work of parts assembly and thus makes this operation systematic, to minimize the manual interventions and hazardous user choices. The software tools are abled to automate this operation, by generating assembly features, their form, their dimensioning and especially their location into layers. We present various approaches of localization of these features through placement algorithms based on grids, forces of repulsion or genetic algorithm. The development of an original localization skeleton-based algorithm made it possible to optimize the placement of the features taking into account layers geometry. The results are analyzed and compared with a grid-based localization.

One second approach is proposed: complete jointing. The joint is generated from inter-layers contours induced the build-in shape problem, i.e. male and female complementary shapes machining by the tool (accessibility tool problem).

Lastly, we conclude the manuscript by highlighting the first industrial results through the tools integrated into the process software and the parts manufactured by this new method.

Keywords: Rapid Prototyping and Tooling, Stratoconception, Jointing, Assembly, Assembly Features, Inter-Layer

Laboratoire CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy) / Equipe NUMCOP2
Faculté des sciences et techniques – 54500 Vandoeuvre-lès-Nancy

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs de thèse, le professeur Gabriel Ris pour m'avoir encadré tout en me laissant une grande liberté dans mes travaux et le professeur Claude Barlier pour m'avoir donné la possibilité de réaliser cette thèse dans le cadre de mon travail au CIRTES.

MM. les professeurs Benoît Eynard et Yvon Voisin qui ont accepté d'être les rapporteurs de cette thèse, je les en remercie.

Mes remerciements vont particulièrement à tous mes collègues du CIRTES, et plus particulièrement à Yves, qui a gouté comme moi aux joies du doctorat, nous avons beaucoup échangé sur nos travaux respectifs et nous nous sommes alternativement stimulés pendant ces travaux, et surtout lors de la rédaction. Merci à Geoffroy pour ses nombreux conseils et ses idées, et à Christophe et Damien pour leur aide et leur participation à la programmation de nos beaux algorithmes.
Un grand merci également à l'équipe procédé du CIRTES à Saint-Dié et à Carmaux, qui a répondu à toutes mes questions sur l'assemblage, le procédé et sans laquelle la réalisation concrète des pièces n'existerait pas.
Je tiens aussi à mentionner le plaisir que j'ai eu à travailler avec l'équipe sympathique NumCOP2 du CRAN.

Ma petite famille, Sylvie, Théo et Mathieu, qui m'ont encouragé et qui ont supporté mes longues heures de travail.

La théorie c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne.
La pratique c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi.

A. Einstein

Laboratoire CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy) / Equipe NUMCOP2
Faculté des sciences et techniques – 54500 Vandoeuvre-lès-Nancy

Table des matières

1. INTRODUCTION 11

1.1 PROTOTYPAGE RAPIDE ET OUTILLAGE RAPIDE 11
1.2 LE PROCEDE DE STRATOCONCEPTION 13
1.3 LA GENERATION AUTOMATIQUE DE PROCESSUS EN FABRICATION PAR COUCHES 14
1.4 LE LOGICIEL STRATOCONCEPT 15
1.4.1 PRESENTATION 15
1.4.2 HISTORIQUE DU LOGICIEL 16
1.5 L'ASSEMBLAGE EN STRATOCONCEPTION 17
1.6 L'ASSEMBLAGE 18
1.6.1 QU'EST-CE QUE L'ASSEMBLAGE ? 18
1.6.2 CONCEPTION POUR L'ASSEMBLAGE 19
1.7 CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE 19
1.7.1 CONTEXTE ET ENJEUX INDUSTRIELS 19
1.7.2 OBJECTIFS ET CONTRIBUTION DE LA THESE 21
1.8 PLAN DU MEMOIRE 21

2. ASSEMBLAGE DES COUCHES EN STRATOCONCEPTION 23

2.1 L'ETAPE D'ASSEMBLAGE EN STRATOCONCEPTION 24
2.2 METHODES ACTUELLES D'ASSEMBLAGE 25
2.2.1 LES DIFFERENTS PROCEDES D'ASSEMBLAGE INDUSTRIELS EXISTANTS 25
2.2.2 MODES D'ASSEMBLAGE ACTUELS UTILISES EN STRATOCONCEPTION 26
2.2.2.1. Le collage 27
2.2.2.2. Le brasage 28
2.2.2.3. L'assemblage mécanique / Le vissage 30
2.2.2.4. Le soudage 30
2.2.3 LES CRITERES DE CHOIX DU MODE D'ASSEMBLAGE POUR LA STRATOCONCEPTION 30
2.2.4 LA MISE EN ŒUVRE DE L'ASSEMBLAGE 34
2.2.5 INCONVENIENTS DES TECHNIQUES 35
2.2.5.1. La préparation de l'assemblage 35
2.2.5.2. L'application du liant 36
2.2.5.3. Le bridage 38
2.2.5.4. Autres inconvénients 39
2.3 LES INSERTS ET LES PONTETS 40
2.3.1 LES INSERTS 40
2.3.2 LES PONTETS 41
2.3.3 INCONVENIENTS ET LIMITES DES INSERTS ET DES PONTETS 42
2.3.4 INSERTS NON DEBOUCHANTS 44
2.4 LES DIFFICULTES DE L'ASSEMBLAGE ACTUEL 46

2.4.1 QUALITE GEOMETRIQUE DE LA PIECE 48
2.4.1.1. Erreur d'empilage en Z 48
2.4.1.2. Défauts de forme globale de la pièce (erreur XY) 48
2.4.1.3. Marque au joint et défauts d'aspect 48
2.4.1.4. Formes intérieures 48
2.4.2 TENUE MECANIQUE DE L'ASSEMBLAGE 49
2.4.2.1. Décollage / Délaminage 49
2.4.2.2. Collage impossible 49
2.4.3 EFFETS SUR L'OPERATEUR DU PROCEDE 49
2.4.3.1. Difficultés dans les choix 49
2.4.3.2. Travail de préparation CAO 49
2.4.3.3. Travail et habileté manuelle 49
2.4.3.4. Finitions supplémentaires 50
2.4.3.5. Hygiène et sécurité 50
2.4.4 LES LIMITES DANS L'UTILISATION DE LA PIECE 50
2.4.4.1. Conditions et contraintes spécifiques 50
2.4.4.2. Démontage des strates impossible 50
2.4.4.3. Dureté des joints 50
2.4.4.4. Perte de caractéristiques 50
2.4.5 CONSEQUENCES GENERALES 50
2.4.5.1. Durée de l'assemblage 50
2.4.5.2. Non répétabilité (Systématisation) 51
2.4.5.3. Limites des techniques 51
2.4.5.4. Précision des machines 51
2.5 BILAN DES METHODES D'ASSEMBLAGE 52
2.5.1 BILAN 52
2.5.2 IDEE DE L'EMBOITAGE 53

3. L'EMBOITEMENT 55

3.1 PRINCIPE 55
3.1.1 PRINCIPE ET TERMINOLOGIE DE L'EMBOITEMENT 55
3.1.2 DEFINITION DE L'ENTITE D'ASSEMBLAGE 57
3.1.3 MODELISATION AUTOMATIQUE DES ENTITES D'ASSEMBLAGE 59
3.2 ETAT DE L'ART SUR LES ENTITES D'ASSEMBLAGE 60
3.3 LES CONTRAINTES DE L'EMBOITEMENT 64
3.4 LE DIMENSIONNEMENT 65
3.4.1 FORMES DES ENTITES 65
3.4.2 TAILLE ET ORIENTATION 67
3.4.3 SENS DE L'ENTITE 68
3.4.3.1. Usinage Recto/Verso 68
3.4.3.2. Sens d'usinage optimal 69
3.4.3.3. Algorithme de modification du sens d'usinage des strates 72
3.4.4 NOMBRE D'ELEMENTS 73
3.5 LE POSITIONNEMENT (OU LOCALISATION) 73
3.6 JEUX ET AJUSTEMENTS 74
3.6.1 SURFACES DE L'ENTITE D'ASSEMBLAGE 74
3.6.2 LES JEUX ET AJUSTEMENTS 74
3.6.3 L'USINAGE DES ENTITES 75
3.7 AUTRES SPECIFICATIONS 76
3.8 MODELISATION DE DONNEES OBJET DE L'EMBOITEMENT 77

4. APPROCHES DE LOCALISATION AUTOMATIQUE D'ENTITES D'ASSEMBLAGE 79

4.1 FORMULATION DU PROBLEME 79
4.2 SIMPLIFICATION DU PROBLEME 80
4.3 CONTRAINTES DE LA LOCALISATION 80
4.4 ETAT DE L'ART DE LA GENERATION AUTOMATIQUE D'ENTITES D'ASSEMBLAGE 81
4.5 METHODE MANUELLE 83
4.6 METHODE PAR GRILLE 83
4.7 METHODE PAR OFFSET ET DISCRETISATION 1D 85
4.8 METHODE PAR FORCES DE REPULSION 87
4.9 METHODE PAR K-GON MAXIMUM 92
4.9.1 PRINCIPE 92
4.9.2 DIAMETRE MAXIMUM (K=2) 93
4.9.2.1. Enveloppe convexe 2D 93
4.9.2.2. Algorithme du Rotating Calipers 93
4.9.2.3. Notre algorithme du diamètre maximum (k=2 entités) 95
4.9.3 K-GON MAXIMUM (K ENTITES, K≥3) 96
4.9.3.1. Problématique 96
4.9.3.2. Les algorithmes génétiques 97
4.9.3.3. Notre algorithme 97
4.9.3.4. Les résultats 101
4.9.3.5. Implantation 102
4.9.3.6. Conclusion 103
4.10 BILAN DES METHODES DE LOCALISATION D'ENTITES 104

5. METHODE DE LOCALISATION AUTOMATIQUE D'ENTITES PAR SQUELETTISATION 106

5.1 PRINCIPE 106
5.2 L'ALGORITHME 107
5.2.1 L'ALGORITHME PRINCIPAL 107
5.2.2 CONSTRUCTION DU SQUELETTE 108
5.2.3 SIMPLIFICATION DU SQUELETTE 109
5.2.4 DISCRETISATION DES BRANCHES 111
5.2.5 PLACEMENT DES ENTITES 112
5.2.6 MODIFICATION DE L'INCIDENCE DES SOMMETS PROCHES 112
5.2.7 SUPPRESSION DES SOMMETS D'INCIDENCE TROP FAIBLE 113
5.2.8 FIN DE L'ALGORITHME 113
5.3 EVALUATION DE L'ALGORITHME 114
5.3.1 COMPARAISON METHODE GRILLE 114
5.3.2 VARIANTES 116
5.3.2.1. Choix de la plus petite ou de la plus grande incidence 116
5.3.2.2. Nombre fixe d'entités à placer 116
5.3.2.3. Diamètre de l'entité variable 117
5.4 RESULTATS 118
5.5 IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE LOGICIEL 120
5.6 CONCLUSION 121
5.6.1 EXTENSION A D'AUTRES APPLICATIONS 121
5.6.1.1. Décomposition avancée de modèles en CAO 121

5.6.1.2. Moules à plusieurs parties 121
5.6.1.3. Placement des vis sur un carter 122

6. EMBOITEMENT COMPLET 123

6.1 PROBLEMATIQUE ET CONTRAINTES 124
6.2 DIFFERENTES SOLUTIONS 124
6.2.1 EMBOITURE VERTICALE SIMPLE 124
6.2.2 EMBOITURE VERTICALE DECALEE 126
6.2.3 EMBOITURE VERTICALE VARIABLE 127
6.2.4 EMBOITURE A INCLINAISON CONSTANTE A 45° 129
6.2.5 EMBOITURE A INCLINAISON NORMALE A LA SURFACE 130
6.2.6 BREVET D'INVENTION 131
6.2.7 EMBOITURE PAR PORTIONS 132
6.2.7.1. Emboîture intérieure 132
6.2.7.2. Emboîture partielle 133
6.3 PROFONDEUR DE L'EMBOITEMENT 133
6.3.1 PROBLEMATIQUE 133
6.3.2 ALGORITHME DE GESTION DE LA PROFONDEUR 134
6.4 FORMES IMBRICABLES 135
6.4.1 PROBLEMATIQUE 135
6.4.2 FORMES COMPLEMENTAIRES 136
6.4.3 FORMES R-REGULIERES 137
6.4.4 NOTRE ALGORITHME 138
6.4.5 REPRISE DES ZONES NON R-REGULIERES DU PLOT 140
6.5 EMBOITEMENT ET PERSPECTIVES POUR LES FONCTIONS AVANCEES 141

7. APPLICATIONS 145

7.1 IMPLEMENTATION LOGICIELLE DANS STRATOCONCEPT III 145
7.2 REALISATIONS DE PIECES 147

8. CONCLUSION 160

8.1 TRAVAUX REALISES ET CONCLUSION 160
8.2 PERSPECTIVES 161

1. Introduction

1.1 PROTOTYPAGE RAPIDE ET OUTILLAGE RAPIDE

1.2 LE PROCEDE DE STRATOCONCEPTION

1.3 LA GENERATION AUTOMATIQUE DE PROCESSUS EN FABRICATION PAR COUCHES

1.4 LE LOGICIEL STRATOCONCEPT
1.4.1 Présentation
1.4.2 Historique du logiciel

1.5 L'ASSEMBLAGE EN STRATOCONCEPTION

1.6 L'ASSEMBLAGE
1.6.1 Qu'est-ce que l'assemblage ?
1.6.2 Conception pour l'Assemblage

1.7 CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE
1.7.1 Contexte et enjeux
1.7.2 Objectifs

1.8 PLAN DU MEMOIRE

Dans ce premier chapitre nous présentons le contexte de nos travaux de recherche : le prototypage rapide, et plus particulièrement le procédé de fabrication par couches solides, la Stratoconception. Notre étude se concentre sur la phase, importante, de *génération automatique du processus de fabrication par couches*. Cette phase, transformant le modèle CAO en commandes de pilotage du système de fabrication, est réalisée par le logiciel Stratoconcept. Au cours de la fabrication, si l'étape d'usinage des strates est presque entièrement automatisée grâce aux outils dédiés, nous soulignons que l'assemblage reste encore une opération qui demande une intervention manuelle importante de l'utilisateur. Après avoir présenté l'intérêt de la conduite de nos travaux, au travers des enjeux de notre domaine de recherche, nous définissons nos objectifs principaux de l'intégration de l'assemblage au sein des couches.

1.1 Prototypage Rapide et Outillage Rapide

Le prototypage rapide désigne l'ensemble des techniques permettant de fabriquer des pièces prototypes à partir d'une définition numérique CAO. C'est une méthode de fabrication où la pièce est réalisée par dépôt ou par découpe de matière, couche après couche, et pilotée par ordinateur (Figure 1). Les données d'entrée d'un système de prototypage rapide sont issues d'un modèle CAO de la pièce. Le modèle est alors décomposé dans une représentation intermédiaire, appelées couches, avant la fabrication.
Les principaux avantages de ces procédés de Prototypage Rapide sont la possibilité d'accéder à l'intérieur des modèles et la décomposition de formes

complexes 3D en géométries simples 2D pour la génération et le pilotage du procédé de fabrication.
Cette fabrication est dite rapide car elle permet d'obtenir un prototype en quelques heures, ou quelques jours pour des pièces de grandes dimensions, et également, pour la plupart de ces procédés, cette réalisation ne demande qu'une faible intervention humaine.

Il y a aujourd'hui de nombreux procédés sur le marché (Bernard, 1998, Barlier, 2004a). Parmi les systèmes les plus répandus on peut citer la stéréolithographie, le frittage de poudre, ou encore les imprimantes 3D. Ces technologies sont utilisées dans une grande variété de domaines comme l'ingénierie (automobile ou aéronautique), l'étude de l'ergonomie des produits, la médecine ou encore l'art (Jacobs, 1993, Antoine, 1997, Bernard, 1998).

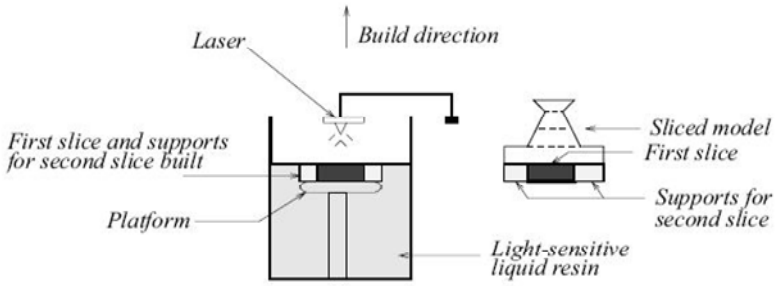


Figure 1 : Principe de la Stéréolithographie (Janardan, 2004)

La validation simple de la pièce n'est pas suffisante. Le besoin est aujourd'hui de représenter le produit par le procédé industriel de fabrication qui produira celui-ci. C'est le concept de l'Outillage Rapide. Les procédés de prototypage rapide réalisent alors directement les outillages utilisés par les procédés tels que la fonderie, le thermoformage, l'injection ou encore l'emboutissage. Seuls les systèmes de prototypage rapide capables de fabriquer des outillages métalliques permettent de supporter les fortes contraintes mécaniques ou thermiques de ces procédés, comme par exemple le frittage de poudre métallique, la Stratoconception ou la fusion de poudre.

Nos travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre du prototypage et de l'outillage rapide et particulièrement du procédé de fabrication par couches solides, la Stratoconception.

1.2 Le procédé de Stratoconception

Comme les autres procédés de prototypage rapide, la Stratoconception permet la fabrication couche par couche d'un objet modélisé en CAO, sans aucune rupture de la chaîne numérique (Barlier, 1991, Cunin, 1996, Barlier, 1998, Cunin, 1998, Barlier, 2000, Barlier, 2003, Barlier, 2004c, Barlier, 2005a).

Le procédé, initié par C. Barlier à la fin des années 80, consiste en la décomposition automatique de l'objet en une série de couches élémentaires appelées strates, dans lesquelles des inserts de positionnement sont placés. Chacune de ces strates est directement mise en panoplie, puis fabriquée par micro-fraisage rapide 2,5 axes ou par découpe laser 5 axes à partir de matériaux en plaques. Tous ces éléments sont ensuite assemblés afin de reconstituer la pièce finale (Figure 2). L'assemblage des strates est pris en compte dès l'étape de conception afin d'assurer la tenue aux contraintes mécaniques pendant l'utilisation (Pelaingre, 2005). Les inserts servent à la fois de pions de positionnement et de liens entre les strates.

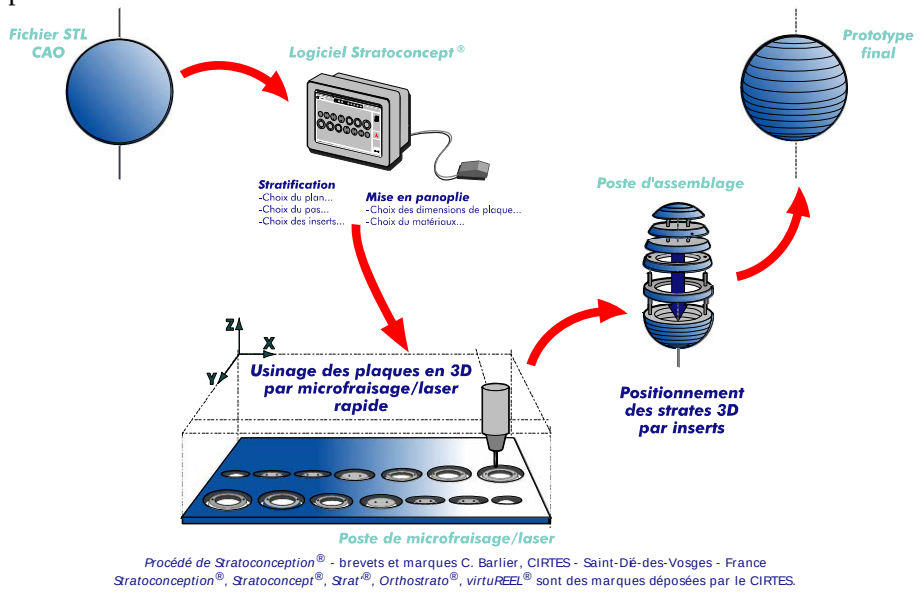


Figure 2 : Principe du procédé de Stratoconception (Cunin, 1998)

Une phase importante du procédé, comme pour les autres systèmes de prototypage rapide, consiste dans la transformation du modèle CAO en commandes de pilotage du système mécanique qui fabrique les couches. Cette préparation, calculée par logiciel, est réalisée par un ensemble d'algorithmes dédié à ces procédés, nommé *génération automatique de processus pour la fabrication par couches*.

1.3 La génération automatique de processus en Fabrication Par Couches

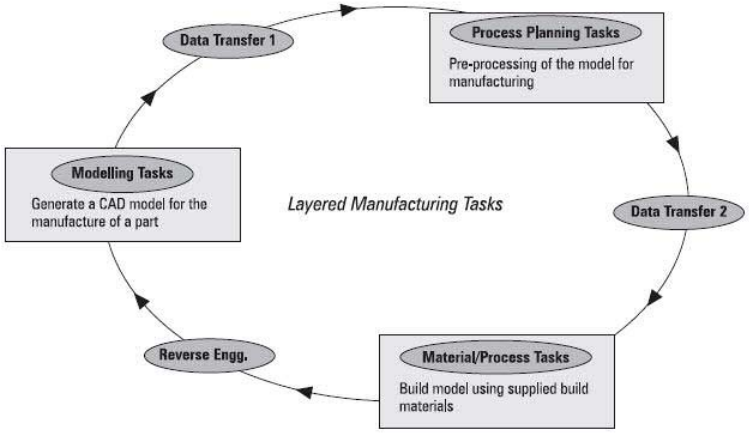


Figure 3 : Etapes du processus de Fabrication Par Couches (Kulkarni, 2000)

Le cycle des différentes étapes pour réaliser une pièce en Fabrication Par Couches est présenté sur le schéma de la Figure 3. La génération du modèle CAO de la pièce est la première étape. Des travaux de recherche s'intéressent à cette modélisation, à son transfert vers le procédé de Prototypage Rapide, à sa précision, ou à sa correction (Marsan, 1998, Yang, 2001, Tong, 2003). Après cette phase, un ensemble d'étapes de *génération automatique du processus* (ou *Process Planning*) est nécessaire pour parvenir à fabriquer une pièce dans la qualité souhaitée. Ces taches sont réalisées par le logiciel associé au procédé de prototypage (comme par exemple le logiciel *Stratoconcept* (Stratoconcept, 2006) pour le procédé de Stratoconception). Elles mettent en jeu des algorithmes informatiques pour la préparation du modèle géométrique à l'étape de fabrication. On trouve des études sur l'orientation du modèle, la génération de supports, le tranchage optimisé (comme le tranchage adaptatif), la génération des parcours d'outil (stratégies, trajectoires et paramètres du procédé) (Bonaldi, 1997, Delebecque, 2000b, Yang, 2001, Liang, 2003, Pandey, 2003). Nos travaux de recherche contribuent à la mise en œuvre de méthodes et d'outils pour cette seconde étape.

Enfin l'étape de fabrication, proprement dite, s'intéresse au domaine des matériaux et des technologies des différents procédés. On peut compléter ce cycle par une étape de contrôle 3D qui permet de valider la pièce fabriquée par rapport au modèle géométrique initial.

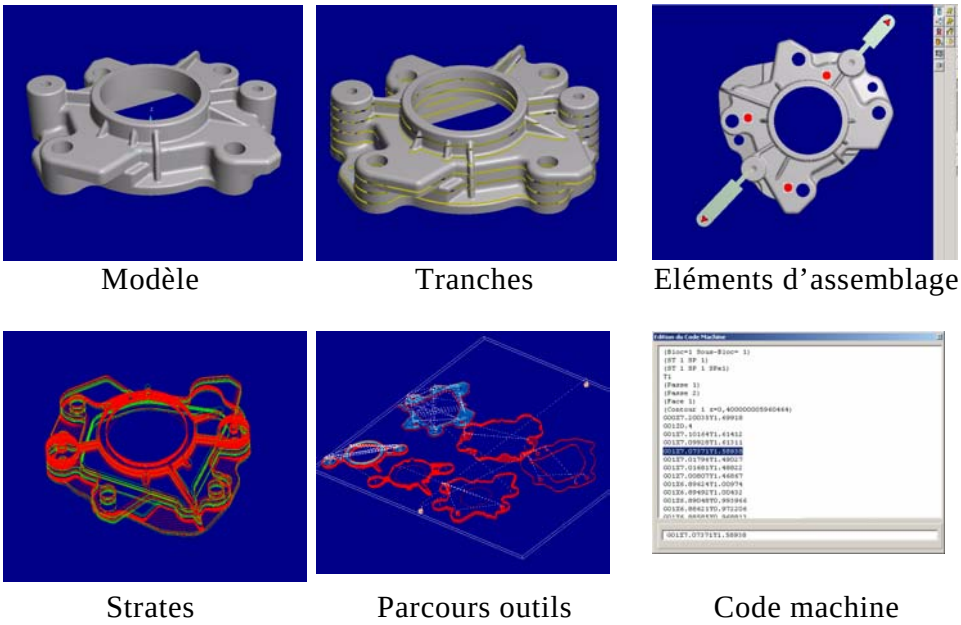
Le procédé de Stratoconception étant un procédé où les couches sont réalisées par des procédés d'usinage (fraisage, découpe laser, fabrication 5axes (Delebecque, 1999a)), il intègre également dans son processus des algorithmes appartenant au domaine de la *génération automatique de parcours d'outil* (Dragomatz, 1997, D'Souza, 2004).

L'outil dédié à cette étape du processus pour le procédé de Stratoconception, est le logiciel *Stratoconcept*.

1.4 Le logiciel Stratoconcept

1.4.1 Présentation

Le logiciel Stratoconcept (Delebecque, 1995, Stratoconcept, 2006) réalise la génération automatique du processus de Stratoconception, à partir de l'importation du modèle STL - standard du prototypage rapide - jusqu'à la génération du code machine pilotant la découpe des strates 3D. Il exécute cette préparation en six phases principales (Figure 4) :



Modèle | Tranches | Eléments d'assemblage

Strates | Parcours outils | Code machine

Figure 4 : Les six phases du logiciel

Le modèle

Le fichier STL d'origine est importé puis réinterprété pour obtenir des informations topologiques et le modifier. Les modèles STL issus de CAO ou de numérisation présentent fréquemment des problèmes de cohérence. Le logiciel permet d'effectuer une analyse précise et une correction automatique ou manuelle de ces défauts. A cette étape, des modifications peuvent être également réalisées comme un changement d'échelle ou un enrichissement de maillage du modèle original.

Le tranchage

Le modèle est ensuite décomposé en couches élémentaires 3D suivant le paramétrage de l'axe de tranchage, des plans de passage des tranches, du matériau et du mode d'assemblage.

Les éléments d'assemblage

Les éléments d'assemblage sont mis en place sur les tranches du modèle. Ils peuvent être des inserts présents à l'intérieur de la pièce ou des pontets rattachés par l'extérieur de la pièce.

La stratification

Chaque strate est constituée de plusieurs sections encore appelées passes. Le nombre de passes par strate est automatiquement calculé par le logiciel en fonction du profil de la strate et du paramètre de précision choisi (Delebecque, 2000b). Le mode d'usinage recto/verso est choisi à cette étape pour l'usinage des couches des deux cotés par retournement.

Le calcul des parcours d'outils

Ce sont les trajectoires de l'outil effectuant la découpe des strates mises en panoplie sur les plaques de matière brute. C'est à cette étape que sont choisis les outils et la machine.

La génération du code machine

C'est le code transmis à la commande numérique. Il est spécifique pour chaque machine et peut être paramétré par la création d'un post-processeur.

1.4.2 Historique du logiciel

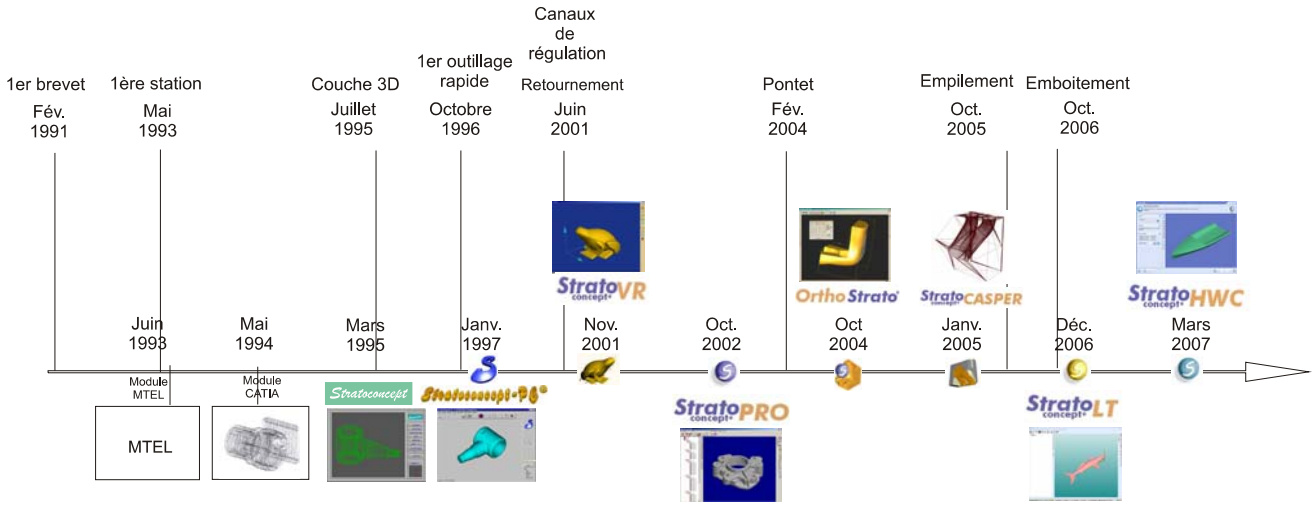


Figure 5 : Historique des versions du logiciel Stratoconcept et des évolutions du procédé

Depuis l'invention du procédé en 1991 (Barlier, 1991), plusieurs versions du logiciel *Stratoconcept* se sont succédées sous divers environnements. Tout d'abord, en 1993, des modules *Stratoconcept* pour les environnements CAO comme MTEL et CATIA. Ensuite la première version autonome *Stratoconcept-PC* sous l'environnement MS-DOS en 1995 (Delebecque, 1995). La version 2 pour le système Windows développé en langage C (Delebecque, 1997, Delebecque, 1999b, Delebecque, 2000b). La version 3 (*StratoPRO*) réécrite complètement en langage objet C++ sous Windows 2000, qui est la version actuelle (Delebecque, 2001).
Des applications dédiées ont ensuite été déclinées : *StratoVR (ou virtuREEL)* pour le collège, *OrthoStrato* pour la réalisation d'orthèses et de prothèses médicales, *StratoHWC* destinée à la réalisation de grandes pièces en polystyrène et également des applications destinées à l'industrie de l'automobile (Delebecque, 1999a, Barth, 2000, Delebecque, 2000a).

Au cours de l'étape de fabrication du procédé de Stratoconception, on peut distinguer trois phases principales : l'usinage des strates, l'assemblage et la finition (Figure 2). Si l'usinage est aujourd'hui entièrement automatisé par le logiciel et les machines dédiés, l'*assemblage* est une opération qui demande encore une intervention importante de l'utilisateur du procédé.

1.5 L'assemblage en Stratoconception

La phase de montage et d'assemblage des couches en Stratoconception est une opération souvent longue et compliquée (voir ci-dessous, §2.2 Méthodes actuelles d'assemblage) étant donné les éléments à mettre en œuvre (inserts, colles, strates en plusieurs parties, etc. …). De plus, ce travail reste à ce jour réalisé manuellement par l'opérateur. L'expérience sur les réalisations met en évidence que le temps d'assemblage représente en moyenne 20 % du temps total de réalisation de la pièce (Figure 6). On ne tient pas compte dans ce pourcentage des temps de prise des colles ou des temps de passage au four pour le brasage. On peut ajouter à cela la préparation logicielle pour la mise en place des éléments de liaison (inserts et pontets), qui peut représenter jusqu'à la moitié de ce temps de préparation logicielle.

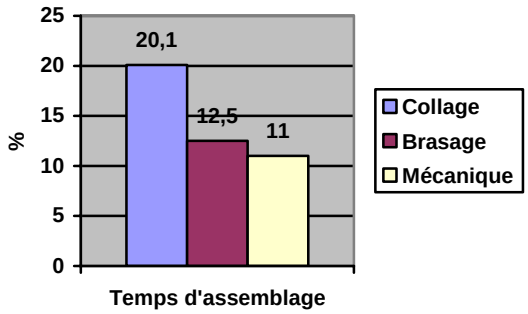


Figure 6 : Temps moyen de l'assemblage en pourcentage du temps total de réalisation d'une pièce en Stratoconception

Pour l'assemblage par brasage, ce temps représente 10 à 15 % suivant le type de brasage tendre ou fort (Thabourey, 2006).
Dans le cas du collage, cette part d'assemblage est de 12 à 27 % suivant le matériau et la complexité de la pièce (Ricatte, 2007).
Enfin pour l'assemblage mécanique il faut, en moyenne, compter environ 11% du temps total.

Avant d'étudier les techniques d'assemblage actuellement mises en œuvre pour le procédé, il nous semble important de définir le terme d'assemblage et de s'intéresser aux méthodes qui peuvent être appliquées pour l'amélioration de sa conception.

1.6 L'assemblage

1.6.1 Qu'est-ce que l'assemblage ?

Le terme d'assemblage désigne le processus de regroupement de plusieurs pièces pour former un seul et même ensemble, un produit. Il représente essentiellement les opérations de manipulation de ces pièces et les opérations pour parvenir à une liaison entre elles.
La manipulation regroupe les opérations comme la reconnaissance, la séparation, le blocage et la mise en position des pièces, c'est à dire, la situation géométrique des pièces les unes par rapport aux autres.
Les opérations de liaison consistent au montage des pièces ensemble, à la réduction des degrés de liberté et à l'établissement d'une connexion fixe entre elles (Heemskerk, 1990).
L'assemblage est un sujet de recherche important dans les domaines où les produits sont constitués de nombreux composants comme l'automobile, l'électronique ou encore l'aéronautique (Naing, 2004). Le travail d'assemblage représente une part importante des coûts de production de produits complexes pour les petites et moyennes productions, comme pour l'aéronau-

tique (IMTI, 2000). C'est un processus qui, souvent, implique un travail difficile et coûteux. Le coût de cette opération peut parfois atteindre jusqu'à 70% de la valeur totale du produit (Bénazet, 1994).
C'est pourquoi de nouvelles méthodologies de conception sont apparues pour réduire ces coûts comme la *Conception pour l'Assemblage* (Hsu, 1998).

1.6.2 Conception pour l'Assemblage

La *Conception pour l'Assemblage* (ou *Design For Assembly* en anglais, encore abrégé par DFA) évalue la capacité d'un produit, pour une conception donnée, à s'assembler et fournit des règles pour reconcevoir les pièces pour faciliter l'assemblage (Jakiela, 1986, Eskilander, 2001). Cela permet d'identifier des contraintes physiques de l'assemblage dès la phase de conception.
Beaucoup de méthodes de DFA sont basées sur une analyse simple : la comparaison de plusieurs conceptions possibles d'un produit. Elles aboutissent alors à deux principes simples : *Eliminer des étapes* du processus d'assemblage (par exemple en éliminant une pièce) et *rendre l'assemblage plus simple* (par exemple en donnant à toutes les pièces une seule direction d'assemblage) (Heemskerk, 1990) (Figure 7). Cependant il faut prendre garde à ne pas augmenter le coût de l'assemblage ou à rendre les pièces plus complexes et donc plus coûteuses à fabriquer.

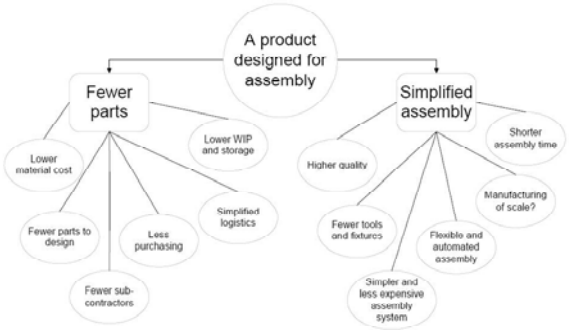


Figure 7 : Deux principes simples de DFA (Eskilander, 2001)

Ces méthodes de DFA sont ensuite intégrées au système de conception assistée sur ordinateur (Legardeur, 2003).

1.7 Contexte et objectifs de la recherche

1.7.1 Contexte et enjeux industriels

L'industrie européenne de l'assemblage représentait 12 milliards d'euros de chiffre d'affaires en 2003 (EFAC, 2003). Ce domaine a été identifié comme un domaine majeur pour l'industrie avec plusieurs besoins, en terme de recherche et développement, pour le futur à moyen et à long terme (IMTI, 2000) :

- Assemblage intégré : Développer des outils et des techniques pour l'intégration de la modélisation et la simulation des assemblages pour parvenir à la conception de l'assemblage et à optimiser les opérations liées à celui-ci.
- Amélioration des technologies de fixation en optimisant les systèmes de fixation pour réduire les coûts, assurer une meilleure performance et rendre l'assemblage plus facile et réutilisable (par exemple avec intégration des fixations dans la pièce elle-même et réalisation de son auto-positionnement)

En ce qui concerne le domaine du développement de produits nouveaux, les solutions de prototypage et d'outillage rapide apportent, aujourd'hui aux industriels, une véritable réponse aux délais de conception et d'industrialisation de plus en plus réduits. Les produits et services du prototypage rapide représentaient 808 millions de dollars en 2005 (Wohlers Report 2006), soit un accroissement de 14.6% par rapport à l'année 2004.

Le procédé Stratoconception a permis d'apporter des solutions grâce à des gains de productivité pour de nombreuses applications, notamment pour des outillages dans l'industrie du conditionnement ou de l'automobile (Pelaingre, 2003, Cunin, 2005).

De nouvelles possibilités s'offrent alors dans la conception interne des outillages en intégrant des systèmes de régulation plus optimisés ou des capteurs permettant d'envisager l'*Outillage Rapide Intelligent* : un outillage qui, par le traitement en temps réel d'informations issus des capteurs, réalisera une boucle de régulation entre le matériau, l'outillage et le procédé de fabrication. De récentes innovations du procédé de Stratoconception ont permis d'apporter cette valeur ajoutée au cœur des outillages spécialement pour leur refroidissement (Barlier, 2004c) et pour leur assemblage (Figure 8).

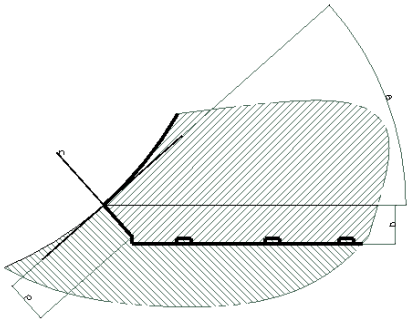


Figure 8 : Assemblage par emboîture (Barlier, 2003)

Le contexte des domaines de l'assemblage, du prototypage rapide, et de ces innovations du procédé de Stratoconception, justifie l'intérêt de la conduite de travaux de recherche pour la mise en œuvre de ces applications du procédé.

1.7.2 Objectifs et contribution de la thèse

L'objectif de ces travaux est l'intégration de l'assemblage au sein des couches, en améliorant la fixation de celles-ci et en réduisant la main d'œuvre pour le montage et surtout les coûts qu'elle engendre. La conception de l'assemblage deviendra alors une opération logicielle automatisée et systématique et permettra de simplifier l'opération manuelle. L'objectif à moyen terme est de parvenir à une automatisation de la phase d'assemblage du procédé. Pour cela quatre points principaux doivent être atteints :

- Développer un nouveau concept d'assemblage grâce à un système de génération automatique dans le processus, pour réduire l'effort nécessaire pour réaliser l'assemblage des pièces réalisées en Stratoconception. Ce concept devra être applicable quelque soit la pièce et ne pas être limité à une famille spécifique de pièces.
- Rendre l'opération d'assemblage la plus systématique possible, en minimisant les interventions manuelles et les incertitudes dues au choix de l'utilisateur.
- Concevoir et développer des algorithmes pour automatiser cette opération par le logiciel.
- Réaliser un prototype du logiciel et montrer la faisabilité de ces nouvelles méthodes d'assemblage au travers de réalisations physiques de pièces.

Les travaux de cette thèse se sont concentrés sur le développement de la partie informatique de la problématique (voir §1.1.3 La génération automatique de processus en Fabrication Par Couches page 14). Les aspects complémentaires en termes mécaniques (portant sur des essais de résistance mécanique, sur l'usinage, ou sur le contrôle dimensionnel des pièces) ne feront pas l'objet de nos présentes recherches.

1.8 Plan du mémoire

Le premier chapitre de ce mémoire nous a permis de rappeler le contexte de notre sujet de recherche : le prototypage rapide, le procédé de Stratoconception et l'assemblage, en présentant les enjeux et nos principaux objectifs.

Le chapitre 2 dresse tout d'abord un bilan des méthodes actuelles utilisées pour l'assemblage des strates du procédé de Stratoconception. Nous décrivons les techniques de fixation (collage, brasage, assemblage mécanique…) et des éléments de positionnement (inserts, pontets). Puis nous réalisons une

analyse des inconvénients et des difficultés de mise en œuvre de ces méthodes.

Dans le chapitre 3, nous proposons une nouvelle méthodologie d'assemblage, l'emboîtement. Nous décrivons la terminologie des composants de notre solution, les entités d'assemblage, leur dimensionnement et surtout leur positionnement au sein des couches.

Le chapitre 4 nous permet de décrire diverses méthodes de localisation de ces entités au travers d'algorithmes de placement par grilles, par forces de répulsion ou par recherche du n-gon d'aire maximum inscrit dans un polygone quelconque. Nous proposons un algorithme génétique optimisant le positionnement des entités.

Le chapitre 5 présente notre méthode de localisation automatique des entités par squelettisation. Nous analysons les résultats logiciels et les réalisations du procédé avec ce nouvel assemblage.

Le chapitre 6 présente une approche différente : l'emboîtement complet. La génération de l'emboîture à partir des contours de l'inter-strate. Elle induit la problématique des formes imbricables, c'est-à-dire la création de formes mâles et femelles complémentaires et réalisables par l'outil d'usinage (problème d'accessibilité de l'outil).

Enfin, nous concluons ce mémoire en mettant en évidence les apports de ces travaux et les premiers résultats industriels au travers des outils implantés dans le logiciel du procédé, et des pièces assemblées grâce à l'emboîtement.

2. Assemblage des couches en Stratoconception

2.1 L'ETAPE D'ASSEMBLAGE EN STRATOCONCEPTION

2.2 METHODES ACTUELLES D'ASSEMBLAGE
2.2.1 Les différents procédés d'assemblage industriels existants
2.2.2 Modes d'assemblage actuels utilisés en Stratoconception
2.2.3 Les critères de choix du mode d'assemblage pour la Stratoconception
2.2.4 La mise en œuvre de l'assemblage
2.2.5 Inconvénients des techniques

2.3 LES INSERTS ET LES PONTETS
2.3.1 Les inserts
2.3.2 Les pontets
2.3.3 Inconvénients et limites des inserts et des pontets
2.3.4 Inserts non débouchants

2.4 LES DIFFICULTES DE L'ASSEMBLAGE ACTUEL
2.4.1 Qualité géométrique de la pièce
2.4.2 Tenue mécanique de l'assemblage
2.4.3 Effets sur l'opérateur du procédé
2.4.4 Les limites dans l'utilisation de la pièce
2.4.5 Conséquences générales

2.5 BILAN DES METHODES D'ASSEMBLAGE
2.5.1 Bilan
2.5.2 Idée de l'emboîtage

Dans ce second chapitre nous proposons un bilan des méthodes actuelles utilisées pour l'assemblage des strates du procédé de Stratoconception : le collage, le brasage, et l'assemblage mécanique. Nous montrons les inconvénients et les limitations de ces techniques de fixation comme la préparation de l'assemblage, l'application du liant, et le bridage. Nous analysons les éléments de positionnement (inserts, pontets) et leurs limites. Nous décrivons une première amélioration par la réalisation d'*inserts non débouchants*. Cette étape d'assemblage est essentielle car elle influe sur la qualité géométrique de la pièce et garantit la bonne tenue mécanique de la pièce. Elle représente aussi une part importante du temps de réalisation du prototype et elle est directement dépendante de l'expérience et de l'habileté manuelle de l'opérateur. Les techniques utilisées aujourd'hui ne garantissent pas toujours la répétabilité du système et peuvent entraîner une rupture de la chaîne numérique du procédé. Nous finissons ce chapitre en évoquant l'idée de la mise en œuvre d'un autre mode d'assemblage, l'emboîtage.

2.1 L'étape d'assemblage en Stratoconception

La réalisation d'une pièce par le procédé de Stratoconception peut se résumer en plusieurs étapes successives (Figure 9) :

- Le logiciel : c'est l'étape où est calculée la décomposition virtuelle du modèle CAO en couches successives et où sont calculées les trajectoires d'outil pour le pilotage de la machine qui fabriquera les couches. Lors de cette étape, l'opérateur met en place également les éléments de positionnement qui l'aideront au réassemblage de la pièce.
- La réalisation : c'est l'usinage par micro-fraisage, par découpe au laser ou par découpe au fil chaud des couches mises en panoplie dans des plaques de matériaux (bois, plastiques ou métaux)
- L'assemblage : c'est une opération manuelle réalisée par l'opérateur qui consiste à positionner grâce aux éléments de guidage (inserts ou pontets) et à fixer les couches entre elles, en les collant par exemple.
- Le parachèvement : c'est une étape de finition de l'état de surface de la pièce, si cela est nécessaire pour la fonctionnalité du prototype, avec par exemple l'application d'un vernis ou d'une peinture.



(a) Logiciel



(b) Réalisation



(c) Assemblage



(d) Parachèvement

Figure 9 : Etape d'assemblage dans le cycle de réalisation d'une pièce

L'étape d'assemblage est essentielle pour plusieurs raisons :

- elle influe sur la qualité géométrique de la pièce
- elle garantit la bonne tenue mécanique de la pièce par la bonne mise en œuvre des éléments de liaison
- elle représente une part importante du temps de réalisation du prototype
- elle est la plus directement dépendante de l'expérience et de l'habilité manuelle de l'opérateur

2.2 Méthodes actuelles d'assemblage

2.2.1 Les différents procédés d'assemblage industriels existants

	Désignation de l'assemblage	Démontage		Apport de matériau		Mode de liaison			
		oui	non	avec	sans	D	E	P	C
Liaison physique et physico-chimique	Collage thermodurcissable		×	×					×
	Collage thermoplastique	×	×	×					×
	Collage par colle solvante		×	×					×
	Brasage		×	×					×
	Soudage laser		×		×			×	
	Soudage électrique		×		×			×	
	Soudage par ultrasons		×		×			×	
	Soudage par friction		×		×			×	
	Soudage par diffusion		×	×	×				×
	Remplissage, coulée	×	×	×	×			×	
	Aimantation	×		×	×			×	
Liaison par déformation	Vissage	×		×			×		
	Rivetage		×	×		×			
	Clavetage	×		×			×		
	Clipage	×			×		×		
	Emboîtage	×			×		×		
	Pliage, agrafage		×		×	×			
	Frettage		×		×		×		
	Magnétoformage		×	×	×	×			
	Dilatation, rétreint		×		×	×			
	× *en fonction de l'étude de la liaison*								
	Mode de liaison :								
	D = liaison par déformation plastique								
	E = liaison par déformation élastique								
	P = liaison physique (principalement thermique)								
	C = liaison physico-chimique (principalement par adhésion)								

Tableau 1 : Les modes d'assemblage (Bénazet, 1994)

On peut lister les techniques industrielles existantes d'assemblage en les regroupant en deux familles : celles réalisées par déformation plastique ou élastique et celles réalisées par une réaction physico-chimique (Tableau 1).

Plusieurs critères permettent de choisir un mode d'assemblage (Daumain, 1982, Leroy, 1982, Bénazet, 1994, Reyne, 2001):

- Son aptitude au démontage, si cela est nécessaire pour le produit
- Le matériau à assembler et ses caractéristiques
- La forme des surfaces du produit à assembler (ex : plans, cylindres)
- Le besoin d'apport d'un matériau (ex : de la colle) ou d'un élément de liaison (ex : une vis)
- La nature de l'action pour la liaison comme la déformation plastique (ex : le rivetage), une déformation élastique (ex : le clipage ou le vissage), un procédé physique (ex : fusion, aimantation), un procédé chimique (ex : le collage par adhésion).
- Les équipements technologiques à mettre en œuvre (ex : les outils)
- Le niveau de résistance mécanique souhaité
- L'environnement et les paramètres d'utilisation du produit (température, étanchéité, etc.)
- L'esthétique du produit
- Les quantités de pièces à réaliser
- La main d'œuvre disponible (qualification de l'opérateur)
- Le prix de revient

2.2.2 Modes d'assemblage actuels utilisés en Stratoconception

Le Tableau 2 donne les modes d'assemblage utilisés aujourd'hui pour les outillages en Stratoconception. Ils sont fonction de l'application du prototype et du matériau utilisé. Essentiellement trois modes d'assemblage sont utilisés : le collage, le brasage, l'assemblage mécanique par vissage. Par le passé, quelques essais ont également été entrepris en soudage.

Mise en forme des métaux		Fonderie		
Type d'outillage	**Série**	**Matière**	**Assemblage**	**Post-traitement**
Modèle	1-10	MDF	**Collage Vissage**	- Bouche pore fonderie - Bouche pore + vernis fonderie
	10-50	Multiplis Bouleau		
	10-50	Multiplis hêtre		
	50-2000	Délignit		
	1-10	LAB rose (d=0.65)	**Collage**	Bouche pore fonderie
	50-2000	LAB vert (d=1)	**Collage**	Aucun
Boîte à noyaux	1-10	MDF	**Collage Vissage**	- Bouche pore fonderie - Bouche pore + vernis fonderie
	10-50	Multiplis Bouleau		
	10-50	Multiplis hêtre		
	1-10	LAB rose (d=0.65)	**Collage**	Bouche pore fonderie
	50-2000	LAB vert (d=1)	**Collage**	Aucun
Modèle pour très grande pièce	1-3	EPS de modelage	**Collage**	Aucun ou scotch d'emballage sur les flancs
Modèle perdu pour très grande pièce	1	EPS de modelage	**Collage**	Aucun
Plaque modèle pour outillage permanent	>10000	Aluminium 5083	**Collage**	Aucun
	>10000	Acier XC38	**Collage**	Aucun
Outillage pour Injection PMP / Cire	>10000	90MCWV5	**Mécanique Brasage**	Aucun
Coquilles gravité	>10000	90MCWV5	**Mécanique Brasage**	Aucun
	>10000	E24	**Mécanique Brasage**	Aucun
Outillage pour Injection haute pression	>15000	Z38CDV5	**Mécanique Brasage**	Aucun

Mise en forme des métaux		Formage de Tôles		
Type d'outillage	**Série**	**Matière**	**Assemblage**	**Post-traitement**
Outillage prototype d'emboutissage	1-25	PA12	**Collage Vissage**	Aucun
	1-50	LAB vert (d=1)		
	50-500	LAB gris (d=1.2)		
Outillage prototype de formage	50-2000	Délignit	**Collage Vissage**	Aucun
	>200	C35		
Outillage série d'emboutissage	<20000	C35	**Collage Vissage**	Aucun

Mise en forme des plastiques		Procédés Basse pression /Basse température		
Type d'outillage	**Série**	**Matière**	**Assemblage**	**Post-traitement**
Maître modèle	10-20	MDF	**Collage Vissage**	Aucun
Outils de thermoformage	10-25	Multiplis Bouleau	**Collage Vissage**	Bouche pore
Outil thermoformage petite série	1-50	LAB vert (d=1)	**Collage Vissage**	Aucun
	50-500	LAB gris (d=1.2)		
Outil thermoformage grande série	>1000	Aluminium 5083	**Collage Vissage**	Aucun
Moule pour moulage contact	1-10	MDF	**Collage Vissage**	Apprêt spécial appliqué par le transformateur
Moule de coulée PU	2	MDF	**Collage Vissage**	Bouche pore + saturation agent de démoulage
Injection PMP	>1000	Aluminium 5083	**Vissage**	Aucun
Soufflage	>2500	Aluminium 5083	**Collage Vissage**	Aucun

Mise en forme des plastiques		Procédés Haute pression /Haute température		
Type d'outillage	**Série**	**Matière**	**Assemblage**	**Post-traitement**
Injection plastique	série	40CMD8	**Collage Brasage**	Aucun
	grande série	Z38CDV5	**Collage Brasage**	Aucun
	grande série	45CDV5	**Collage Brasage**	Aucun

Tableau 2 : Outillages rapides en Stratoconception et assemblage associé (CIRTES, 2006)

2.2.2.1. Le collage

C'est l'assemblage, grâce à un adhésif, de deux pièces avec comme principale fonction de transmettre les efforts mécaniques entre les deux pièces (Figure 10).

A chaque matériau qualifié pour le procédé de Stratoconception est associé une colle spécifique (Tableau 3) : pour les bois des colles vinyliques, pour les planches usinables PU des résines à base de polyuréthane, pour les plastiques des colles cyanoacrylates et pour l'aluminium des colles structurales à base de résine époxyde qui sont ensuite montées en température au four (180°C). Enfin, pour l'application spécifique des pièces transparentes en PMMA, une colle spéciale est polymérisée par un flashage UV.



Figure 10 : Assemblage par collage

Matière	Dimensions en mm	Collage
MDF	2440*1220*3 2800*2070*8 2800*2070*10 2800*2070*12 2800*2070*16 2800*2070*19 2800*2070*22 2800*2070*25	**Colle Vinylique (rapide ou lente)**
Contreplaqué modelage bouleau de finlande	3000*1530*4 3000*1530*6.5 3000*1530*9 3000*1530*12 3000*1530*15 3000*1530*18 3000*1530*21 3000*1530*24	**Colle Vinylique (rapide ou lente)**
Planche usinable Ref 650 Densité 0.65	1000*500*10 1000*500*20 1000*500*30	**Biresin G26 (rapide)**
Planche usinable Ref M950 Densité 1.2	1000*500*25	**Resuran 111 (lente)**
Planche usinable Ref 1000 Densité 1	1000*500*20	**Biresin G26 (rapide)**
Mousses PU Densité de 33 à 500kg/m3	2500*1200*Epaisseur sur demande	**Loctite Supertack ST-400 (en bombe par double encollage)**
Plastique PVC	2000*1000*4 2000*1000*5 2000*1000*6 2000*1000*7 2000*1000*8 2000*1000*10 2000*1000*12 2000*1000*15 2000*1000*20 2000*1000*25	**Cyanoacrylate Loctite 495 ou 460**
Plastique PMMA	2030*1510*4 2030*1510*5 2030*1510*6 2030*1510*8 2030*1510*10 2030*1510*12 2030*1510*15 2030*1510*20 2030*1510*25	**NC**
Aluminium et Acier	NC	**Cyanoacrylate Loctite 401-454 ou Monopox 1196**

Tableau 3 : Matériaux et Collage en Stratoconception (CIRTES, 2006)

2.2.2.2. Le brasage

Le brasage est une technique d'assemblage de pièces métalliques grâce à un métal d'apport qui possède une température de fusion inférieure au matériau à assembler. L'adhésion des pièces se fait par mouillage et non par fusion avec le métal d'apport. On parle de brasage tendre si la température de brasage est inférieure à 450 °C et de brasage fort au delà. Il y a alors une liaison

chimique entre les pièces à assembler et la brasure. Cette technique est utilisée pour les outillages soumis à de hautes pressions et à de hautes températures (Tableau 2).
La Figure 11 illustre un outillage d'injection plastique assemblé par brasage tendre (CIRTES, 2004). Le métal d'apport est un alliage d'étain et d'argent, sous la forme d'une pâte étalée au pinceau, puis la pièce a été chauffée au four à 230 °C sous une pression mécanique réalisée grâce à des ressorts. La principale difficulté est la maîtrise de la répartition régulière de la brasure dans l'outillage (coulures, manques de brasure provoquant un délaminage ou des fuites dans l'outillage au moment de l'injection).

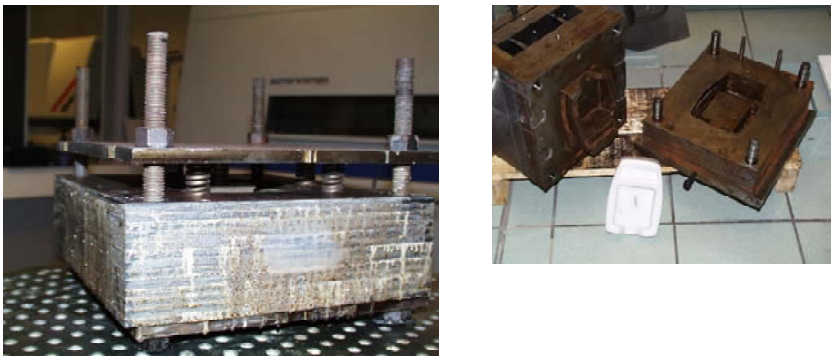


Figure 11 : Brasage tendre - Outillage d'injection plastique – Projet CRAFT FASTOOL (CIRTES, 2004)

Un autre exemple d'assemblage par brasage fort pour un outillage de fonderie aluminium (Thabourey, 2006) est présenté sur la Figure 12. La brasure, un alliage de cuivre, se présente sous forme de feuillards d'épaisseur de 0.1 mm, préalablement découpés aux formes des strates et placés entre chaque strate. L'outillage a été chauffé au four sous vide à plus de 1100°C, sous une pression exercée par des poids. L'assemblage par brasage fort permet d'obtenir un outillage aux caractéristiques équivalentes à celles des moules conventionnels usinés dans la masse.



Figure 12 : Brasage fort pour outillage fonderie injection aluminium – Projet CRAFT MOLSTRA (Thabourey, 2006)

2.2.2.3. L'assemblage mécanique / Le vissage

Ce mode d'assemblage mécanique est réalisé à l'aide de vis, d'écrous et de tiges filetées par déformation élastique. Un exemple d'assemblage vissé a été réalisé pour un outillage d'injection polystyrène pour une application automobile (Figure 13). Des logements ont été préalablement modélisés en CAO ou par le logiciel du procédé pour le passage de vis et de tiges filetées. Le principal problème posé est l'espace nécessaire pour la mise en place des vis sur des petites surfaces.

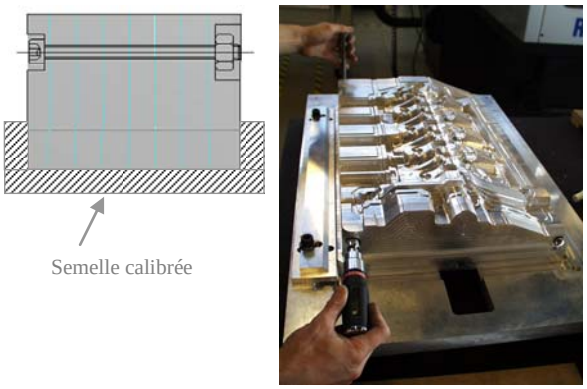


Figure 13 : Outillage PMP (Contrat Peugeot-Citroën Automobiles) (Cunin, 2005)

2.2.2.4. Le soudage

Le mode d'assemblage par soudage a déjà été testé sur un outillage de presse (Figure 14) pour une pièce de serrure automobile (Muller, 1996). Cette technique, assez difficile à mettre en œuvre sur des outillages avec des formes libres, a été remplacée aujourd'hui par le brasage.

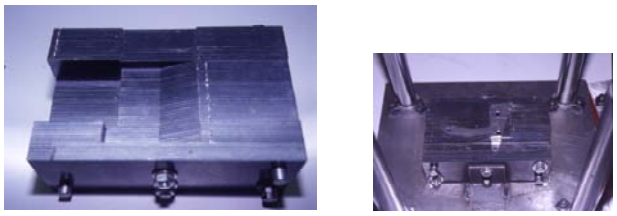


Figure 14 : Outillage de pliage soudé (Muller, 1996)

2.2.3 Les critères de choix du mode d'assemblage pour la Stratoconception

Nous faisons ici une analyse des critères de choix d'un mode d'assemblage (2.2.1 Les différents procédés d'assemblage) pour les besoins spécifiques du procédé de Stratoconception.

L'aptitude au démontage

La possibilité de démonter un prototype ou un outillage réalisé en Stratoconception permet de remplacer une partie des strates. Le principal intérêt est de pouvoir suivre les changements de la définition du produit lors de sa phase de conception. Un exemple de cette application a été réalisé pour un outillage d'injection plastique pour l'automobile (Cunin, 2005) (Figure 15).

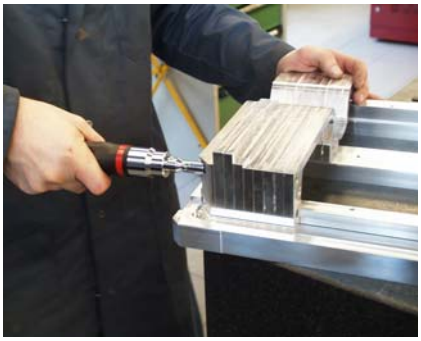


Figure 15 : Démontage de strates dans un outillage

Il s'agit cependant d'une application particulière, la majorité des prototypes réalisés ne nécessite pas cette aptitude au démontage.

Le matériau à assembler

Le tableau des matériaux (Tableau 3) montre la diversité des matériaux utilisés en Stratoconception. Tous les matériaux pouvant être approvisionnés en plaques et découpés sont susceptibles d'être utilisés. On peut regrouper ces matériaux en quatre grandes familles :

- Les bois
- Les plastiques
- Les résines PU
- Les métaux

La forme des surfaces du produit

Dans notre application cela se résume assez simplement. Nous avons deux strates à assembler. Les deux strates ont une surface de contact plane. Les contours de cette surface sont dépendants de la forme de ces strates. Les dimensions de cette surface peuvent être très faibles pour des petites pièces à parois fines (ex : flacon de cosmétique) à très importantes pour des outillages massifs de très grandes dimensions (ex : modèle de moulage au contact d'une cabine de simulateur).

Le besoin d'apport d'un matériau ou d'un élément de liaison

Le besoin d'un apport de matériau (ex : colle ou brasure) est un inconvénient car il nécessite sa mise en place sur la surface d'inter-strate et cela strate après strate. Il est nécessaire de déposer ce matériau au bon endroit et régu-

lièrement sur cette surface, et cela nécessite donc un système mécanique complexe ou une main d'œuvre importante si cette opération est réalisée par un opérateur. Dans le cas de matériau sous forme de feuillard (ex: brasure), il est nécessaire de réaliser une forme identique à la surface de contact. Des éléments de liaisons (ex : vis) sont parfois difficiles à mettre en place étant donné les géométries complexes des strates à assembler.

La nature de l'action pour la liaison

La nature de l'action pour la liaison comme la déformation plastique, élastique ou un procédé physique ou chimique n'est pas un critère de choix déterminant pour le procédé, sauf si elle entraîne des conséquences sur la protection de l'opérateur (par exemple le contact avec la peau ou l'inhalation d'une colle) ou sur les moyens technologiques mis en œuvre (ex : la nécessité d'un four de cuisson ou d'une machine mécanique d'assemblage etc.) . On préférera des équipements manuels ou des équipements légers.

Les équipements technologiques à mettre en œuvre

Les équipements à mettre en œuvre ne doivent pas être importants. En effet, pour la réalisation de prototypes unitaires on ne peut pas utiliser des équipements, qui se justifient pour de la production de moyenne ou grande série, mais qui pour notre application engendreraient des coûts excessifs et par conséquent un prix de revient trop élevé de la pièce.

Le niveau de résistance mécanique souhaité

Les prototypes d'aspect ou géométriques ne nécessitent pas une résistance mécanique particulière. Les prototypes fonctionnels doivent résister aux efforts auxquels ils sont soumis lors de leur utilisation (ex : engrenage dans un mécanisme). Pour les outillages, qui sont soumis à de très fortes contraintes thermiques et mécaniques, comme c'est le cas pour la fonderie ou l'injection plastique, le choix de l'assemblage est fortement dépendant son application (2.2.2 Modes d'assemblage actuels utilisés en Stratoconception).

L'environnement et les paramètres d'utilisation du produit (température, étanchéité, etc.)

Les outillages doivent tenir compte des contraintes d'utilisation c'est à dire les contraintes technologiques des divers procédés de fabrication de mise en formes des plastiques ou des métaux. Parmi ces contraintes, on peut citer les efforts mécaniques ou les pressions exercés, les températures élevées, l'étanchéité des empreintes, le transfert thermique des outils, et des interactions chimiques avec le liant.

L'esthétique du produit

La qualité esthétique de l'assemblage va être visible essentiellement sur le joint de l'inter-strate. Donc le mode d'assemblage devra avant tout éviter

tous les bourrelets ou coulures à cet endroit. L'objectif étant d'obtenir une pièce réassemblée ne laissant plus apparaître les strates.

Les quantités de pièces à réaliser

Dans le cadre du prototypage et de l'outillage rapide, la majorité des pièces à réaliser sont unitaires. Cela signifie que le choix du mode d'assemblage doit tenir compte de la complexité de sa mise en œuvre et surtout s'assurer que le temps d'assemblage ne devienne pas l'opération principale dans la réalisation de la pièce (voir §2.1 L'étape d'assemblage en Stratoconception).

La main d'œuvre disponible (qualification)

Les utilisateurs du procédé ne possèdent pour la plupart pas de qualification particulière en modelage ou en ajustement mécanique. De plus l'environnement d'utilisation du procédé est plus proche de celui du bureau d'étude que de l'atelier.

Le prix de revient

Le coût de revient de l'assemblage d'une pièce ne doit pas représenter plus de 1/5 du coût total de la pièce, sans quoi le prix d'une pièce ne resterait pas concurrentiel par rapport aux autres procédés du marché. Par conséquent les coûts de la main d'œuvre, des équipements, du temps de montage doivent être les plus bas possibles pour ne pas augmenter le prix de revient d'un prototype.

On peut résumer les critères recherchés pour notre mode d'assemblage dans le tableau suivant :

Critères de choix	Pour la Stratoconception
Démontable	Non, sauf pour certaines applications
Matériaux à assembler	Bois, Plastiques, Résines, Métaux
Formes et surfaces	Deux surfaces planes de formes quelconques Qualité des surfaces bonne car souvent usinée
Apport de matériau ou d'éléments de liaison	Aucun ou sinon rapide et facile à mettre en œuvre Eléments de liaison si la géométrie de la pièce le permet
Nature de la liaison	Indifférente
Moyens	Equipements légers et peu onéreux
Résistance	Faible pour les prototypes esthétiques, géométriques Importante (dépend du procédé pour les outillages)
Température, étanchéité, déformation	Outillages : suivant les contraintes du procédé de production
Aspect	Bonne finition du joint, pas de bourrelets visibles
Quantité	Pièce unitaire
Prix de revient	Bas

Tableau 4 : Critères de choix du mode d'assemblage pour la Stratoconception

2.2.4 La mise en œuvre de l'assemblage

Nous allons décrire ici la procédure de montage et d'assemblage d'un assemblage réalisé par collage (Figure 16). L'ensemble de cette opération est effectuée manuellement par l'opérateur du procédé.

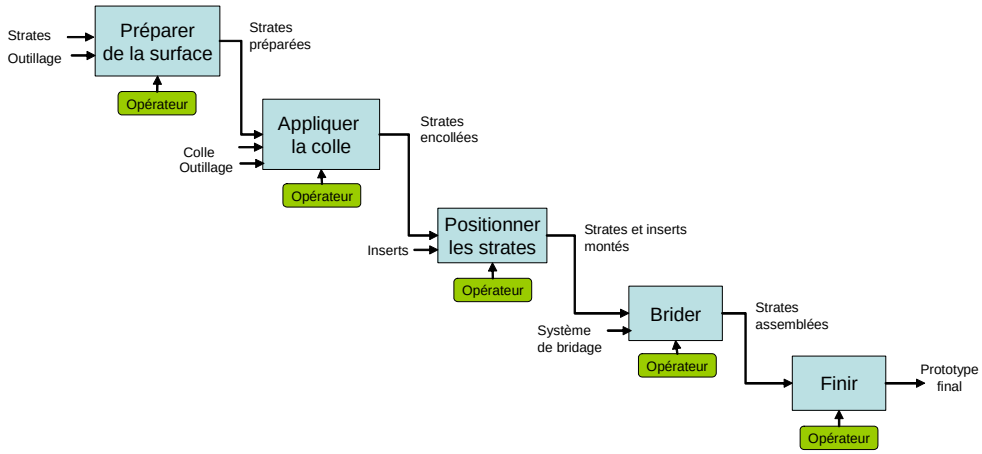


Figure 16 : Graphe des actions du montage/assemblage en Stratoconception par collage

La première action d'assemblage, une fois les strates usinées, est la *préparation des surfaces* à coller en dépolissant les surfaces, ce qui assure une bonne qualité de collage. La seconde phase est l'*application de la colle* sur l'ensemble de la surface entre 2 strates. Cette opération est réalisée à l'aide de divers outillages suivant le type de colle et la taille de la pièce : tube pour les cyanoacrylate, au pistolet à cartouches en cordons réguliers. Elle est répartie ensuite avec une spatule, un pinceau ou un rouleau (Figure 17b) ou encore au doseur de colle par gouttelettes. Les deux strates sont ensuite *positionnées* à l'aide des inserts (Figure 17c) et réassemblées. La phase suivante est le *bridage*, réalisée par la mise en place de diverses brides sur un ensemble de plusieurs strates (Figure 18). Enfin, après séchage de la colle, une *finition* est parfois nécessaire pour retirer les surplus de colle restant sur les joints.

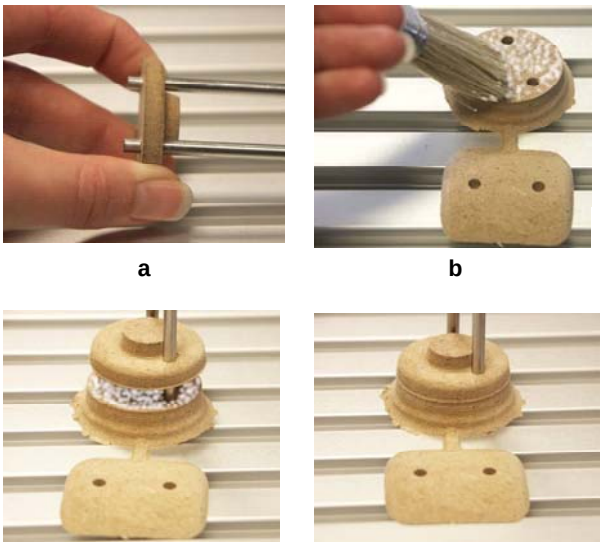


Figure 17 : Etapes de montage

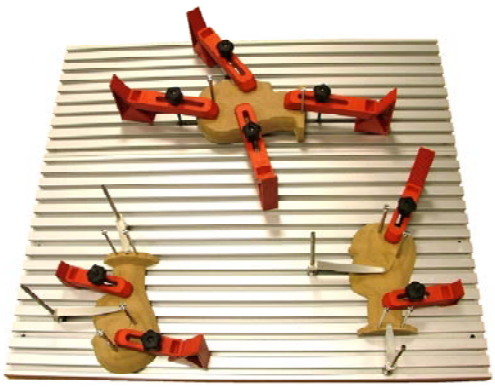


Figure 18 : Bridage

2.2.5 Inconvénients des techniques

Nous résumons ici les divers inconvénients identifiés pour l'ensemble des techniques d'assemblage utilisées en Stratoconception. Ils sont regroupés suivant les phases de mise en œuvre de l'assemblage précédemment présentées (Figure 16) : la *préparation de l'assemblage*, l'*application du liant* et le *bridage*. Le *positionnement des strates* étant réalisé par les inserts et les pontets, nous présenterons ses inconvénients dans le paragraphe 2.3.3 (Inconvénients et limites des inserts et des pontets, page 42).

2.2.5.1. La préparation de l'assemblage

La phase de préparation précédant l'opération d'assemblage elle-même présente plusieurs inconvénients pour l'opérateur et la qualité de la pièce finale :

Choix de la technique et de ses composants
Le choix de la technique d'assemblage et de ses composants (colles, brasures etc.…) est fait par l'opérateur. Une mauvaise adéquation entre le matériau et le liant peut entraîner un décollage du prototype. De plus ce choix représente une difficulté pour l'opérateur s'il ne possède pas de compétences dans ce domaine.

Défauts géométriques des strates
Si les strates possèdent un défaut de planéité ou si l'épaisseur de celles-ci n'est pas régulière, cela entraînera des erreurs d'empilage en Z et un défaut visible au niveau du joint d'inter-strate après assemblage. Au moment de l'usinage, un défaut de réglage de l'origine pièce en Z peut entraîner un décalage du profil sur la couche réelle, et donc, engendrer un défaut de raccordement entre les deux couches et donc une marque au joint. Si l'outil est chanfreiné ou rayonné, une bavure peut être laissée sur le bas de strate (Figure 19).

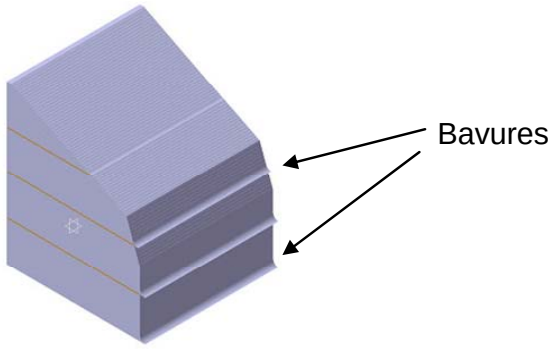


Figure 19 : Défauts géométriques des strates

La préparation des surfaces
Une préparation des surfaces à encoller est souvent nécessaire pour parvenir à un collage efficace. C'est particulièrement le cas, par exemple, pour le collage à la bombe du polystyrène. Le collage UV nécessite également un polissage fin des surfaces. Pour les métaux, un dégraissage et un nettoyage à l'aide d'un solvant sont obligatoires pour le collage et le brasage.

Préparation de logements en CAO ou dans le logiciel procédé
Pour les assemblages vissés, une phase de mise en place de logements spéciaux pour recevoir les éléments d'assemblage est effectuée préalablement sur le modèle de la pièce. Cela entraîne un travail supplémentaire pour l'opérateur et une étude pour placer les éléments dans la matière des strates.

2.2.5.2. L'application du liant

Lors de la phase de dépose du liant (colle ou brasure) sur les strates à assembler, plusieurs inconvénients ont été identifiés :

Répartition régulière du liant

Une difficulté essentielle du collage est de parvenir à une répartition régulière d'un joint de colle sur l'ensemble des surfaces sinon il y a risque de décollage et éventuellement de marque au joint s'il y a un manque de colle près des joints (Figure 20). Elle dépend beaucoup de la viscosité des colles.

Pour le brasage la maîtrise de la répartition par capillarité est très délicate et il arrive souvent que la brasure laisse des zones sans liant ce qui provoque un délaminage des couches ou des problèmes d étanchéité.

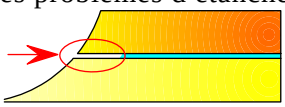


Figure 20 : Zones sans liant

Pour le collage polymérisé par UV, la répartition de la colle doit éviter de la même façon d'emprisonner de l'air dans la surface à coller, sinon cela entraîne un collage défectueux.

Maîtrise de l'épaisseur de joint

Pour le collage et le brasage, un défaut de régularité de l'épaisseur de joint du liant entraîne un défaut géométrique d'empilage en Z, donc un défaut géométrique global de la pièce.

Surplus de colle ou coulures de brasure

Un surplus de colle survient souvent lors de la phase de bridage provoquant une marque au joint (Figure 21). Ceci entraîne une opération supplémentaire de finition des joints pendant et après séchage. La brasure peut aussi couler sur le champ des strates et même parfois remplir des cavités intérieures de la pièce.

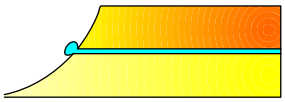


Figure 21 : Surplus de liant sur les joints

Application du liant sur la surface complète et strate après strate

L'application du liant sur l'ensemble des strates les unes après les autres demande un travail manuel important pour l'opérateur et induit une durée conséquente pour l'assemblage. C'est le cas pour le collage, mais aussi pour le brasage où il est nécessaire, au préalable, de découper aux formes des strates et de mettre en place le feuillard de brasure.

Temps de séchage des colles

Lorsque les temps de séchage des colles sont longs, ils entraînent une durée d'assemblage importante. Lorsqu'au contraire, les temps de séchage sont courts, ils rendent le collage impossible. Il faut également réussir à maîtriser

la durée de vie en pot (ou *pot-life*) qui représente le temps pendant lequel on peut utiliser une colle, à température ambiante, et cela peut varier de quelques minutes à plusieurs heures.

Nocivité des colles
Les colles peuvent être dommageables pour la santé de l'opérateur soit au contact de la peau ou des yeux ou par inhalation de vapeurs. Ceci oblige une protection avec des gants, des lunettes et un système d'aspiration adéquat.

Manipulation des outillages d'encollage
Les nombreux outils d'encollage (tubes, pistolets, pinceaux, rouleaux) posent un problème de choix et un travail compliqué pour l'opérateur.

2.2.5.3. Le bridage

Après la mise en place du liant, l'opération de bridage des strates entraîne les problèmes suivants :

Mise en place des brides et méthodologies
Chaque pièce étant de formes différentes, la méthode pour la mise en place des brides varie à chaque fois (Figure 18). Cela entraîne une difficulté pour l'utilisateur. De plus un mauvais bridage peut entraîner un décollage ou un défaut de géométrie pour la pièce.

Déformation géométrique lors du bridage
Suivant la position des brides et des inserts, la pièce peut se déformer lors du serrage des brides et provoquer un glissement des strates les unes par rapport aux autres et avoir tendance à 'vriller' l'ensemble des strates et aboutir à une déformation géométrique globale de la pièce.

Complexité du bridage
Pour le brasage, la pression à exercer sur les strates, pendant le chauffage au four, pour réaliser la diffusion de la brasure par capillarité, est essentielle. Un montage complexe doit être réalisé avec des ressorts ou des poids pour assurer cet effort constant.
Pour les colles à flashage UV, le bridage peut devenir compliqué à réaliser étant donné que les brides ne doivent pas cacher des parties à coller, sinon le collage n'est pas assuré.

2.2.5.4. Autres inconvénients

Les flipots

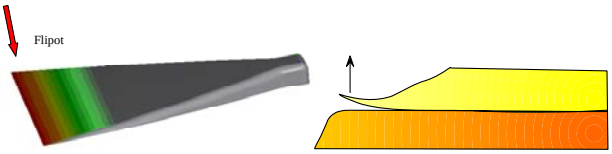


Figure 22 : Les flipots

Un flipot est une partie de strate de très faible épaisseur, son extrémité tend vers une quantité de matière nulle (Figure 22). Celle-ci peut s'abîmer lors de l'usinage, du montage ou de sollicitations mécaniques pendant l'utilisation de la pièce. Il pose deux problèmes principaux pour l'assemblage : le décollage et une marque au joint.

Caractère définitif des techniques
Les techniques d'assemblage utilisées en Stratoconception ont pour la majorité un caractère définitif : le collage, le brasage tendre et fort et le soudage. L'assemblage vissé est la seule technique qui offre la possibilité de démontage (Figure 15 : Démontage de strates dans un outillage, page 31)

Durée dans le temps
Certaines colles, comme les colles polymérisables par flashage UV utilisées pour l'assemblage de pièces transparentes en PMMA, vieillissent mal et souvent elles réapparaissent avec le temps au niveau des joints.

2.3 Les inserts et les pontets

2.3.1 Les inserts

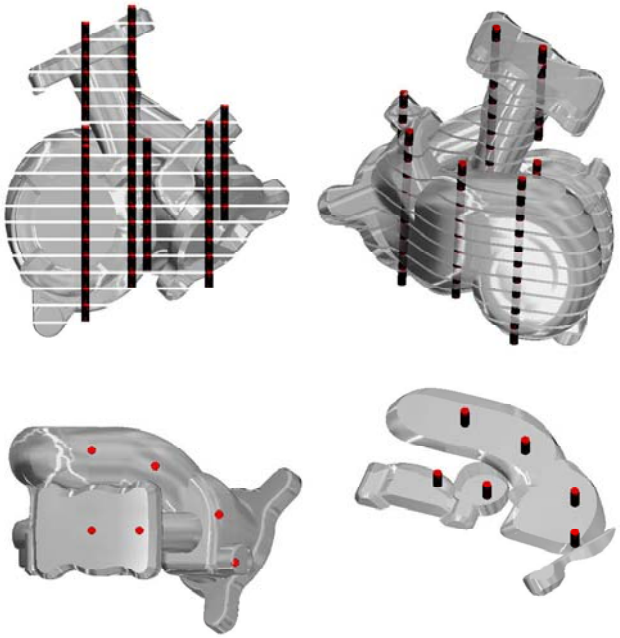


Figure 23 : Les inserts

Les inserts sont des guides qui vont permettre le positionnement des strates les unes par rapport aux autres. Les inserts traversent la pièce de part en part. Les inserts sont généralement de forme circulaire. Un trou débouchant est usiné dans chaque strate et pour chaque insert pendant l'étape d'usinage des strates. Le montage des couches se fait par empilement des couches les unes sur les autres par glissement sur les inserts (Figure 23).
Une seconde fonction des inserts est la tenue mécanique pour absorber les efforts mécaniques de cisaillement (Pelaingre, 2005), mais également le pelage et le clivage qui sont deux effets que l'on retrouve en assemblage collé ou brasé. La fonction des inserts est alors d'éviter le délaminage des zones où le collage ou le brasage ne parviennent pas à compenser les efforts mécaniques.

Les paramètres des inserts sont définis par l'opérateur dans le logiciel (Figure 24) :

- Sa position X et Y (dans le plan perpendiculaire à l'axe de tranchage)
- Sa forme ou plutôt celle du logement dans lequel il est monté et qui est usiné dans la strate (cercle, triangle, carré, oblong)
- Son diamètre
- Sa présence ou non dans une strate donnée

Le positionnement d'un insert est réalisé par l'opérateur à l'aide de la souris dans le plan perpendiculaire au tranchage ou par saisie des valeurs de ses coordonnées X et Y. La mise en place peut être assistée par une grille qui restreint les positions possibles lors de sa mise en place. L'opérateur peut ensuite visualiser chaque strate individuellement pour distinguer les inserts présents dans celle-ci. Le logiciel élimine automatiquement tous les inserts se trouvant en dehors de la matière d'une strate. La mise en place d'un insert est globale pour l'ensemble des strates. L'utilisateur peut également choisir de retirer un insert d'une strate donnée.

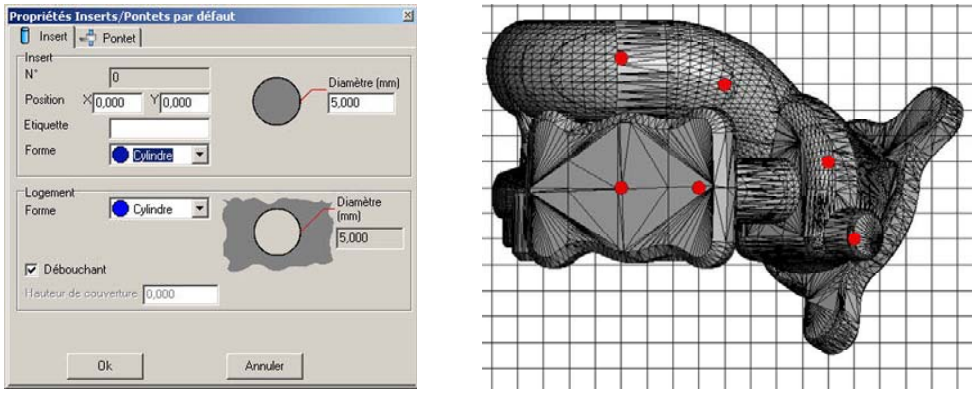


Figure 24 : Paramétrage et mise en place des inserts

2.3.2 Les pontets

Un pontet offre la possibilité de placer un insert en dehors de la pièce (Figure 25). Il y a deux utilisations principales :

- Les pièces à parois fines où la matière dans la strate ne permet pas de placer d'insert (voir Figure 27)
- Les pièces transparentes où l'on ne souhaite pas laisser les inserts visibles dans la pièce.

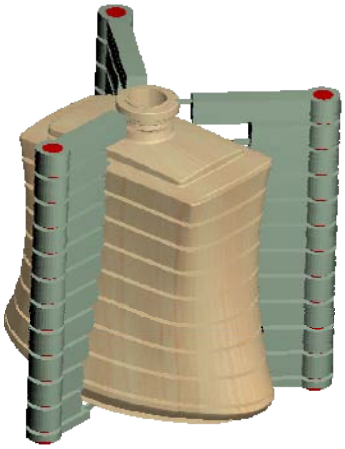


Figure 25 : Les pontets

L'insert est alors rattaché à la pièce par un échafaudage extérieur et par une attache (Figure 26). Après réassemblage, elle est ensuite coupée pour désolidariser la pièce du pontet, c'est l'opération d'arasement (voir Figure 30 page 44).

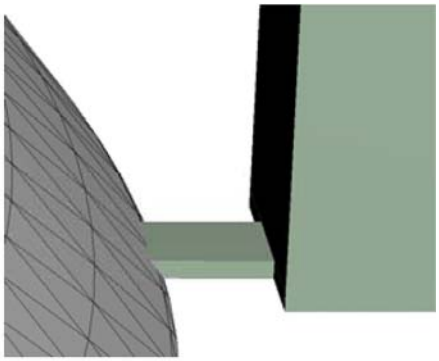


Figure 26 : Attache d'un pontet (Lauvaux, 2005)

Le paramétrage et la mise en place des pontets se réalisent comme pour les inserts avec, en plus, les paramètres de dimensionnement du pontet (épaisseur, largeur, hauteur, dimensions de l'attache).

2.3.3 Inconvénients et limites des inserts et des pontets

Lors du montage et du positionnement des strates grâce à l'utilisation des inserts et des pontets, on rencontre plusieurs inconvénients :

Positionnement et paramétrage des inserts

Le paramétrage et le positionnement des inserts et des pontets sont réalisés manuellement et dépendent des choix de l'opérateur (voir 2.3.1 Les inserts). Cela peut entraîner des défauts géométriques de la pièce lors du montage s'ils sont mal positionnés (trop proches, pas assez nombreux, etc.…). Trop d'inserts dans une partie créent un hyper-statisme au montage et pas assez, laissent des degrés de liberté entre les strates. Cette mise en place, strate après strate, est fastidieuse pour l'utilisateur qui doit vérifier la présence des inserts dans toutes les parties de chaque strate. Elle demande un long travail de préparation logicielle et influe sur le temps global d'assemblage. De plus, elle n'est pas systématique pour une pièce donnée.

Pour des formes complexes, cette solution oblige à multiplier le nombre d'inserts dans la pièce pour assurer le positionnement de toutes les strates et nécessite de contrôler ce placement strate par strate.

Manque de matière et parois fines

Les pièces à parois fines posent un problème pour le placement d'inserts. Il devient difficile, voire impossible par le manque de matière de placer un insert dans la strate (illustration sur la Figure 27).

Les pontets deviennent souvent obligatoires pour ces pièces (voir 2.3.2 Les pontets)

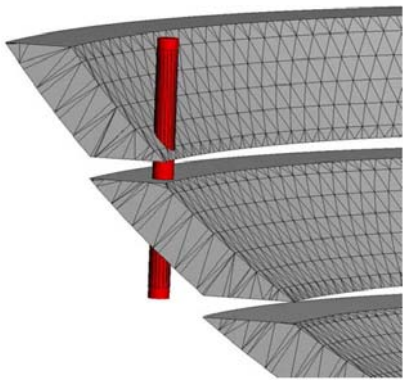


Figure 27 : Parois fines (Lauvaux, 2005)

Débouchant sur surface fonctionnelle

Les inserts étant traversants, ils débouchent sur des parties visibles extérieures de la pièce, donc à cet endroit, cela entraîne un défaut sur la pièce et nécessite une finition (Figure 28).

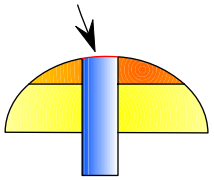


Figure 28 : Inserts débouchants

Mauvaise mise en géométrie

Une mauvaise maîtrise lors du montage des strates sur les inserts peut entraîner un défaut général de géométrie de la pièce. Les strates sont montées deux par deux sur les inserts, donc la mise en géométrie par les inserts n'est pas globale mais locale. Si l'épaisseur de la couche est faible devant le diamètre de l'insert (E << D), cela peut entraîner un effet de pivot lors du montage. De plus l'ajustement entre le trou et l'insert doit être parfaitement maîtrisé sans quoi le positionnement sera imprécis (logement trop grand) (Figure 29) ou immontable (logement trop petit). La maîtrise du positionnement suivant le plan de tranchage (XY) va être dépendant du nombre d'inserts, de leur positionnement, des ajustements et de leurs formes.

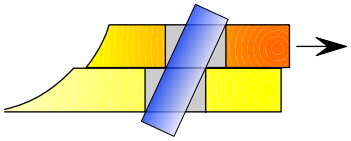


Figure 29 : Défaut de mise en géométrie

Flexibilité des attaches

Pour les pontets, si la matière est flexible et suivant les paramètres des attaches, le montage peut parfois entraîner une mauvaise mise en géométrie de la pièce.

Arasement des pontets

L'opération d'arasement des pontets (voir 2.3.2 Les pontets page 41) peut laisser des défauts sur la pièce et nécessite une importante finition manuelle.

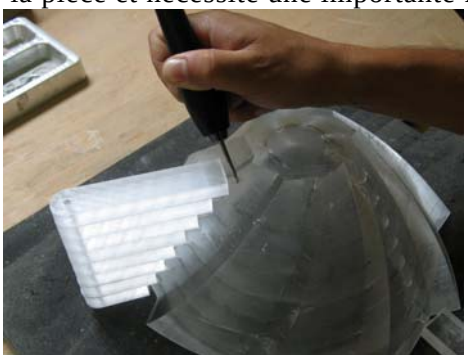


Figure 30 : Araser les pontets

Autres contraintes

Chaque insert doit être dimensionné en longueur suivant la taille et la forme de la pièce. Cela demande un travail manuel de préparation pour l'utilisateur.

Les inserts peuvent aussi poser un problème de ponts thermiques dans des outillages créant ainsi un déséquilibre thermique de l'outillage, ceci entraînant un défaut pour le procédé de fabrication et par conséquent pour la pièce obtenue.

Si les inserts sont dans un matériau différent des strates, on observe fréquemment un problème de dilatation de ceux-ci les rendant indémontables, et pouvant même provoquer la destruction partielle de la pièce.

Si le nombre d'inserts est important, pour une pièce complexe par exemple, leur temps d'usinage peut devenir important par rapport au temps de fabrication total.

Ces inconvénients font qu'une automatisation de l'étape de montage ne peut être envisagée aujourd'hui.

2.3.4 Inserts non débouchants

Une première évolution pour les inserts est la réalisation d'inserts non débouchants (Figure 32).

Pour éviter que, dans une strate, un insert ne débouche sur le flanc ou sur le dessus d'une strate (Figure 28), nous effectuons un test pour déterminer si cet insert est débouchant ou non, puis si c'est le cas, sa profondeur est limitée pour éviter qu'il ne soit visible sur la surface extérieure de la pièce (algorithme décrit dans le Tableau 5). Ces inserts non débouchants nécessitent un usinage recto/verso des strates pour pouvoir réaliser un logement sur le dessus ou le dessous de la tranche.

0. Pour chaque insert appartenant à la tranche (C_i son centre)
1. Détermination de l'orientation de l'insert non débouchant par les surfaces d'inter-strate S_h et S_b
    1.1 Si $C_i \in S_h$ et $C_i \notin S_b$ => Non débouchant positif (ND+)
    1.2 Si $C_i \in S_b$ et $C_i \notin S_h$ => Non débouchant négatif (ND-)
    1.3 Si $C_i \in S_b$ et $C_i \in S_h$ et $C_i \cap F_{xy} \neq \varnothing$ => Non débouchant positif et négatif (ND+/-)
    1.4 Si $C_i \in S_b$ et $C_i \in S_h$ et $C_i \cap F_{xy} = \varnothing$ => Débouchant (D)
2. Pour chaque facette f de la tranche
    2.1 Test si le centre de l'insert C_i est dans le triangle projeté sur XY
    2.2 Si la normale de la facette équivalente au sens de l'insert, on conserve la facette
3. Tri suivant Z les facettes conservées
4. Sélection de la facette la plus basse Z_{min}
5. Calcul du point d'intersection I entre la ligne verticale passant par Ci et cette facette
6. Détermination de la profondeur du logement à réaliser (coordonnée Z de I moins une épaisseur minimum)

avec :

C_i : centre 2D de l'insert

S_h : surface d'inter-strate haute de la tranche

S_b : surface d'inter-strate basse de la tranche

F_{xy} : ensemble des facettes de la tranche projetées sur le plan XY

Tableau 5 : Algorithme des inserts non débouchants

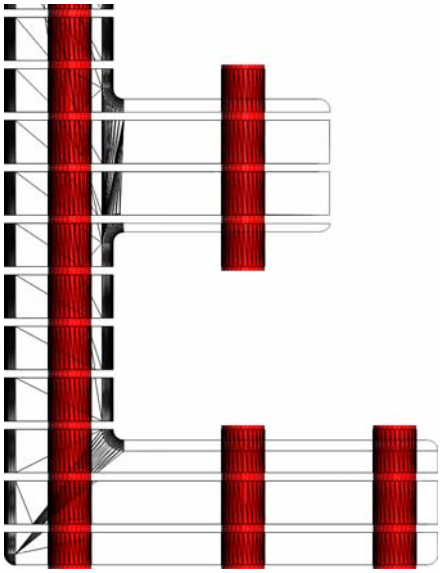


Figure 31: Inserts débouchants

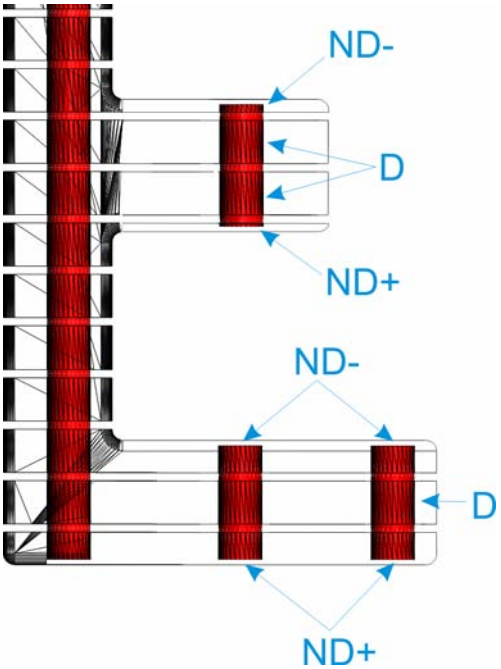


Figure 32 : Inserts non débouchants

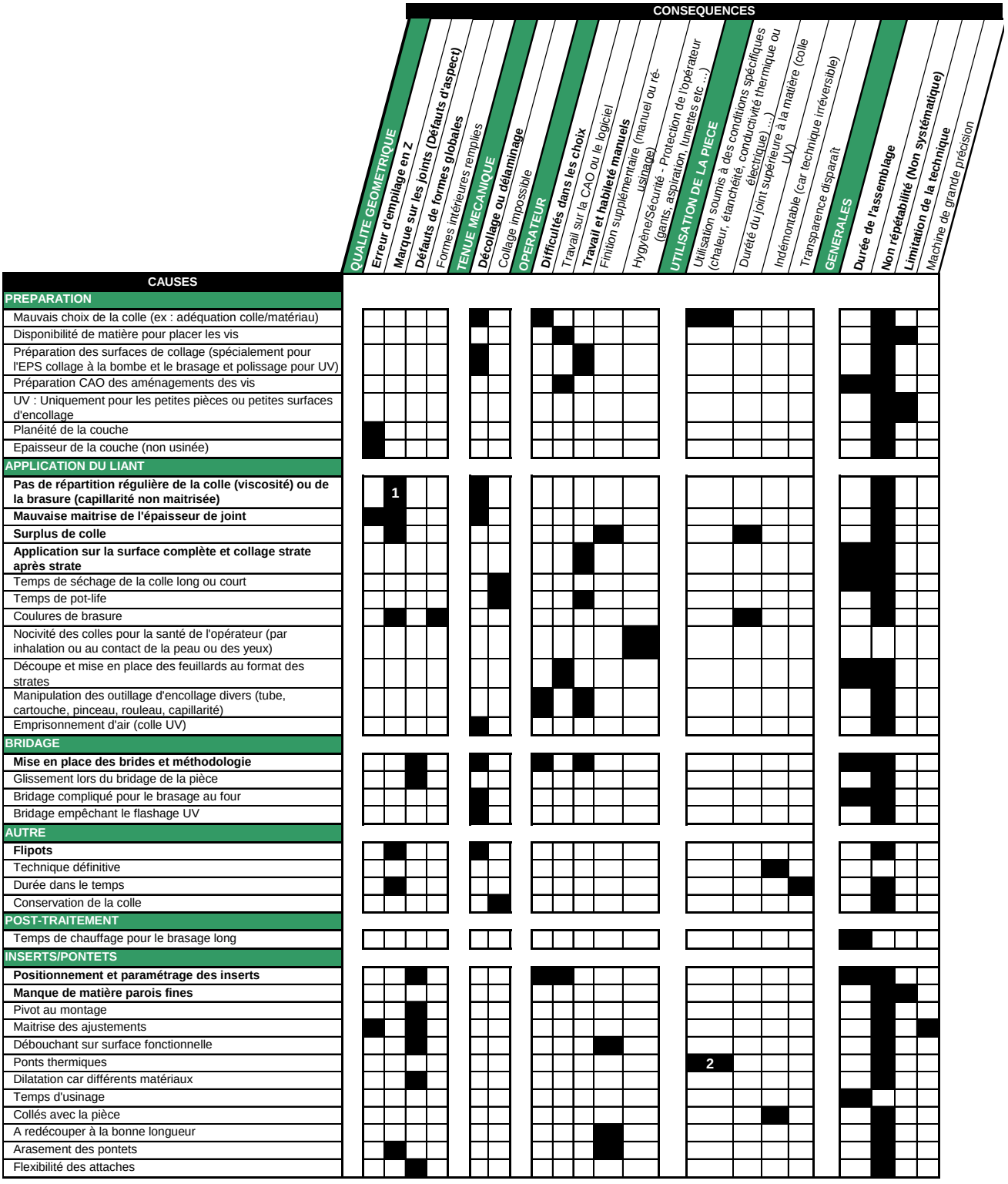
2.4 Les difficultés de l'assemblage actuel

Une étude auprès des utilisateurs du procédé a permis de mettre en évidence les principaux problèmes des techniques d'assemblage actuellement utilisées en Stratoconception (Tableau 6). Nous avons recensé les causes, pour toutes les techniques utilisées, en terme de préparation avant l'assemblage, d'application du liant (colle, brasure, …), de bridage, des inserts et pontets.

Ces difficultés rencontrées engendrent alors des conséquences sur l'assemblage réalisé que l'on peut regrouper en cinq grandes catégories :

- La **qualité géométrique** de la pièce
- La **tenue mécanique** de l'assemblage
- Les effets pour l'**opérateur** du procédé
- Les **limites d'utilisation de la pièce** dues à la méthode d'assemblage
- Les autres conséquences d'ordre **général**

Nous allons décrire plus en détail les défauts constatés sur les assemblages réalisés.



1 : manque de liant au joint
2 : pour le thermoformage

Tableau 6 : Matrice de causes et conséquences des problèmes actuels d'assemblage

2.4.1 Qualité géométrique de la pièce

2.4.1.1. Erreur d'empilage en Z

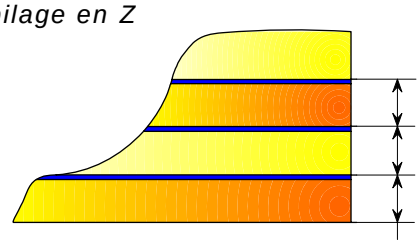


Figure 33 : Erreur d'empilage en Z

Le montage successif de couches par empilage, entraîne une erreur sur les dimensions en Z par l'accumulation répétée d'une erreur d'empilement. Les causes de cette erreur proviennent des défauts des couches, de la mauvaise maîtrise de l'épaisseur de joint ou d'un mauvais ajustement des inserts.

2.4.1.2. Défauts de forme globale de la pièce (erreur XY)

Nous avons vu que la limite des inserts (2.3.3 Inconvénients et limites des inserts et des pontets) et le bridage de la pièce entraînent des défauts de forme globale sur la géométrie de la pièce.

2.4.1.3. Marque au joint et défauts d'aspect

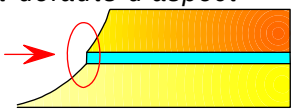


Figure 34: Marque au joint

A chaque inter-strate une marque peut apparaître pour des raisons dues à :

- une mauvaise maîtrise de la répartition (manques ou surplus de liant) entrainant des coulures visibles aux inters-strates,
- une épaisseur de la couche mal maîtrisée,
- une mauvaise maîtrise de l'épaisseur de joint.

2.4.1.4. Formes intérieures

Certaines formes intérieures comme par exemple des canaux peuvent être remplies ou bouchées par des coulures de brasures.

2.4.2 Tenue mécanique de l'assemblage

2.4.2.1. Décollage / Délaminage

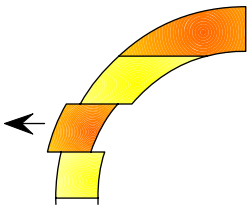


Figure 35 : Délaminage des strates

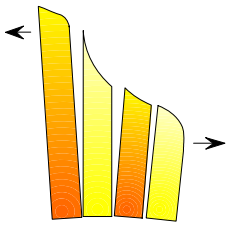


Figure 36 : Décollage des strates

Un mauvais choix de colle, une mauvaise répartition de la colle ou de la brasure, un bridage mal réalisé peuvent provoquer le délaminage ou le décollage des strates sous les sollicitations mécaniques lors de l'utilisation de la pièce. Les flipots sont également souvent source de problèmes de décollage.

2.4.2.2. Collage impossible

Le collage est parfois rendu impossible à cause des temps de séchage ou des temps de pot-life ou d'une mauvaise conservation de la colle.

2.4.3 Effets sur l'opérateur du procédé

2.4.3.1. Difficultés dans les choix

Lors de l'assemblage, l'opérateur est confronté à beaucoup de choix: choix de la colle, choix des outils d'encollage, choix lors du positionnement et du paramétrage des inserts (§ 2.3.1 Les inserts), choix dans la mise en place du bridage. Ces choix sont compliqués et ne rendent pas cette partie assemblage simple pour l'utilisateur.

2.4.3.2. Travail de préparation CAO

L'intervention de l'utilisateur est aussi importante dans la préparation logicielle lors du placement des vis en CAO pour les assemblages vissés, lors de la préparation de la découpe des feuillards pour la brasure et lors du positionnement des inserts.

2.4.3.3. Travail et habileté manuelle

Le travail manuel dû à la préparation des surfaces, à l'application du liant sur la surface des strates, à la manipulation des outillages d'encollage et à la mise en place des brides est long et demande une forte habileté manuelle de la part de l'opérateur.

2.4.3.4. Finitions supplémentaires

Des finitions supplémentaires sont souvent nécessaires comme le retrait des surplus de colle, la finition due aux inserts débouchants ou à l'arasement des pontets.

2.4.3.5. Hygiène et sécurité

La nocivité des colles nécessite une sécurisation de l'utilisateur par sa protection (gants, masque et lunettes) et un système d'aspiration.

2.4.4 Les limites dans l'utilisation de la pièce

2.4.4.1. Conditions et contraintes spécifiques

Les conditions d'utilisation des colles choisies qui ne seraient pas adaptées aux contraintes spécifiques des procédés de fabrication (par exemple : étanchéité, température élevée), peuvent avoir des conséquences néfastes lors de l'utilisation des outillages.
Un outillage de thermoformage peut générer des défauts à cause de ponts thermiques dus aux inserts.

2.4.4.2. Démontage des strates impossible

Le caractère définitif des techniques (Tableau 1) comme le collage ou le brasage rend le démontage des pièces impossible.

2.4.4.3. Dureté des joints

Une dureté au niveau des joints apparaît s'il y a un surplus de colle UV ou des coulures de brasures. Elle peut être néfaste pour l'utilisation d'un moule soit pour sa finition ou soit pour sa reprise en usinage.

2.4.4.4. Perte de caractéristiques

La technique d'assemblage peut faire perdre des caractéristiques techniques à la pièce, comme par exemple, sa transparence suite à la mauvaise tenue dans le temps des colles UV.

2.4.5 Conséquences générales

2.4.5.1. Durée de l'assemblage

La durée globale de l'assemblage est très importante en raison du temps d'application sur la surface de chaque strate, des temps de séchage des colles, des phases de préparations, du temps de mise en place des brides, du temps de chauffage pour le brasage.

2.4.5.2. Non répétabilité (Systématisation)

Les techniques utilisées montrent dans leur ensemble, qu'à cause de l'intervention manuelle et des choix de l'opérateur, que cette étape d'assemblage est loin d'être systématique et qu'elle n'est pas non plus répétable d'une pièce à l'autre ce qui entraîne une rupture de la chaine numérique du procédé de prototypage rapide.

2.4.5.3. Limites des techniques

Les techniques sont également limitées par le matériau à assembler, par manque de matière pour les éléments de liaisons ou par la taille ; comme par exemple le collage UV réservé uniquement aux petites pièces.

2.4.5.4. Précision des machines

La maîtrise des ajustements pour les inserts peut également nécessiter une grande précision des machines d'usinage.

2.5 Bilan des méthodes d'assemblage

2.5.1 Bilan

Il est maintenant intéressant de comparer les différentes techniques utilisées par rapport aux inconvénients engendrés précédemment évoqués (Tableau 6) et aux critères de choix de la technique d'assemblage pour notre application (voir Tableau 4). On retrouve ici résumé les conséquences des inconvénients de chaque technique actuellement utilisée (Figure 37). Ces techniques sont loin de remplir nos critères de choix. On peut cependant envisager un autre mode d'assemblage.

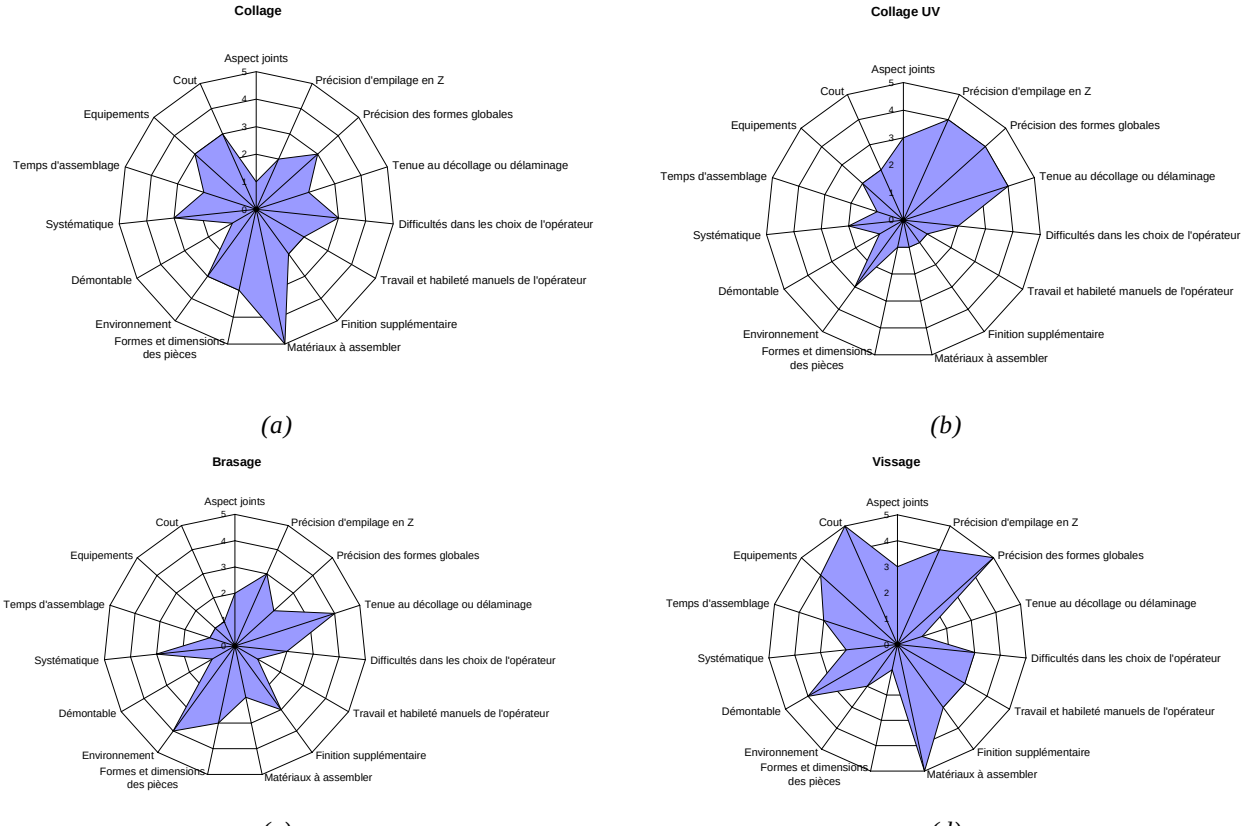


Figure 37 : Comparatif des méthodes d'assemblage actuelles

2.5.2 Idée de l'emboîtage

Parmi les modes d'assemblage industriels existants (voir Tableau 1 page 25), le *mode d'assemblage par emboîtage*[1], qui est sans apport de matériau, est adapté à la diversité des matériaux. Aucun équipement spécifique n'est nécessaire pour le réaliser, étant donné que cette technique requiert surtout une intégration lors de la conception du produit à assembler. Si on reprend les critères de choix pour ce mode (Tableau 4 page 33) ainsi que les conséquences que nous pouvons envisager sur l'assemblage final ainsi obtenu, on peut estimer cette technique comme une solution répondant à nos critères de choix et aux problèmes rencontrés (Figure 38).

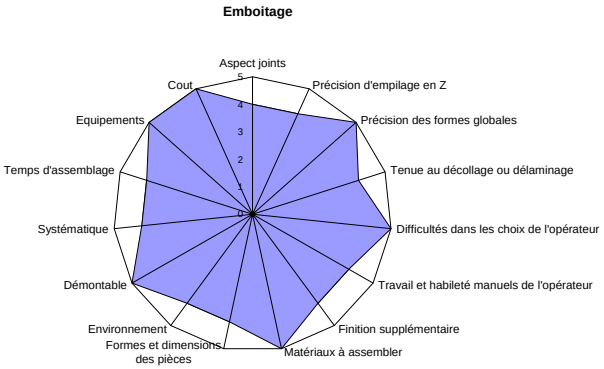


Figure 38 : Critères estimés pour l'assemblage par emboîtage

De plus, la mise en œuvre des inserts non débouchants (voir §2.3.4 Inserts non débouchants page 44) pour répondre à des limitations des inserts actuels, nous permet d'envisager une extension de ces inserts en les intégrant directement dans la fabrication des couches pour obtenir des éléments de positionnement faisant partie intégrante de celles-ci. Ces éléments d'emboîtage pourront être considérés comme une *généralisation des insert*s.

Enfin une solution pour résoudre les problèmes dûs aux flipots (2.2.5.4 Autres inconvénients page 39), c'est à dire la faible épaisseur de matière, peut être envisagée par un épaississement de cette matière réalisé par la solution d'emboîture décrite dans *le brevet d'assemblage par emboîture* (Figure 8 : Assemblage par emboîture page 20).

Ces trois éléments nous ont amenés à développer une nouvelle solution d'assemblage pour la Stratoconception que nous présentons dans le chapitre suivant : l'*emboîtement*.

[1] Emboîtage ou emboitement élastique : « L'emboîtage élastique est un moyen simple, économique et rapide d'assemblage des pièces plastiques » extrait de Dupont (2003), "Techniques d'assemblage - Catégorie I - Vis, emmanchement à force, emboîtage élastique", *DuPont™ polymères techniques - Principes généraux de conception – Module I*, E.I. du Pont de Nemours and Company.

2.6 Conclusion

Dans ce second chapitre nous avons dressé un bilan des méthodes actuelles utilisées pour l'assemblage des strates en Stratoconception : le collage, le brasage, l'assemblage mécanique et les éléments de positionnement (inserts, pontets). Nous avons également analysé leurs inconvénients, leurs difficultés de mise en œuvre et leurs limites et nous avons souligné que l'assemblage du procédé reste encore une opération qui demande une intervention manuelle importante de l'utilisateur et que les techniques utilisées aujourd'hui ne garantissent pas toujours la répétabilité du système et peuvent entraîner une rupture de la chaîne numérique du procédé. Nous avons tout d'abord décrit une première amélioration des éléments de positionnement en proposant une méthode de réalisation d'*inserts non débouchants*. Mais nous proposons maintenant de développer l'idée que nous venons d'évoquer : l'emboîtage, qui représente un nouveau mode d'assemblage pour le procédé.

3. L'emboîtement

3.1 PRINCIPE
3.1.1 Principe et terminologie de l'emboîtement
3.1.2 Définition de l'Entité d'Assemblage
3.1.3 Modélisation automatique des entités d'assemblage

3.2 ETAT DE L'ART SUR LES ENTITES D'ASSEMBLAGE

3.3 LES CONTRAINTES DE L'EMBOITEMENT

3.4 LE DIMENSIONNEMENT
3.4.1 Formes des entités
3.4.2 Taille et orientation
3.4.3 Sens de l'entité
3.4.4 Nombre d'éléments

3.5 LE POSITIONNEMENT (OU LOCALISATION)

3.6 JEUX ET AJUSTEMENTS
3.6.1 Surfaces de l'entité d'assemblage
3.6.2 Les jeux et ajustements
3.6.3 L'usinage des entités

3.7 AUTRES SPECIFICATIONS

3.8 MODELISATION DE DONNEES OBJET DE L'EMBOITEMENT

Notre contribution porte sur une nouvelle méthode d'assemblage, l'*emboîtement*. Elle permet l'intégration d'*entités d'assemblage* au sein des couches. Nous exposons le principe de cette méthode et nous définissons la notion d'*entité d'assemblage* au travers d'un état de l'art. Nous avons développé un système de génération automatique des entités dans le processus. Les outils et méthodes logiciels permettent d'automatiser cette opération, en définissant les entités d'assemblage, leur forme, leurs dimensions, leurs ajustements et surtout leur positionnement au sein des couches. Enfin, nous finissons ce chapitre par une modélisation objet de notre structure gérant l'emboîtement.

3.1 Principe

3.1.1 Principe et terminologie de l'emboîtement

La nouvelle technique que nous proposons est la réalisation d'un assemblage par *emboîtement*. Le principe de ce type d'assemblage peut être illustré simplement par l'assemblage tenon-mortaise réalisé en menuiserie (Figure 39).

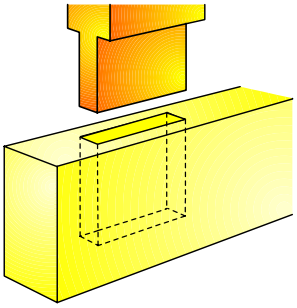


Figure 39 : Emboîtement tenon-mortaise

Dans notre problématique de Stratoconception, la pièce est décomposée en *N* couches successives à assembler. On se focalise sur l'assemblage de deux couches successives S_n et S_{n+1} (Figure 40).

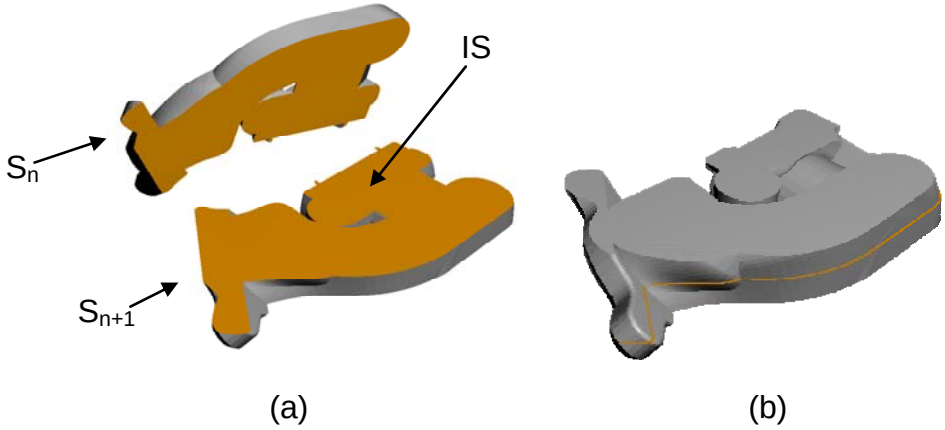


Figure 40 : Deux strates à assembler et inter-strate

Les deux strates à assembler ont une surface de contact plane *IS*, que nous appelons *surface d'inter-strate*. Le *contour d'inter-strate* délimite les frontières de cette surface *IS*. Pour parvenir à un assemblage par emboîtement, on propose de réaliser une *imbrication* des deux strates (S_n et S_{n+1}). Nous allons pour cela générer des formes d'assemblage dans cette surface *IS* pour réaliser une liaison entre ces deux pièces. Cette imbrication sera composée de plusieurs formes d'assemblage que nous nommerons *entités d'assemblage*. Chaque *entité d'assemblage* est constituée d'une partie mâle (le *plot*) et d'une partie femelle correspondante (le *logement*) (Figure 41).

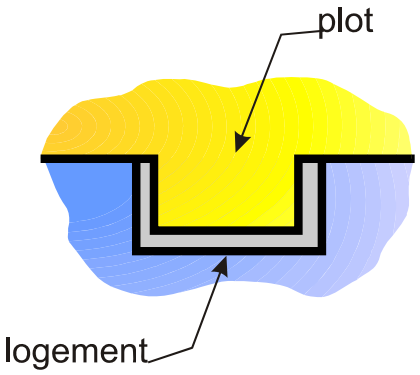


Figure 41 : Entité d'assemblage

Le plot est mis en place sur une des deux strates et le logement associé est placé en vis-à-vis sur l'autre strate. Nous appellerons *localisation*, la mise en place et les positions de ces entités d'assemblage dans la surface d'inter-strate *IS*.

Inter-strate	Interface entre deux couches successives S_n et S_{n+1}. Elle représente l'ensemble des éléments présent entre ces deux couches.
Surface d'inter-strate *IS*	Surface de contact entre deux strates successives S_n et S_{n+1}
Contour d'inter-strate	Frontière de la surface d'inter-strate *IS*
Imbrication	Ensemble d'entités d'assemblage entre strate S_n et S_{n+1}
Entité d'assemblage	Emboîtement d'une partie mâle (plot) dans une partie femelle (logement)
Plot	Partie mâle de l'entité d'assemblage
Logement	Partie femelle de l'entité d'assemblage
Localisation	Positions des entités d'assemblage dans la surface d'inter-strate *IS*

Tableau 7 : Glossaire de l'assemblage par emboîtement en Stratoconception

3.1.2 Définition de l'Entité d'Assemblage

L'utilisation des entités d'assemblage permet de spécifier la relation entre les composants avec un haut niveau d'abstraction. Elles apportent des informations supplémentaires spécifiques à l'assemblage. C'est une association entre deux entités de formes sur différentes pièces. Elles combinent des informations de géométrie et d'assemblage (Holland, 1997) (Deneux, 1999). Suivant l'étape de développement à laquelle on se situe, elles comportent des informations relatives à celles-ci, par exemple, des entités de conception pour la phase de conception (Noort, 1998).

Les entités d'assemblage représentent les informations sur les relations entres les composants, leur manipulation et leurs éléments de liaison lors de l'assemblage. Ces informations peuvent être de deux types (voir 1.6.1 Qu'est-ce que l'assemblage ? page 18) : les informations de manipulation (*entités de manipulation*) et les informations de liaisons entre les composants (*entités de liaisons*).

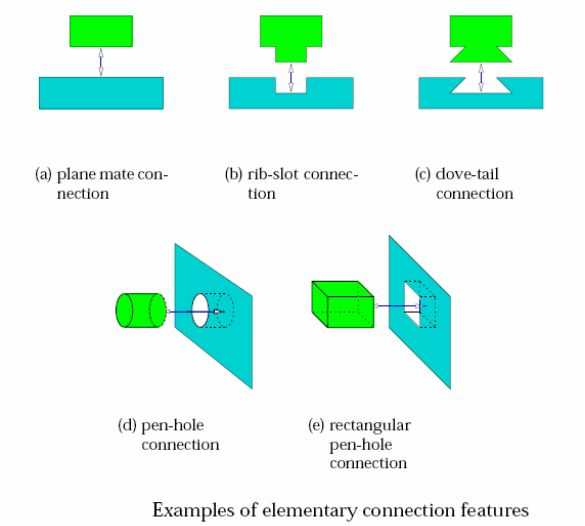


Figure 42 : Entités de liaison (Holland, 1997)

Les *entités de liaison* décrivent les formes utilisées pour la liaison, leur position finale, la trajectoire d'insertion, les tolérances entre les composants, les degrés de libertés de l'assemblage et les particularités spécifiques (par exemple un chanfrein) (Figure 42).
Pour notre étude, seules les informations de liaisons nous intéressent pour la conception de l'assemblage, car nous n'étudierons pas la phase de manipulation des éléments lors de la phase d'assemblage. Nous utiliserons donc le terme *entités d'assemblage* pour décrire principalement des *entités de liaisons* auxquelles nous ajouterons des informations spécifiques pour l'usinage.

Les informations de nos entités d'assemblage vont donc décrire (Holland, 2000):

- Les formes des entités (par exemple les formes d'une rainure et d'une nervure) (voir §Formes 3.4.1)
- La position finale (la position relative et l'orientation des formes) (voir §3.4.2 Taille et orientation et §3.5 Le positionnement (ou localisation))
- La trajectoire de montage pour réaliser l'assemblage (dans notre cas l'axe de tranchage et aussi voir §3.4.3 Sens de l'entité)
- Les tolérances (jeux fonctionnels entre les entités) (voir §3.6.2 Les jeux et ajustements)

- Les zones de contacts (surfaces et géométries en contact) (voir §3.6.1 Surfaces de l'entité d'assemblage)
- Les degrés de libertés possibles pour l'entité
- Des spécifications géométriques (exemple : un chanfrein) (voir §3.6.3 L'usinage et §3.7 Autres spécifications)

Les entités d'assemblage peuvent être réalisées dans unes des deux pièces à assembler (*Sn* ou *Sn+1*) ou peuvent être des éléments rapportés insérés dans des logements aménagés dans *Sn* ou *Sn+1* (goupilles de positionnement, vis, etc. …). Ces aménagements peuvent également être conçus pour permettre la mise en place d'un liant pour l'assemblage (colle ou brasure).

3.1.3 Modélisation automatique des entités d'assemblage

L'opération de modélisation et de mise en place d'entités d'assemblage pour réaliser l'emboîtement pourrait être effectuée manuellement par l'opérateur du procédé, mais la complexité des modèles (Figure 43 : Surface d'inter-strate complexe) montre que celle-ci peut parfois être difficile et très longue à réaliser.

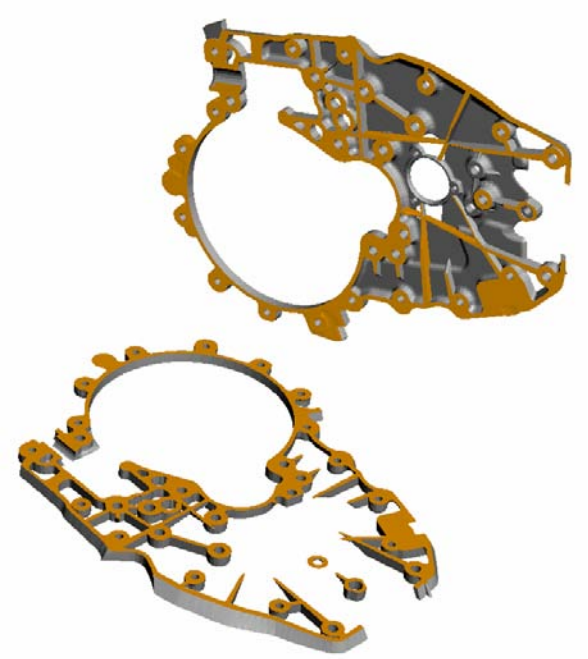


Figure 43 : Surface d'inter-strate complexe

C'est pourquoi notre objectif est de réaliser la mise en place automatique (sans l'intervention du concepteur) des entités d'assemblage sur la surface d'inter-strate *IS* et dans les deux pièces à assembler *Sn* et *Sn+1*, puis sur l'ensemble des strates de la pièce.

3.2 Etat de l'art sur les entités d'assemblage

Les principaux travaux qui s'intéressent aux entités d'assemblage sont issus de domaines où l'on étudie l'assemblage automatisé, comme par exemple l'aéronautique ou l'électronique.

Des recherches pour l'aéronautique (Burley, 2001, Naing, 2004), sont à l'origine de développements de librairies d'entités d'assemblage et d'outils d'aide aux choix de celles-ci (Figure 44). Le but étant de parvenir au minimum d'assemblage à l'aide d'outils en intégrant des entités d'assemblage dans les pièces. La méthode de sélection des entités est basée sur la satisfaction de caractéristiques produits clés, de besoins mécaniques, de tolérances de fabrication et de coûts de production. Le dimensionnement des entités est basé sur le poids ajouté et sur une analyse par éléments finis des effets sur l'ensemble de la structure. La méthode est manuelle mais a pour but d'être intégrée dans un système de base de connaissances.

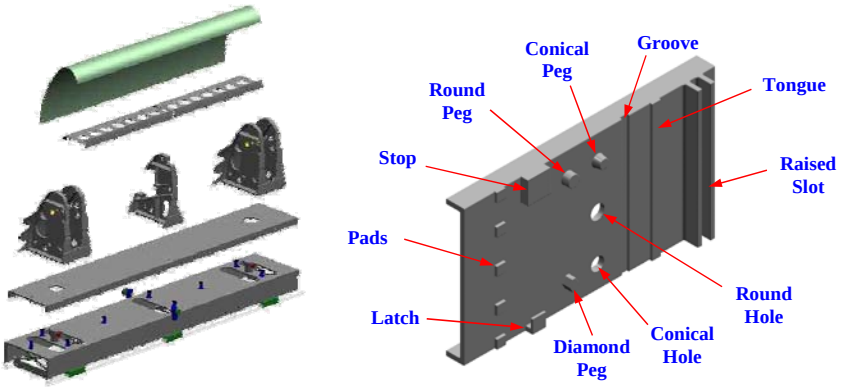


Figure 44 : Entités d'assemblage en aéronautique (Burley, 2001)

Pour la modélisation de la conception et la planification des assemblages, des travaux (Holland, 1997) proposent un modèle basé sur des entités contenant des informations géométriques et fonctionnelles. Un modèle intégré orienté-objet du produit a été développé pour combiner ces informations pour les phases de conception et de planification. Le modèle est manipulé et visualisé au travers d'un environnement et d'une interface utilisateur (Figure 45) et peut être analysé pour étudier la planification de trajectoires et de préhensions des objets à assembler.

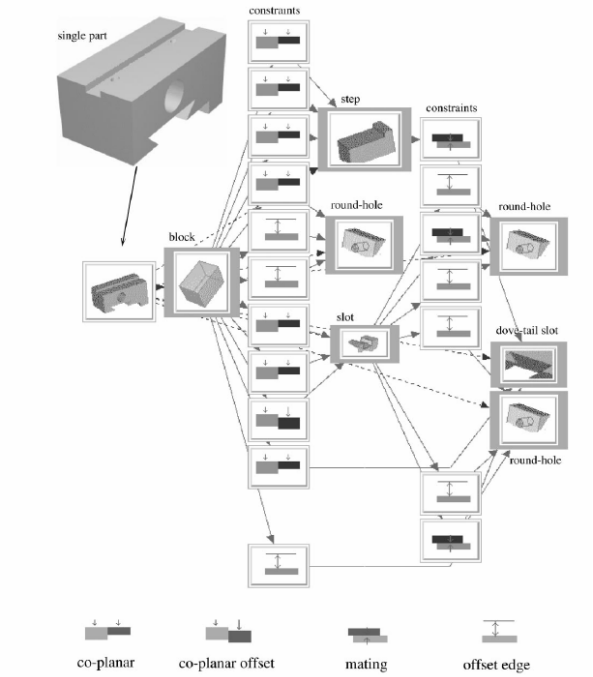


Figure 45 : Modélisation par entités d'assemblage (Holland, 1997)

Des travaux se sont également intéressés à l'identification d'entités d'assemblage sur un modèle CAO grâce un algorithme travaillant sur la représentation Octree du modèle B-Rep (Sung, 2000).
Dans le domaine du jouet, on trouve également des assemblages élémentaires de briques de construction, plus connu sous le nom de briques Légo® (Figure 46).

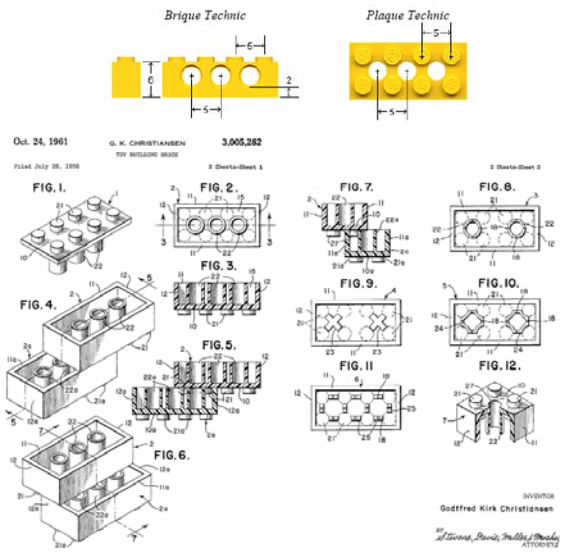


Figure 46 : Brevet Légo® et brique élémentaire (Hughes, 2005)

Ce sont des briques en plastique ABS. La face supérieure de la brique est couverte de protubérances cylindriques nommées tenons. Le dessous de la brique présente des trous cylindriques ou tubes. Une légère déformation lors de l'assemblage permet le maintien des éléments ensembles.

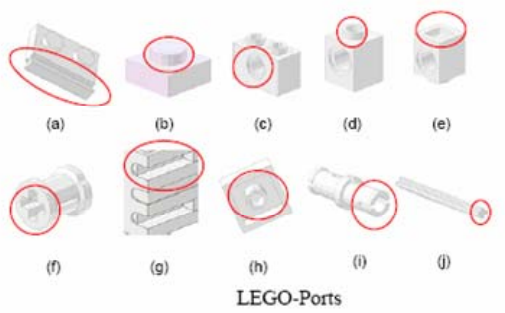


Figure 47 : Les entités d'assemblage des Légo® (Liang, 2003)

Les entités des Légo® sont standardisées avec des dimensions fixes et compatibles en formes (Figure 47), pouvant être décrites comme des entités d'assemblage, qui permettent des assemblages multiples (Liang, 2003).

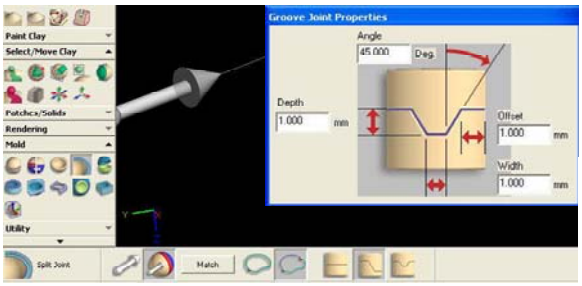


Figure 48 : Conception de joints de moules en CAO (FreeForm, 2007)

Certains logiciels actuels de CAO proposent des outils pour la conception de joints d'assemblage entre deux parties d'un moule (Figure 48). Ces outils ne sont pas automatisés et demandent une intervention manuelle importante de l'utilisateur.

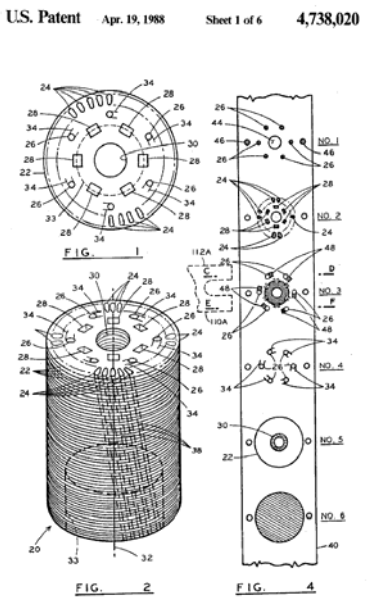


Figure 49 : Conception de moteurs électriques (Neuenschwander, 1988)

La fabrication de moteurs électriques nécessite l'assemblage d'un empilement de plaques métalliques (Figure 49). Les fabricants ont développé des méthodes pour l'empilement et l'imbrication successive de ces plaques afin de constituer le rotor ou le stator du moteur (Neuenschwander, 1988).

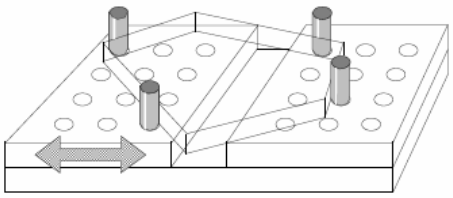


Figure 50 : Systèmes de bridage modulaire (Wallack, 1994)

En mécanique, les études sur le bridage, et particulièrement la conception de système de bridage par composants modulaires (Wallack, 1994, Brost, 1996) se rapprochent de la problématique de fixation de deux plaques ensembles. Elles décrivent des algorithmes pour parvenir à immobiliser une pièce en plaçant des tenons dans une table pré-percée (Figure 50).



Figure 51 : Puzzle 3D (Watanabe, 2006)

Le concept du puzzle 3D est également intéressant (Watanabe, 2006). A partir du principe du puzzle 2D et de ses six combinaisons de joints d'assemblage, en forme de 'queues d'aronde' concaves et convexes, on peut concevoir un assemblage d'une pièce 3D en couches successives (Figure 51). Ce concept a également été étendu avec une combinaison d'octaèdres.

Nous allons décrire en détail, dans la suite, les différents attributs des nos entités d'assemblage comme leur forme, leurs dimensions, et leurs positions.

3.3 Les contraintes de l'emboîtement

L'emboîtement doit remplir deux fonctions principales : la *mise en géométrie* relative des deux strates et le *maintien* ou la liaison des deux strates.

Pour cela nous devons :

- Réaliser un *positionnement géométrique* des 2 strates (S_n et S_{n+1}) suivant le plan d'inter-strate (XY).
- Assurer une *tenue mécanique pour les efforts de cisaillement* (suivant XY) subis par les deux strates en évitant le délaminage spécialement des parois minces ou des parties fines
- Assurer une *tenue mécanique pour les efforts de traction* (suivant Z), c'est à dire éviter le démontage des strates
- Réaliser ce positionnement sans intervention de l'opérateur, c'est à dire réaliser une *localisation automatique* des entités sur l'ensemble des strates à assembler.

En d'autres termes nous pouvons décrire ces contraintes de la manière suivante :

- Réduire les degrés de liberté
- Assurer un positionnement à une précision donnée
- Résister aux efforts exercés (poids, mécaniques) et éviter le délaminage (2.4.2.1 Décollage / Délaminage)
- S'intégrer dans la matière et ne pas fragiliser la pièce
- Etre usinable avec le procédé existant
- Ne pas apparaître sur la surface extérieure (voir Figure 28 : Inserts débouchants page 43)
- Assurer un maintien si possible (pas de colle)
- Assurer un assemblage sans apport d'élément extérieur (cf. inserts, liant, etc.…)
- Résoudre des problèmes existants (ex : les flipots)
- Pas d'interventions utilisateurs (à part le paramétrage)
- Optimiser le temps de fabrication (plus le nombre d'entités à réaliser est important, plus le temps de fabrication va augmenter)

3.4 Le dimensionnement

3.4.1 Formes des entités

Un plot ou un logement est défini par une forme géométrique choisie parmi un ensemble de formes que nous avons défini (Figure 52) :

- Cercle
- Carré
- Triangle
- Rectangle
- Parallélépipède
- Hexagone
- Oblong droit
- Oblong circulaire
- Rainure/Languette débouchante
- Demie rainure/languette

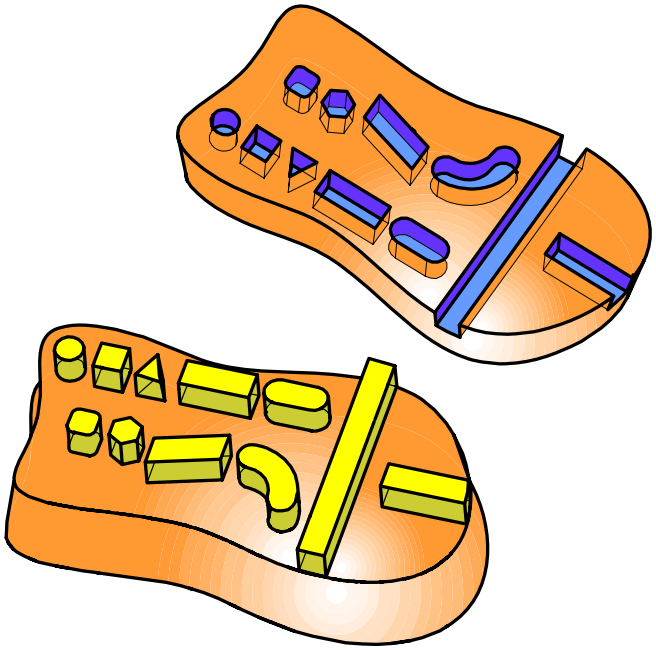


Figure 52 : Formes des entités d'assemblage

Plusieurs associations de formes sont possibles (Figure 53). Par exemple, le couple cercle pour le plot et triangle pour le logement permettra de réaliser un meilleur ajustement en ne présentant que trois points de contact entre les deux parties de l'imbrication. Cependant si les efforts exercés sur l'assemblage sont importants, on privilégiera les formes réduisant les contraintes mécaniques (Naing, 2004). Il est à noter que l'on peut permettre des déplacements sur le plan de l'inter-strate, en choisissant des combinaisons qui laissent un degré de liberté sur ce plan. Ce choix de combinaisons se fera en fonction de l'application en privilégiant soit la précision, soit la résistance aux contraintes mécaniques, ou soit pour la facilité du montage en laissant des degrés de liberté aux imbrications.

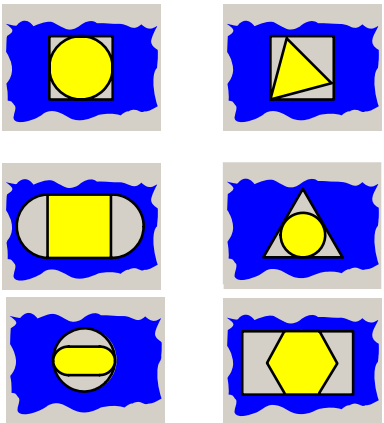


Figure 53 : Combinaisons formes plots et logements

3.4.2 Taille et orientation

La taille d'une entité est définie par son *diamètre D* (diamètre du cercle inscrit), par sa *longueur L* (pour l'oblong ou le rectangle) et sa *profondeur p* (la hauteur de l'entité). Suivant la forme du plot et du logement, on peut calculer géométriquement en fonction des dimensions du plot (D_p, L_p) les dimensions nécessaires pour le logement (D_l et L_l) (Tableau 8).

		Plot				
	Forme	*CERCLE*	*TRIANGLE*	*CARRE*	*OBLONG*	*RECTANGLE*
Logement	*CERCLE*	$D_l=D_p$	$D_l=2\times D_p$	$D_l=\sqrt{2}\times D_p$	$D_l=L_p$	$D_l=\sqrt{L_p^2+D_p^2}$
	TRIANGLE	$D_l=D_p$	$D_l=D_p$	$D_l=\frac{\sqrt{3}+2}{3}\times D_p$ $\Delta_Y=\frac{\sqrt{3}-1}{6}\times D_p$	$Dl=\frac{L_p}{\sqrt{3}}+\frac{(\sqrt{3}-1)}{\sqrt{3}}\times D_p$ $\Delta Y=\frac{L_p-D_p}{(2\times\sqrt{3})}$	$D_l=\frac{L_p}{\sqrt{3}}+\frac{2}{3}\times D_p$ $\Delta_Y=\frac{L_p}{(2\times\sqrt{3})}-\frac{2}{3}\times D_p$
	CARRE	$D_l=D_p$	*Non conseillé*	$D_l=D_p$	$D_l=\frac{L_p+(\sqrt{2}-1)\times D_p}{\sqrt{2}}$ *Rot* = 45°	$D_l=L_p$
	OBLONG	$D_l=D_p$ $L_l=L_p$	$D_l=1.5\times D_p$ $L_l=L_p$ $\Delta_Y=D_p\times 0.25$	$D_l=D_p$ $L_l=L_p$	$D_l=D_p$ $L_l=\max(L_p,D_p)$	$D_l=D_p$ $L_l=L_p+D_p$
	RECTANGLE	$D_l=D_p$ $L_l=L_p$	$D_l=1.5\times D_p$ $L_l=L_p$ $\Delta_Y=D_p\times 0.25$	$D_l=D_p$ $L_l=L_p$	$D_l=D_p$ $L_l=L_p$	$D_l=D_p$ $L_l=L_p$

Tableau 8: Calcul des dimensions du logement en fonction du plot

Les jeux d'ajustement entre les entités seront ajoutés à ces dimensions lors du calcul des trajectoires d'outil (voir §3.6 Jeux et ajustements page 74).
Chaque entité sera également orientée angulairement autour de son centre par une valeur d'orientation *Rot*. Le centre du logement pourra être décalé d'une valeur Δ_Y par rapport au centre du plot.

3.4.3 Sens de l'entité

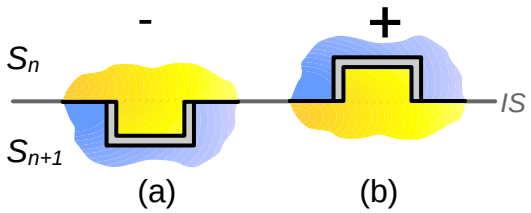


Figure 54 : Sens de l'entité

Pour chaque entité, deux choix sont possibles pour le sens de la combinaison mâle/femelle. Soit le plot est réalisé dans la strate supérieure S_n et le logement dans la strate inférieure S_{n+1} (Figure 54a), nous désignerons ce sens comme *négatif* (-), soit la configuration inverse (Figure 54b), que l'on désignera comme sens *positif* (+). Nous allons déterminer ce sens de l'entité en fonction du sens d'usinage des strates.

3.4.3.1. Usinage Recto/Verso

Les strates réalisées en Stratoconception sont usinées selon le principe de la découpe Recto/Verso (Lauvaux, 2005). Un premier usinage est réalisé sur une face de la strate (découpe Recto), en laissant une surépaisseur - appelée *épaisseur de maintien* - qui va permettre le retournement de la plaque sans désolidariser les strates (Figure 55). Après avoir retiré la surépaisseur (surfaçage), un second usinage (découpe Verso) est exécuté, pour réaliser les zones inaccessibles lors du premier usinage (zones en contre-dépouilles).

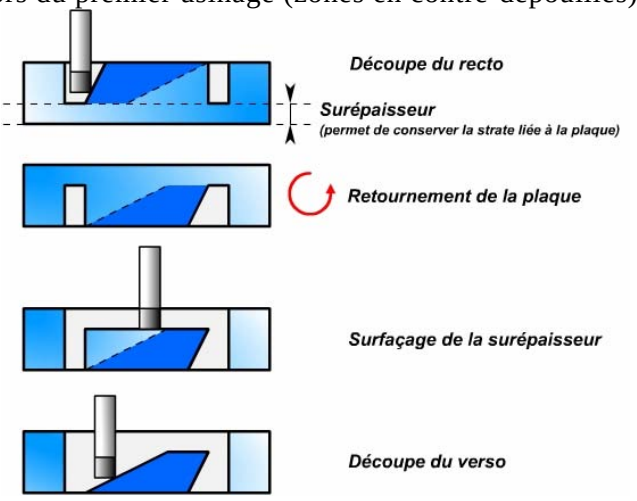


Figure 55 : Principe de l'usinage Recto/Verso et de l'épaisseur de maintien

Nous proposons d'utiliser l'épaisseur de maintien pour réaliser les entités d'assemblage mâles (les plots) (Figure 56). Cela a comme avantage d'utiliser cette matière qui est surfacée et donc inutilisée. De plus le temps passé au surfaçage de la surépaisseur sera en partie utilisé pour la réalisation des plots

dans la strate. La hauteur de surépaisseur sera donc la hauteur maximum pour nos plots, qui est paramétrable lors du tranchage.

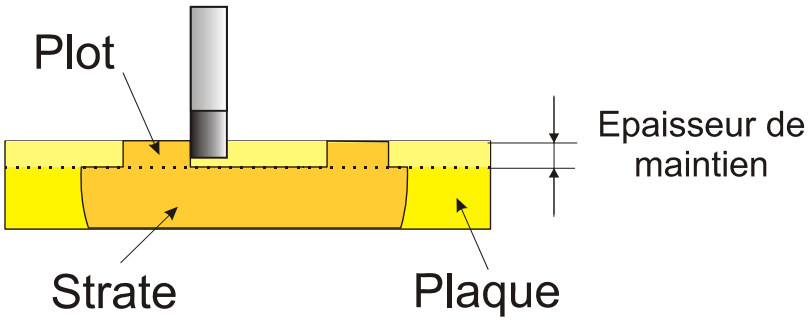


Figure 56 : Entités mâles réalisées dans l'épaisseur de maintien

3.4.3.2. Sens d'usinage optimal

Le *sens d'usinage* d'une strate définit la face de la strate qui est usinée au Recto. Le choix du sens d'usinage est fait de façon que, le volume retiré lors de l'usinage du Recto (V_r) soit inférieur à l'usinage du Verso (V_v) pour optimiser le maintien de la strate (Figure 57).

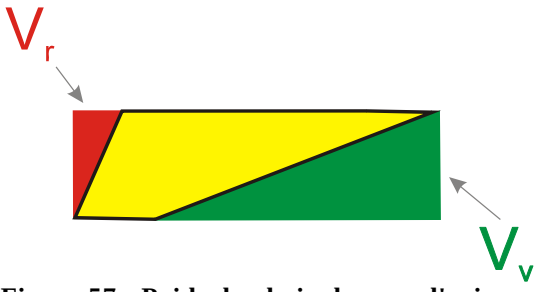


Figure 57 : Poids du choix du sens d'usinage

A chaque strate, nous attribuons un poids (de 0 à 1) qui représente la différence entre les pourcentages de volumes usinés au Recto (V_r) et au Verso (V_v). L'Équation 1 détermine ce poids en fonction des volumes.

$$P = \left| \frac{V_r - V_v}{V} \right| \text{ avec } V = V_r + V_v$$

Équation 1 : Poids du sens d'usinage

Il définit ainsi l'importance du choix du sens optimal. Autrement dit, si on inverse le sens d'usinage cela nous indique l'influence sur le maintien de la strate (0 correspond à aucune importance, peut être usiné en positif ou négatif indifféremment, 1 doit impérativement être réalisé dans le sens indiqué).

Pour parvenir à réaliser des plots et des logements correspondants dans les strates, il convient de choisir le sens des entités d'assemblage en fonction du sens d'usinage des strates.

				Strate supérieure S_n			
				Sens d'usinage +		Sens d'usinage -	
				VERSO		RECTO	
				Logement	Plot	Logement	Plot
Strate inférieure S_{n+1}	Sens d'usinage +	RECTO	Logement		+/+		
			Plot				
	Sens d'usinage -	VERSO	Logement		+/-		
			Plot	+/-		-/-	

Légende :

- Combinaison impossible à réaliser
- Combinaison réalisable mais inutile pour l'emboîtement
- Bonne combinaison pour l'emboîtement

Tableau 9 : Combinaisons plots/logements en fonction du sens d'usinage

Le Tableau 9 illustre les différentes combinaisons possibles pour réaliser un emboîtement mâle/femelle pour deux strates consécutives (S_n strate supérieure et S_{n+1} strate inférieure). Suivant leur sens d'usinage (Positif ou Négatif) la face qui appartient à l'inter-strate commune est usinée soit au Recto soit au Verso. Deux choix sont alors possibles, soit on usine des plots (mâles), soit des logements (femelles). Sachant que l'on ne peut réaliser des plots (mâles) que dans l'épaisseur de maintien, c'est à dire à l'usinage du Verso, cela limite les combinaisons possibles. Il en ressort que si les deux strates

successives ont le même sens d'usinage (+/+ ou -/-), il n'y a pas de problème. La combinaison +/- est également possible avec le choix de placer les plots dans la strate supérieure S_n ou la strate inférieure S_{n+1}.

Suivant le choix optimal du sens d'usinage, on peut obtenir des combinaisons impossibles pour l'emboîtement. Sur l'exemple du Tableau 10, on note deux combinaisons d'inter-strate qui ne peuvent être réalisées entre les strates 3 et 4, et entre les strates 6 et 7.

Strate n°	Sens d'usinage	Poids	Combinaison d'inter-strate
1	+	0.4	
			+/-
2	-	0.1	
			-/-
3	-	0.8	
			-/+
4	+	0.6	
			+/+
5	+	0.1	
			+/-
6	-	0.2	
			-/+
7	+	0.3	

Tableau 10 : Exemple de choix optimal du sens d'usinage

Pour résoudre ce problème, plusieurs solutions :

1. Forcer le sens d'usinage de l'ensemble des strates en positif ou négatif
2. Modifier les sens d'usinage pour pouvoir réaliser les entités d'assemblage et être le plus proche possible du choix initial (optimal pour le maintien)

Nous proposons un algorithme de modification des sens d'usinage des strates pour permettre la réalisation des emboîtements, en restant au plus proche du choix optimisant le maintien des strates.

3.4.3.3. Algorithme de modification du sens d'usinage des strates

L'algorithme de modification du sens d'usinage des strates pour permettre la mise en place de l'emboîtement est décrit sur le Tableau 11.

1. Calculer le sens optimal de chaque strate S_j et son poids associé P_j
2. Comparer les différences de sens entre la solution i et la solution optimale
3. Pour i=0 à nombre de strates
    3.1 Pour chaque tranche j
        si ((i>=j) et S_j != positif) ou ((i<j) et S_j != négatif)
        alors PoidsCumulé = PoidsCumulé + P_j
    3.2 si PoidsCumulé est le minimum alors conserver la solution i*
4. Fixer le sens correspondant à la meilleure solution i*

Tableau 11 : Algorithme d'optimisation du sens d'usinage

Un exemple d'application de cet algorithme est illustré sur la Figure 58. Le choix optimum des sens d'usinage est représenté en vert, à coté duquel est précisé le poids de l'importance de ce choix. Nous comparons ensuite toutes les combinaisons possibles n'ayant qu'un seul changement de sens d'usinage +/- (8 solutions notées de 0 à 7) à la solution optimale. Pour chaque différence (marquée en rouge) entre la solution optimale et notre combinaison, nous additionnons le poids correspondant. Nous choisissons alors la nouvelle configuration de sens d'usinage qui minimise cette différence en poids cumulé (solution 6, en bleue sur la Figure 58).

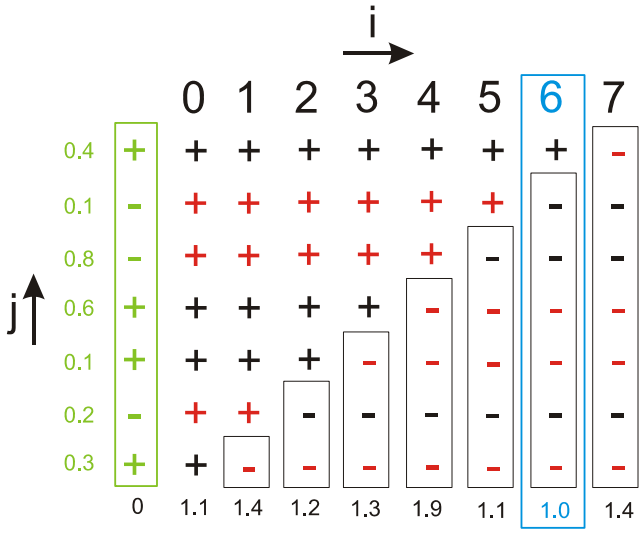


Figure 58 : Exemple de résultat de l'algorithme d'optimisation du sens d'usinage

Autrement dit, nous choisissons parmi toutes les combinaisons possibles qui permettent de réaliser nos entités, celle qui va présenter le moins de différence avec le choix du sens d'usinage optimum.

3.4.4 Nombre d'éléments

Le nombre d'entités d'assemblage devant être placées sur notre inter-strate peut être guidé suivant deux voies :

- Un nombre fixe d'entités choisi au départ par l'opérateur pour une strate (par exemple 3)
- Un nombre variable d'entités défini par les dimensions de l'inter-strate. Dans ce cas, c'est la méthode de positionnement des entités (voir 3.5 Le positionnement (ou localisation)) qui va définir le nombre d'entités à placer en fonction de leur répartition dans l'inter-strate. Elle pourra, par exemple, inclure un paramètre définissant une distance minimale entre deux entités.

3.5 Le positionnement (ou localisation)

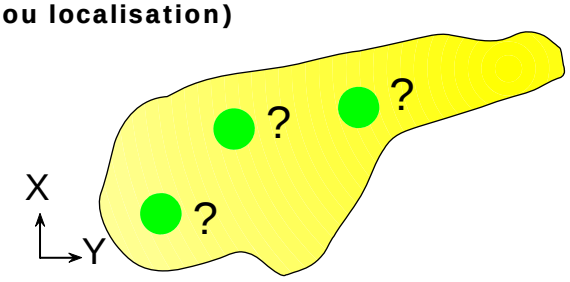


Figure 59 : Localisation des entités

La question qui se pose maintenant est la détermination des positions de nos entités d'assemblage dans l'inter-strate *IS* que nous appellerons *localisation* des entités d'assemblage. Dans le chapitre 4 (Approches de localisation automatique d'entités d'assemblage), nous présentons en détail plusieurs approches de localisation automatique de nos entités. A l'issue de ces méthodes, nous obtenons une liste d'entités avec leurs positions X et Y au sein de chaque strate.

3.6 Jeux et ajustements

3.6.1 Surfaces de l'entité d'assemblage

Chaque entité est composée de plusieurs surfaces (Figure 60).
Tout d'abord la surface d'*appui* qui correspond à la surface d'inter-strate IS et qui est la surface de contact entre l'entité mâle (plot) et l'entité femelle (logement). Elle assure le positionnement suivant l'axe Z.
Ensuite les flancs de l'entité qui vont être en contact en différents endroits suivant la forme des deux entités (voir 3.4.1 Formes).
Enfin le dessus (plot) et le fond (logement) qui ne doivent pas être en contact pour s'assurer de l'appui à l'inter-strate.

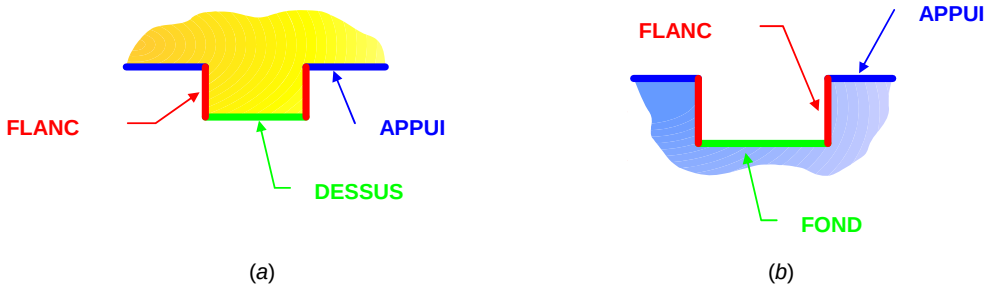


Figure 60 : Surfaces de l'entité d'assemblage

3.6.2 Les jeux et ajustements

Pour assurer les contacts et la précision de positionnement de nos entités nous mettons en place des jeux fonctionnels entre leurs surfaces (Figure 61).

- L'*ajustement* ***a*** : jeu qui permet le montage des deux entités
- Le *jeu* ***j*** qui assure que le contact se fait sur la surface d'appui (surface d'inter-strate *IS*)
- La *profondeur* ***p*** est la hauteur nominale du logement. La hauteur du plot H_p sera égale à la profondeur moins le jeu *j*.

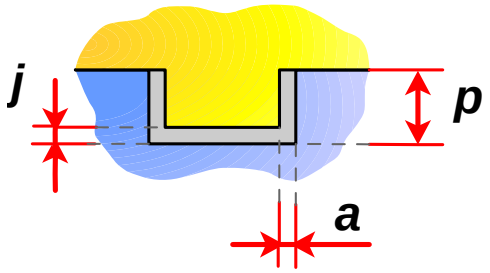


Figure 61 : Les jeux

L'ajustement *a* doit permettre le montage, un positionnement précis et une transmission des efforts dans certains cas. Les ajustements normalisés définissent des zones géométriques de tolérance dans lesquelles les formes doivent être contenues (Schneider, 2005). Ils se limitent aux formes cylindriques ou prismatiques. Deux types de tolérancement doivent être pris en compte : le tolérancement du positionnement des entités et le tolérancement de formes des entités. Dans notre cas, il s'agit d'un tolérancement sur l'assemblage de deux pièces (Inui, 1991, Ostrovsky-Berman, 2005) avec plusieurs entités. Nos deux pièces doivent être immobiles et ajustées pour assurer un bon positionnement. Le montage doit être possible à la main. On se situera dans des ajustements normalisés de type H8/6 pour le logement et h7/5 pour le plot (Fanchon, 1994). Cela nécessite de réaliser des usinages avec des intervalles de tolérances de l'ordre de 0.03 à 0.01 mm pour le logement et 0.02 à 0.01 mm pour le plot pour une cote nominale de 10 mm par exemple. Nous devrons réaliser ces emboîtements sur des machines-outil suffisamment précises pour pouvoir atteindre ces qualités. La quantification des tolérances se fera suivant les dimensions des entités et des matériaux et sera déterminée par expérience.

3.6.3 L'usinage des entités

L'usinage est effectué en trois étapes afin d'obtenir une bonne précision sur les entités :

1. Surfaçage de la surface d'appui (Surface de l'inter-strate à laquelle on retire les plots décalés d'une surépaisseur Figure 62b en orange)
2. Surfaçage du dessus des plots ou du fond des logements décalés d'une surépaisseur également (Figure 62b/c et e/f en rouge). Le surfaçage du dessus des plots n'est nécessaire que si la hauteur du plot est inférieure à l'épaisseur de maintien
3. Détourage des flancs, à la cote précise, opération de finition qui ne retire que la surépaisseur laissée par les surfaçages. C'est cette opération qui donne la précision de l'ajustement *a* (Figure 62 c et f en vert).

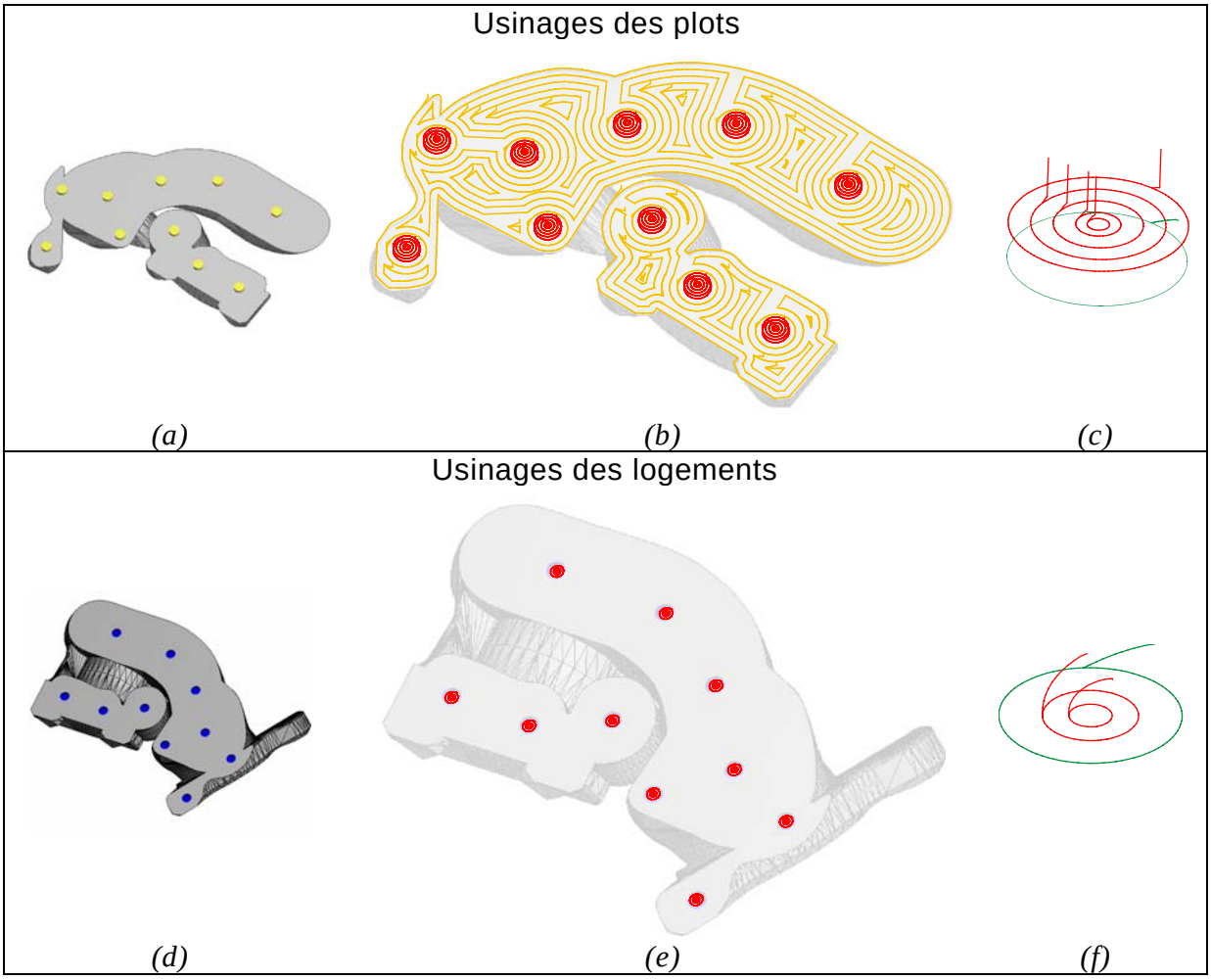


Figure 62: L'usinage des plots et logements

Une opération supplémentaire peut également être faite pour les outils possédant un rayon ou un chanfrein pour dégager le chanfrein ou le rayon laissé entre la surface d'appui et les flancs du plot. Dans le paragraphe 6.4 *Formes imbricables*, nous évoquerons en détails la génération des trajectoires outil pour les emboîtements de formes complexes.

3.7 Autres spécifications

Sur les plots et logements pourront être apportées des fonctionnalités supplémentaires en modifiant la forme de l'extrusion du plot et du logement :

- un chanfrein pour faciliter le montage
- une dépouille sur le flanc des plots pour réaliser un centrage et une mise en position ou une contre-dépouille pour empêcher un démontage pour un matériau élastique (réalisée avec un outil de forme).
- un mouvement linéaire ou circulaire dans le plan XY pour la mise en place et éventuellement un verrouillage de la strate.

- un détrompeur pourra être réalisé, en générant un plot dont la forme est différente des autres pour que pour le montage ne puisse se faire que sur une seule position. Ceci est particulièrement adapté lorsque la répartition des plots et la pièce sont symétriques.

3.8 Modélisation de données objet de l'emboîtement

Nous donnons ici une rapide description de la structure, grâce à une modélisation orienté-objet (Holland, 2000), qui décrit les classes principales et leurs attributs principaux.

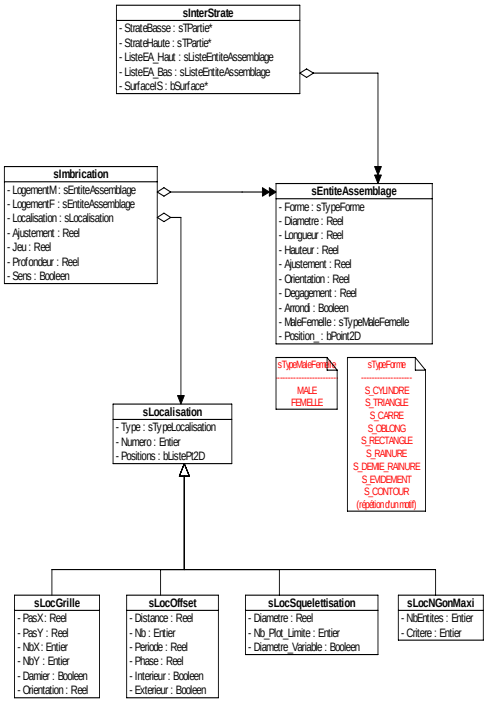


Figure 63 : Modélisation orienté-objet de l'emboîtement

La Figure 63 illustre la modélisation orienté-objet des données de l'emboîtement et leurs attributs notamment :

- la classe *InterStrate*, qui contient les strates supérieure et inférieure sur lesquelles sont placées les entités d'assemblage, la surface d'inter-strate et deux listes contenant les entités d'assemblage de la strate supérieure et les entités de la strate inférieure.

- la classe *EntiteAssemblage*, qui décrit une entité d'assemblage avec sa forme, ses dimensions, ses jeux, son type (mâle ou femelle) et sa position.

- La classe *Imbrication*, qui représente l'association de deux entités d'assemblage et d'une localisation sur la surface d'inter-strate.

- La classe *Localisation* et ses classes dérivées qui définissent les différentes méthodes de positionnement des entités et leurs paramètres.

Les entités d'assemblage étant définies, il faut les mettre en place dans chacune des strates. Cette opération de localisation peut être réalisée automatiquement. Nous présentons plusieurs approches en détail dans le chapitre suivant.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré l'intégration de l'assemblage au sein des couches d'une nouvelle méthode d'assemblage, l'emboîtement. Nous avons présenté le principe de cette méthode et des éléments qui la composent : les entités d'assemblage au travers d'un état de l'art de leur utilisation dans d'autres domaines. Nous avons défini leur forme, leur dimension, leurs ajustements et nous avons terminé par une modélisation objet de notre structure gérant l'emboîtement. Mais il reste maintenant à positionner ces entités au sein des couches. C'est la problématique de la localisation des entités d'assemblage que nous allons développer dans le chapitre suivant.

4. Approches de localisation automatique d'entités d'assemblage

4.1 FORMULATION DU PROBLEME

4.2 SIMPLIFICATION DU PROBLEME

4.3 CONTRAINTES DE LA LOCALISATION

4.4 ETAT DE L'ART DE LA GENERATION AUTOMATIQUE D'ENTITES D'ASSEMBLAGE

4.5 METHODE MANUELLE

4.6 METHODE PAR GRILLE

4.7 METHODE PAR OFFSET ET DISCRETISATION 1D

4.8 METHODE PAR FORCES DE REPULSION

4.9 METHODE PAR K-GON MAXIMUM

4.10 BILAN DES METHODES DE LOCALISATION D'ENTITES

Dans ce quatrième chapitre, nous présentons diverses approches de localisation de nos entités d'assemblage au travers d'algorithmes de placement par grilles, par forces de répulsion ou par un algorithme génétique maximisant les distances entre entités. Nous analysons leurs avantages et inconvénients pour notre application.

4.1 Formulation du problème

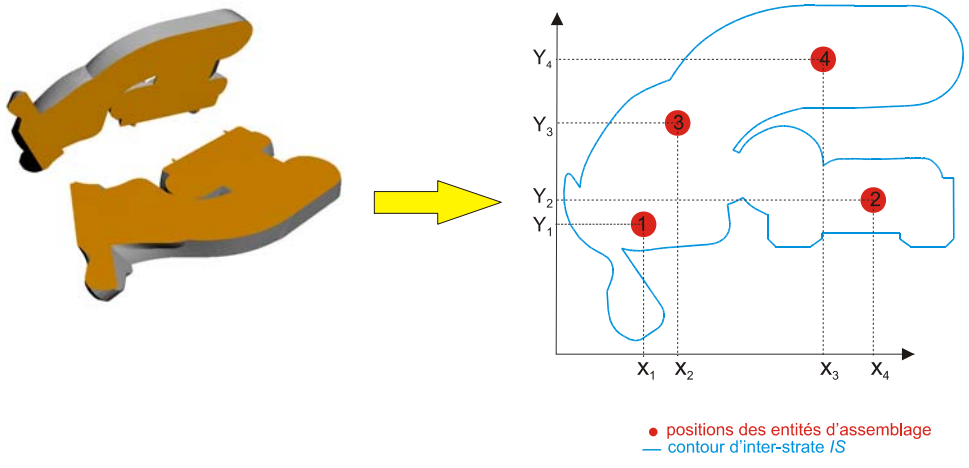


Figure 64 : Problématique de localisation des entités

Le problème de localisation revient à positionner un ensemble d'entités (représentées par leur centre) en optimisant la précision de l'assemblage et en assurant le maintien de toutes les parties.
Considérons P_i le centre de l'entité défini par ses coordonnées (X_i et Y_i).
Cela revient à positionner dans une surface S_{IS} des points P_i au mieux suivant un critère qui optimisera la fonction de positionnement et de maintien de l'ensemble des entités. La surface S_{IS} est en réalité composée de plusieurs faces 2D, elles-mêmes composées d'un contour extérieur et éventuellement, de plusieurs contours intérieurs. Nous considérerons dans la suite que cette surface S_{IS} représente une face 2D, les méthodes de localisation pouvant s'appliquer successivement sur chaque face d'une surface.
Le nombre d'entités Pi sera soit fixé au départ, soit dépendant de la méthode et des critères de celle-ci.

4.2 Simplification du problème

La décomposition en strates étant réalisée selon un plan, nous restreindrons notre étude à partir des hypothèses suivantes :

- Hypothèse 1 : La surface de contact S_{IS}, entre les deux strates S_n et S_{n+1} , est plane
- Hypothèse 2 : Les entités d'assemblage sont des extrusions droites obtenues par usinage 2 axes ½
- Hypothèse 3 : Nous nous limiterons à étudier le problème en 2 dimensions (dans le plan) sans pour l'instant nous soucier de la profondeur des entités. Une méthode pour la gestion de cette profondeur sera présentée dans la suite de ce manuscrit (§6.3 Profondeur de l'emboîtement page 133).

Dans la suite, nous considèrerons que toutes les entités sont de forme circulaire, cette forme étant le cercle englobant l'entité.

4.3 Contraintes de la localisation

La localisation est donc contrainte par plusieurs données :

- de placer les entités où se trouve la matière, c'est à dire à l'intérieur de la surface S_{IS}.
- d'assurer le meilleur tolérancement mécanique (en éloignant au maximum par exemple un centreur et un locating),
- de placer des entités espacées de manière régulière sur la surface,
- d'éliminer le chevauchement entre les entités,
- de s'adapter à la forme de la pièce pour éviter que des zones isolées ou des zones fines de la pièce se désolidarisent,
- d'optimiser le temps de fabrication (plus le nombre d'entités à réaliser est important, plus le temps de fabrication va augmenter)

- de détecter les collisions entre les entités et la surface extérieure de la pièce (pas dans un premier temps comme évoqué dans l'hypothèse 3, voir le paragraphe 6.3 Profondeur de l'emboîtement page 133)

4.4 Etat de l'art de la génération automatique d'entités d'assemblage

Si on trouve de nombreux travaux sur les entités d'assemblage (voir 3.2 Etat de l'art page 60), peu de travaux se sont intéressés à la *génération automatique d'entités d'assemblage* sur une surface de décomposition pour l'assemblage de deux pièces. Les domaines, où l'on trouve ces études, sont ceux de la décomposition des pièces en CAO, ou de la création de moules en plusieurs parties (Huang, 2003, Priyadarshi, 2004).
La création de moules métalliques décomposés en plusieurs parties (Lee, 2003) nécessite la modélisation en CAO de formes pour leur réassemblage. Les méthodes proposées sont assistées pour la création des entités (queues d'aronde) mais restent manuelles (Figure 65).

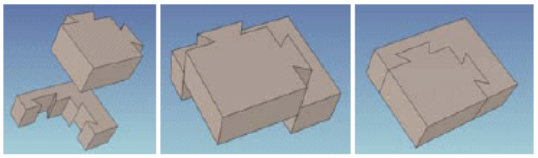


Figure 65 : Moules en plusieurs parties (Lee, 2003)

Encore appliquée aux moules, Dhaliwal (Dhaliwal, 2001) décrit une méthode assez simple en ajoutant deux couples d'entités plot/trou dans chaque surface de contact, en les plaçant sur une grille et en maximisant la distance entre eux (Figure 66).

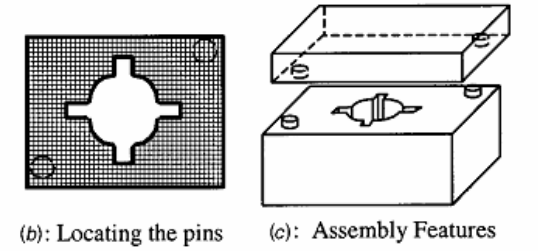


Figure 66 : Génération d'un couple d'entités par grille (Dhaliwal, 2001)

Pour la décomposition de grands modèles CAO en plusieurs composants de plus petites dimensions, Chan (Chan, 2003) propose, grâce à une méthode de lancer de rayons sur la surface de décomposition, de placer des cellules sur une grille, puis de les regrouper par différents filtres (Figure 67).

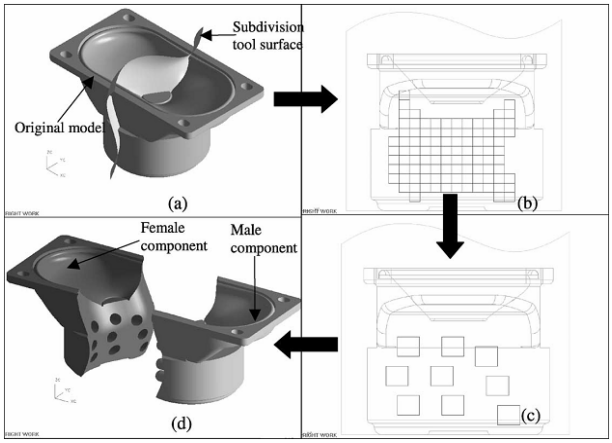


Figure 67 : Localisation par lancer de rayons (Chan, 2003)

Ces méthodes fonctionnent bien pour des pièces où la surface, pour la mise en place des entités de liaison, est suffisamment grande et elles dépendent également du choix préalable du pas et de la position de la grille. Certaines pièces peuvent nécessiter cependant des assemblages plus complexes, et par conséquent, plus difficiles à mettre en œuvre (Figure 68). De plus le temps de calcul pour ces méthodes basées sur des grilles devient très important pour une grande précision (pas de la grille faible) et pour des pièces de grandes dimensions. Ces méthodes ne tiennent pas compte des épaisseurs de matière et de la géométrie de la surface pour réaliser le placement, elles peuvent ainsi laisser des parties de la surface sans entité d'assemblage.

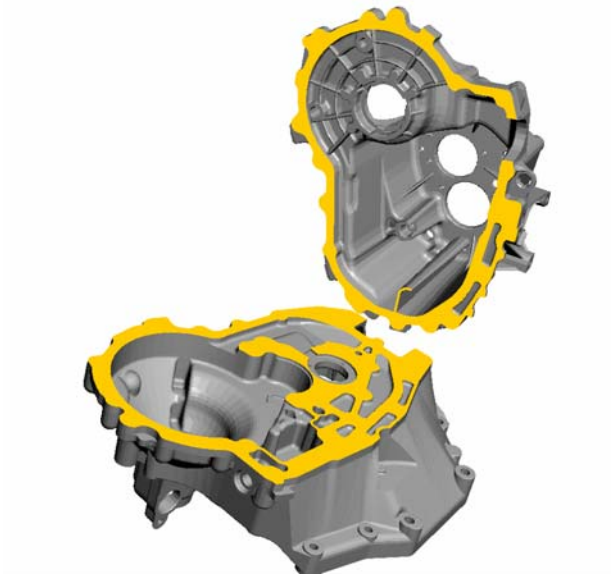


Figure 68 : Exemple d'assemblage complexe à mettre en œuvre

Nous allons maintenant présenter plusieurs algorithmes de localisation des entités et comparer leurs avantages et inconvénients pour notre besoin.

4.5 Méthode manuelle

La première approche, la plus simple, consiste à procéder comme pour le placement des inserts actuellement utilisé par le procédé (voir 2.3.1 Les inserts page 40), c'est à dire à proposer un outil interactif à l'opérateur pour choisir lui-même, à l'aide de la souris, la position d'une entité dans la plan XY et à répéter cette entité à cette position dans l'ensemble des strates de la pièce. Chaque entité étant supprimée si celle-ci n'est pas entièrement à l'intérieur de la surface S_{IS}. On donne également la possibilité de supprimer manuellement une entité dans une strate particulière.
Cette approche ne remplit pas notre volonté de réaliser cette opération automatiquement (voir 3.3 Les contraintes page 64). Nous allons donc envisager d'autres méthodes possibles.

4.6 Méthode par grille

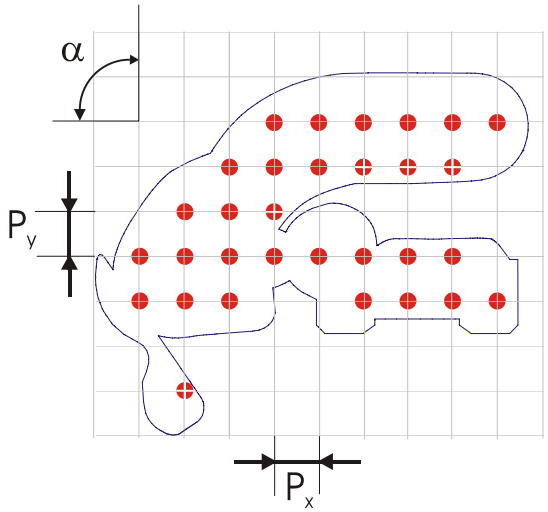


Figure 69 : Localisation par grille

Le principe est de générer les entités régulièrement espacées sur une grille (Figure 69) dont les pas suivant l'axe X et l'axe Y sont fixés respectivement à P_x et P_y. Un angle α détermine l'angle entre les deux directions principales de la grille (90° par défaut). La taille (nombre de lignes et nombre de colonnes) et la position de cette grille est adaptée au contour d'inter-strate, en fonction des dimensions de la boite englobante du contour. Les entités de la grille qui ne sont pas entièrement incluses dans le contour d'inter-strate sont supprimées (Tableau 12). On peut également choisir d'alterner la mise en place d'une entité une position sur deux, comme un damier. Cette méthode est comparable à la technique utilisée pour l'assemblage des briques Légo® (voir Figure 46 : Brevet Légo® et brique élémentaire (Hughes, 2005) page 61).

1. *Calcul de la dimension de la grille :*
   Nombre de colonnes (Nb_X) et nombre de lignes (Nb_Y)
   Nb_X= BoiteEnglobante(S_{IS}).D_x() / P_X +1
   Nb_Y =BoiteEnglobante(S_{IS}).D_y() / P_Y +1
2. Pour j=0 à Nb_Y *// les lignes*

   2.1 Pour i=0 à Nb_X *// les colonnes*

   2.2 Test pour le damier
   Si !((i mod 2) ⊕ (j mod 2)) Alors

   2.2.1 *Calcul de la position de l'entité E_{ij}*
   $X_i = i * P_X$
   $Y_i = j * P_Y$

   2.2.2 *Test de l'appartenance de l'entité à la surface d'inter-strate S_{IS}*
   Si $E_{ij} \subset S_{IS}$ alors ajouter l'entité E_{ij}

Tableau 12 : Algorithme de localisation par grille

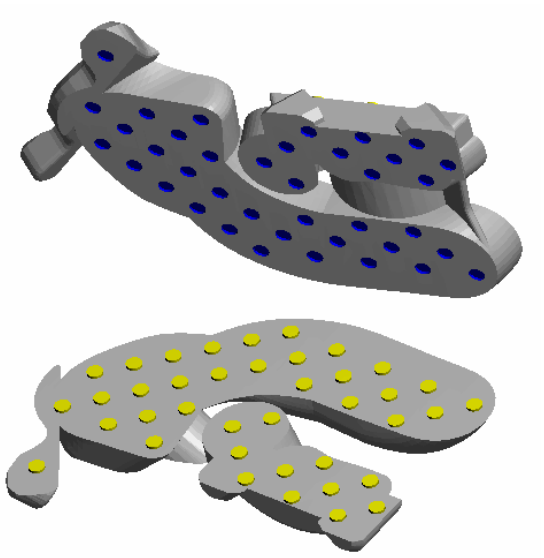


Figure 70 : Génération d'entités avec localisation par grille
(Pièce : Turbo.stl / P_x=P_y=10 mm / α=90° / Damier=oui / 39 entités)

On peut envisager des variantes à cette méthode, en appliquant le même principe avec une répétition non plus basée sur des cellules carrées ou rectangulaires, mais avec d'autres motifs répétés comme par exemple un triangle ou un hexagone (Uznanski, 2002).

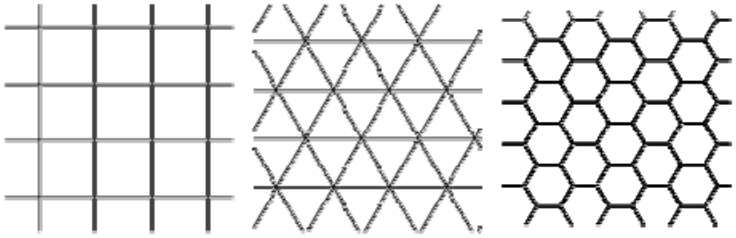


Figure 71 : Grilles carrées, triangulaires, hexagonales (Uznanski, 2002)

On notera cependant plusieurs inconvénients à cette méthode :

- Elle nécessite une surface d'inter-strate importante
- Les résultats dépendent du choix du pas et de la position de la grille (Figure 72)
- Les temps de calcul peuvent être très importants si le pas de la grille est faible ou si les pièces sont de grandes dimensions.
- Cette technique peut laisser des zones sans entité d'assemblage comme l'illustre l'exemple de la Figure 72.
- Des entités proches de la frontière de la surface peuvent fragiliser les strates.
- Elle génère beaucoup d'entités pas forcement nécessaires

Tous les algorithmes basés sur une répartition par grille (Dhaliwal, 2001) (Chan, 2003) présentent effectivement ces inconvénients.

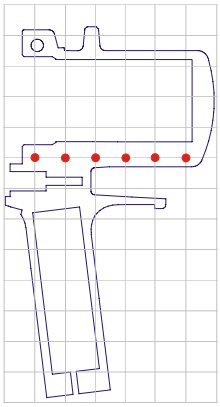


Figure 72 : Problème pour la localisation par grille

4.7 Méthode par offset et discrétisation 1D

Plutôt que d'utiliser une grille indépendante des formes de la pièce, qui génère des entités à des endroits inutiles et oubliant des zones de la pièce, nous imaginons répartir les entités sur un contour directement lié à la forme du contour d'inter-strate. Dans cette méthode, nous calculons tout d'abord un contour décalé d'une valeur constante D (offset) du contour d'inter-strate, pour éviter de placer des entités trop proches du bord de la surface. Sur ce

contour offseté, nous réalisons une discrétisation régulière suivant une dimension. Nous plaçons des entités sur ce contour, à intervalle constant P, en distance curviligne (Figure 73). Nous pouvons également déterminer le pas P en fonction d'un nombre d'entités fixe k à placer et de la longueur totale du contour L_c ($P = L_c / k$).

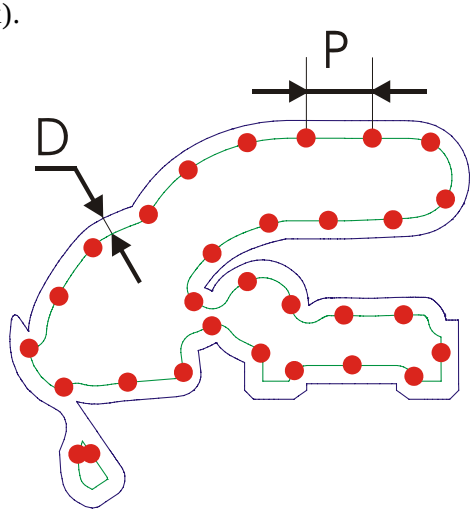
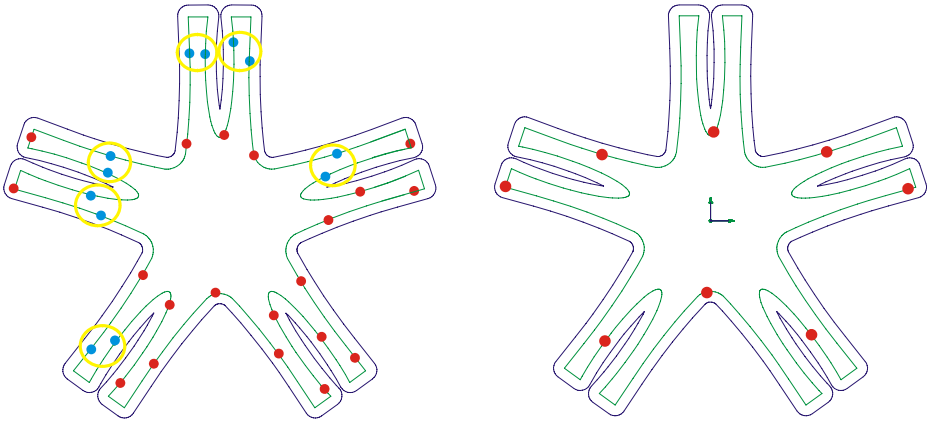


Figure 73 : Localisation par discrétisation 1D

Inconvénients :

On constate rapidement les limites de cet algorithme (Figure 74). Les entités peuvent être très proches les unes des autres, voir se chevaucher.

La répartition finale des entités est mauvaise. Elle ne parvient pas à placer de manière homogène les entités nécessaires dans les formes de la pièce. Cela est d'autant plus vrai si l'on fixe au départ le nombre d'entité k (Figure 74b).



Espacement régulier P=50 mm — *(a)*

Nombre fixe k=8 — *(b)*

Figure 74 : Problème de la localisation par discrétisation 1D

4.8 Méthode par forces de répulsion

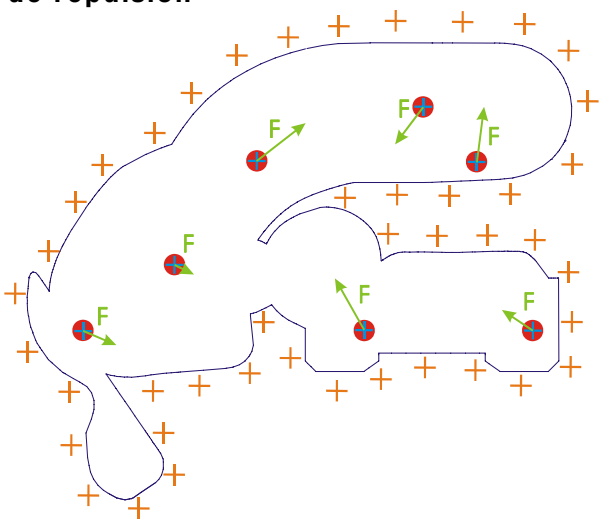


Figure 75 : Localisation par forces de répulsion

Cet algorithme, basé sur une loi de la physique, la force de répulsion électrostatique, a pour but de positionner des nœuds (ou particules) en deux dimensions.

$$F = k \times \frac{1}{r^2}$$

On trouve des utilisations de cette méthode en géométrie algorithmique, par exemple, pour la reconstruction de surface ou la construction de squelette (Crossno, 1997, Wu, 2003). On affecte des forces à chacune des particules comme si elle était chargée électriquement. Les forces sont appliquées aux particules, les déplaçant ainsi en se repoussant (ou en s'attirant) les unes des autres. L'algorithme évolue par itération jusqu'à que le système atteigne un état d'équilibre, c'est à dire que les positions des particules ne changent plus.
Pour notre application nous appliquons des charges électriques sur le contour d'inter-strate et sur les entités que nous souhaitons placer. Chaque entité (ou particule) P_i se déplacera en étant repoussée à la fois par les autres entités et par le contour, jusqu'à la convergence de l'algorithme.
La force exercée par le contour C (ou une suite de segments AB) sera notée F_{ci} (Figure 76), elle sera calculée suivant une intégrale sur chaque segment AB du contour (**Équation 2**).

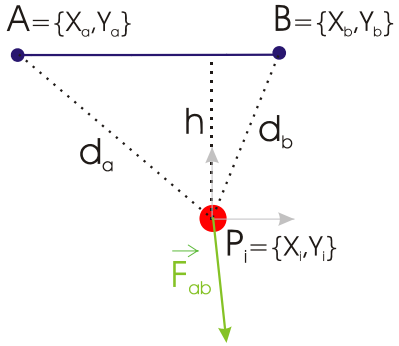


Figure 76 : Force F_{ab} d'un segment AB sur une particule P_i

$$\vec{F}_{ab} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{1}{\sqrt{X_b{}^2 + Y_a{}^2}} - \frac{1}{\sqrt{X_a{}^2 + Y_a{}^2}} \\ -\frac{X_b}{Y_a} \times \frac{1}{\sqrt{X_b{}^2 + Y_a{}^2}} + \frac{X_a}{Y_a} \times \frac{1}{\sqrt{X_a{}^2 + Y_a{}^2}} \end{array} \right\}$$

$$\vec{F}_c = \sum_1^N \vec{F}_{ab}$$

Équation 2 : Calcul de la force de répulsion du segment AB (repère relatif)

La force exercée par les entités sur l'entité P_i sera notée F_{pi} (Équation 3). Nous considérerons *k* entités à placer. La position initiale des k entités pourra être définie par l'utilisateur à la souris ou générée aléatoirement à l'intérieur du contour. L'algorithme complet de la méthode est décrit sur l'illustration du Tableau 13.

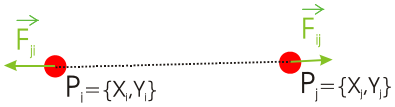


Figure 77 : Force F_{ij} entre deux particules P_i et P_j

$$\vec{F}_{ij} = -\frac{\overrightarrow{P_i P_j}}{\left\| \overrightarrow{P_i P_j} \right\|^2}$$

$$\vec{F}_p = \sum_1^k \vec{F}_{ij}$$

Équation 3 : Calcul de la force de répulsion des particules entre elles

1. Placement des particules à leur position initiale P_i
2. Calcul du déplacement fixe D_f en fonction des dimensions du contour
3. Calcul des forces de chaque particule F_i
   - 3.1 Calcul la somme des forces de chaque arête du contour sur la particule F_{ci}
   - 3.2 Calcul de la somme des forces des autres particules j, F_{pi}
   - 3.3 Somme des deux forces $F_{i=}$ F_{ci+} F_{pi}
4. Déplacement des particules $D_i = F_i * D_f$
5. Arrêt si l'équilibre est atteint $P_i(t) \approx Pi(t-1)$, sinon boucle sur 3.

avec :

D_f : déplacement fixe correspond au déplacement maximum à chaque itération des particules (valeur constante)

Tableau 13 : Algorithme de localisation par forces de répulsion

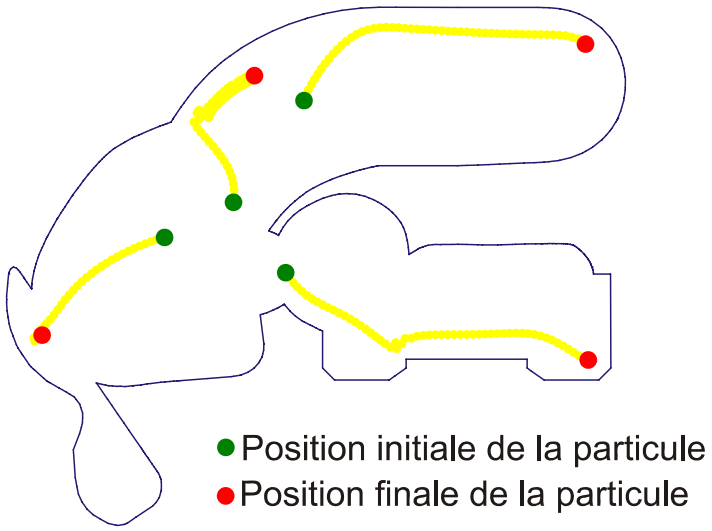


Figure 78 : Exemple de localisation par forces de répulsion pour k=4 entités

Avantages de la méthode :

- Bonne qualité des résultats : on obtient une répartition assez uniforme et souvent symétrique si la pièce est elle-même symétrique.
- Flexible : Elle peut facilement être adaptée et étendue à d'autres critères.
- Simple : Cet algorithme est simple à implanter.
- Interactif : Une autre avantage est l'aspect interactif : L'utilisateur peut ajouter une ou plusieurs entités à une précédente configuration déjà établie et voir l'évolution de cette nouvelle configuration.

Inconvénients :

- Les temps d'exécution peuvent être longs, suivant la vitesse de déplacement D_f choisie et le nombre N de segments du contour.
- Minimum locaux : La solution obtenue est un minimum local, qui peut être parfois assez éloignée de la meilleure solution globale. Le résultat final va également être extrêmement dépendant de la position initiale des entités (qui peut être déterminée aléatoirement). La Figure 79 montre trois résultats différents pour trois positions initiales des entités.
- Non convergence : L'algorithme n'est pas garanti de converger. Il peut dans certains cas entrer dans une boucle infinie.

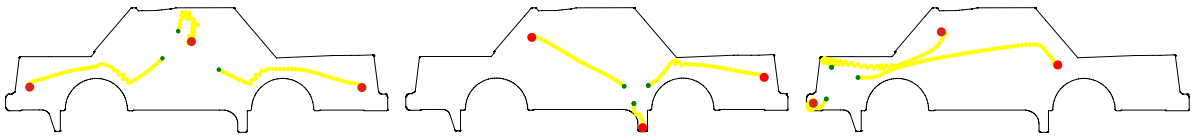


Figure 79 : Influence du résultat en fonction de la position initiale des entités

La Figure 80 illustre le résultat de cet algorithme sur un ensemble de 16 polygones avec trois entités placées (k=3). Le Tableau 14 donne les temps d'exécution pour chaque polygone, N est le nombre de points du polygone.

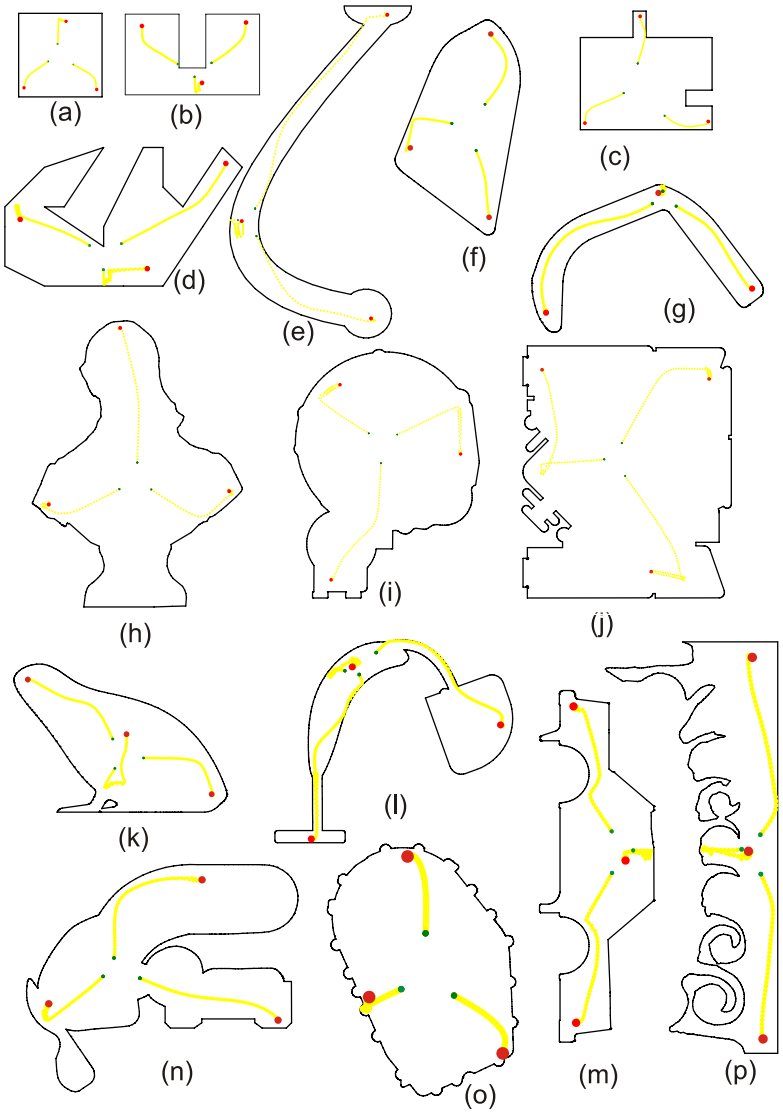


Figure 80 : Résultats par la méthode de localisation par forces de répulsion pour 16 polygones

	Modèle	k	N	Algo FR temps (s)
a	Carre	3	4	3,00
b	Forme_U	3	8	3,94
c	Test2	3	12	2,84
d	Graham	3	19	6,34
e	Pied	3	117	4,64
f	Massive	3	178	2,36
g	Tordue	3	232	5,69
h	Ferry	3	259	5,05
i	Carter 2	3	305	9,97
j	Plaque	3	311	6,61
k	Grenouille	3	315	5,19
l	Tubulure	3	384	12,11
m	Car	3	557	9,56
n	Turbo	3	573	6,70
o	Carter	3	955	6,22
p	Lion	3	1363	21,03

Tableau 14: Temps de l'algorithme par forces de répulsion (sur Intel Xeon CPU 3.40Ghz, 2 Go de RAM)

On peut décider de ne pas fixer le nombre d'entités k au départ et générer une entité pour chaque sommet du contour (Figure 81). On obtient ainsi des minimums locaux comme ceux des nœuds permettant d'extraire un squelette du contour (Wu, 2003).

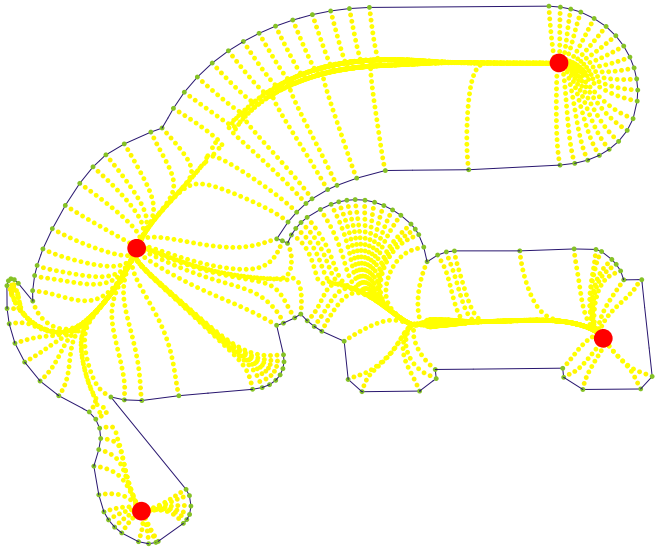


Figure 81 : Minimums locaux

4.9 Méthode par k-gon maximum

4.9.1 Principe

Nous proposons ici une méthode pour optimiser le placement d'un nombre fixe d'entités.

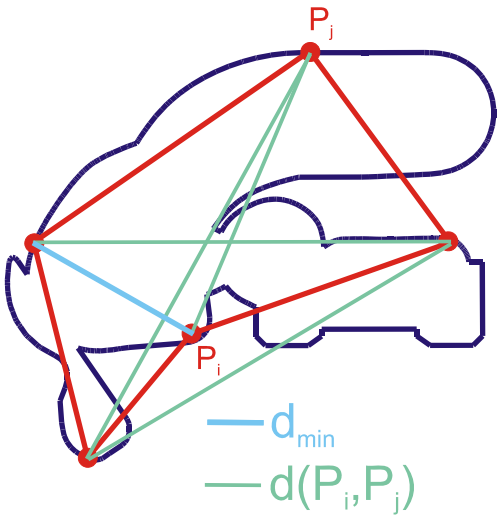


Figure 82 : Recherche du k-gon maximum (k=5)

On souhaite s'intéresser au problème suivant : nous voulons placer *k* entités sur un polygone afin quelles soient le plus éloignées possibles les unes des autres.

Si *k*=2, on cherche les deux points les plus éloignés du polygone, cela revient à calculer le diamètre maximum du polygone .

Si *k*=3, les trois points les plus éloignés forment le triangle ayant son plus petit coté de longueur maximum (Eppstein, 1991, Brass, 2001).

Si *k*>3, les *k* points forment un *k-gon* sur le polygone. On recherche à maximiser la distance minimum de l'ensemble des paires de points du *k-gon*. Autrement dit nous voulons maximiser la fonction suivante :

$$d_{\min} = \min_{i\in[1;k]}\left\{\min_{j\in[i;k]}\left\{d(P_i,P_j)\right\}\right\} \text{ pour } i\neq j$$

où $d(P_i,P_j)$ est la distance euclidienne entre le point P_i et le point P_j
où P_i et P_j appartiennent au k-gon

Pour le calcul du diamètre maximum du polygone (k=2) nous proposons une méthode basée sur les *Rotating Calipers* (§4.9.2) et une autre méthode pour le k-gon maximum (k≥3) par algorithme génétique (§4.9.3).

4.9.2 Diamètre maximum (k=2)

Deux outils sont nécessaires pour notre algorithme de localisation de 2 entités : l'enveloppe convexe 2D d'un polygone et les *Rotating Calipers* que nous allons décrire dans les deux paragraphes suivants (§4.9.2.1 et §4.9.2.2).

4.9.2.1. Enveloppe convexe 2D

L'enveloppe convexe d'un polygone 2D quelconque est un polygone fermé convexe de taille minimale qui contient ce polygone (Chassignet, 1999).
Graham propose un algorithme *en O(n log n)* pour construire une enveloppe convexe (O'Rourke, 1998). Cet algorithme, appelé aussi *Grahan'scan*, est basé sur une construction incrémentale (Tableau 15). On ajoute un point à la fois dans l'enveloppe et on teste son appartenance à cette enveloppe. Pour ne pas tester si les points sont à l'intérieur de cette enveloppe, on ordonne les points angulairement. Quand un nouveau point est ajouté à l'enveloppe courante, on vérifie que trois points successifs sont orientés de manière à tourner à gauche sinon on retire le dernier point ajouté.

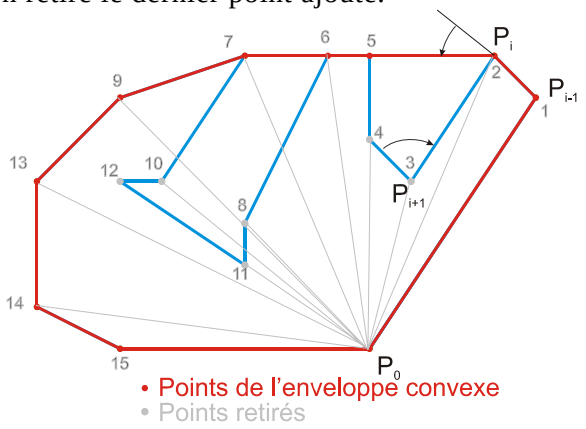


Figure 83 : Algorithme du Graham'scan (O'Rourke, 1998)

1. Recherche d'un point extremum p_0 (par exemple y_{min}). Ce point p_0 est certain d'être sur l'enveloppe convexe.
2. Tri des points angulairement autour de ce point p_0
3. Construction de l'enveloppe, points par points dans l'ordre fixé ci-dessus en ajoutant les arêtes quand on tourne à gauche et sinon on retire le dernier point ajouté.

Tableau 15 : Algorithme du Graham'scan

4.9.2.2. Algorithme du Rotating Calipers

L'algorithme suivant permet de trouver le diamètre d'un polygone convexe, c'est à dire la plus grande distance formée par une paire de points du polygone.

Soit un polygone convexe *P*, une *ligne de support l* est une ligne qui intersecte *P* de telle manière que le polygone *P* soit d'un seul côté de la ligne. Cette ligne est en quelque sorte tangente à *P*. Si deux points *p* et *q*, appartenant au polygone *P*, admettent deux lignes de support parallèles, alors ils forment une *paire antipodale* de points.
Il existe un algorithme de complexité *O(n)* appellé *Rotating Calipers* (Toussaint, 1983), qui permet de parcourir les paires antipodales du polygone pour trouver le diamètre maximum (Tableau 16). Il peut être représenté comme la rotation d'un pied à coulisse autour du polygone (Figure 84).

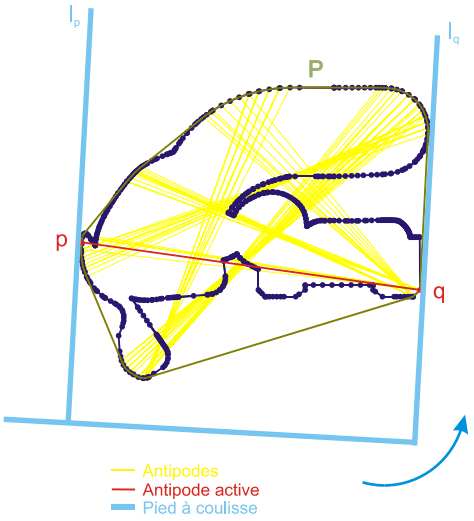


Figure 84 : *Rotating Calipers* et Paires Antipodales

1.Rechercher les points extremum suivant l'axe Y, y_{min} et y_{max}
2.Construire deux lignes de support horizontales passant par y_{min} et y_{max}. C'est la première paire antipodale.
3.Faire tourner les deux lignes jusqu'une des deux soit confondue avec une arête du polygone.
4.Une nouvelle paire antipodale est déterminée.
5.Calcul de la distance entre ces deux points. Conserver la distance maximum.
6.Répéter les étapes 3/4/5 jusqu'à retrouver la paire y_{min} / y_{max}.

Tableau 16 : Algorithme *Rotating Calipers* de Shamos (Toussaint, 1983)

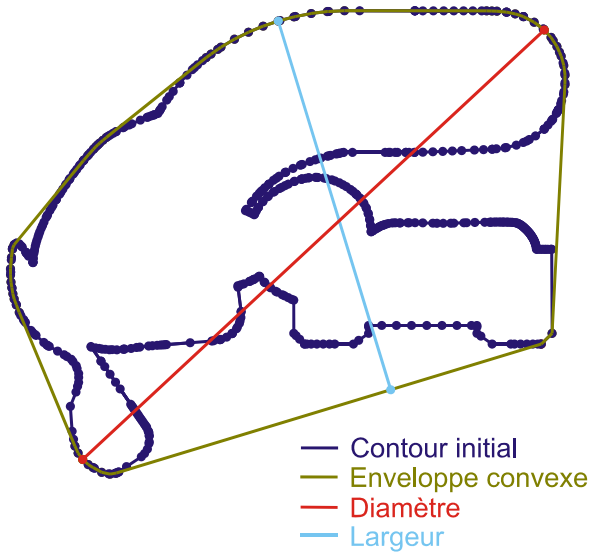


Figure 85 : Diamètre maximum, largeur minimum d'un polygone

D'autres paramètres caractéristiques du polygone peuvent être déterminés par des variantes de cet algorithme (Pirzadeh, 1999) (Toussaint, 1983), comme la *largeur* d'un polygone (Figure 85) grâce à un double *rotating calipers*. On peut également trouver par cette méthode *le rectangle d'aire minimum englobant* le polygone (Figure 86).

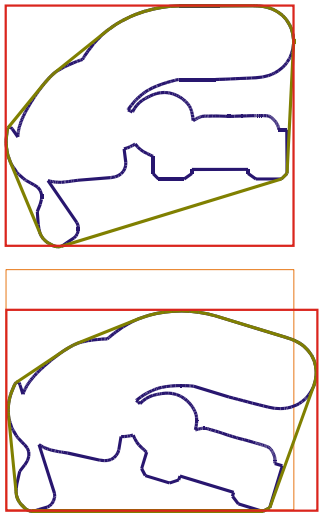


Figure 86 : Rectangle d'aire minimum englobant d'un polygone

4.9.2.3. Notre algorithme du diamètre maximum (k=2 entités)

Pour placer deux entités dans un polygone afin qu'elles soient les plus distantes possibles, nous proposons un algorithme (Tableau 17) qui va, tout d'abord, calculer la différence de Minkowski (O'Rourke, 1998) du contour initial et d'une valeur constante D (offset intérieur d'une valeur égale au diamètre D des entités que l'on souhaite placer) pour éviter que celles-ci ne

soient trop proches des bords (Figure 87). Nous calculons ensuite son enveloppe convexe par l'algorithme de Graham (voir 4.9.2.1 Enveloppe convexe 2D). Enfin nous déterminons son diamètre maximum par la méthode du *Rotating Calipers* (voir 4.9.2.2 Algorithme du Rotating Calipers page 93).

1. Calcul de l'offset intérieur *P'* du polygone *P* à une distance *D*.
2. Calcul de l'enveloppe convexe du polygone *P'*
3. Calcul du diamètre maximum par l'algorithme du *Rotating Calipers* et de la paire antipodale des points correspondants *p* et *q*.
4. Placement de nos deux entités sur ces points *p* et *q*.

Tableau 17 : Algorithme de localisation de 2 entités

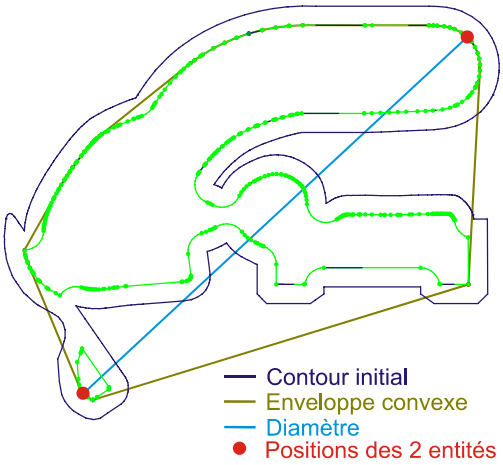


Figure 87 : Localisation par Diamètre Maximum

Pour le calcul avec 3 entités (k=3) nous utiliserons la méthode suivante du k-gon maximum.

4.9.3 k-gon maximum (k entités, k≥3)

4.9.3.1. Problématique

Notre problématique peut se décrire comme le placement automatique d'un nombre fixe k de points dans une zone délimitée par un polygone en maximisant la distance entre ceux-ci (Figure 82).

Nous recherchons ensuite parmi les points de ce contour, les k points qui maximisent la distance entre chaque paire de points.

Si k est supérieur à 3, le problème est complexe à résoudre par des méthodes d'optimisation traditionnelles. Etant donné la complexité et les temps de calcul des méthodes exactes d'optimisation, nous proposons une méthode non-déterministe fondée sur un algorithme génétique (Barthelemy, 2000).

4.9.3.2. Les algorithmes génétiques

Par analogie avec l'évolution naturelle, l'algorithme génétique fait évoluer une *population* d'individus, chaque *individu* représente une solution possible au problème. Les meilleurs individus sont sélectionnés, suivant leur capacité à résoudre le problème, puis subissent des *croisements* et des *mutations* pour donner naissance à une nouvelle population (Figure 88). Au fil des générations, l'évolution de cette population permet de tendre vers une population plus adaptée, donc vers une solution plus optimisée au problème posé. Les algorithmes génétiques ont démontré leur efficacité à optimiser de nombreux problèmes géométriques (Bonaldi, 1997, Berg, 2000, Whitley, 2001, Renner, 2003).

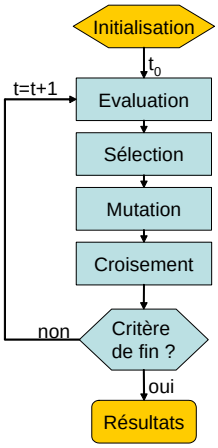


Figure 88 : Structure de l'algorithme génétique

4.9.3.3. Notre algorithme

Nous présentons en détails l'implémentation de notre algorithme génétique : tout d'abord, le codage du chromosome, qui représente la solution, les opérateurs de sélection, de mutation et de croisement, et ensuite la fonction d'adaptation qui se révèle essentielle dans la réussite de l'algorithme génétique.

4.9.3.3.1. Le codage de la solution

Chaque solution ou individu est représenté par un *chromosome*. Un chromosome est constitué de plusieurs *gènes*. Chaque gène g_i représente une variable de notre problème, dans notre cas, une position sur le polygone. L'espace de recherche pour g_i est le nombre de points du polygone [1 à N]. Si nous souhaitons placer k entités, le chromosome sera constitué de k gènes, chacun codé par un nombre binaire.

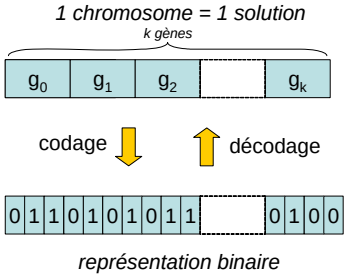


Figure 89 : Codage d'un chromosome

La phase d'initialisation de l'algorithme consiste à générer une première population t_0 initialisée avec des individus contenant des valeurs aléatoires pour leurs gènes (comprises entre 1 et N).

4.9.3.3.2. L'évaluation et la fonction d'adaptation

Pour chaque individu de la population, nous évaluons sa *fonction d'adaptation* pour le problème f_i. Le critère d'adaptation est défini par la maximisation de la distance entre chaque couple de l'ensemble des positions $\{p_0, p_1, \ldots, p_k\}$. Dans le cas où k=3, cela revient à maximiser l'aire du triangle formé par les 3 positions. Nous évaluons également la meilleure solution f^* et la moyenne de l'ensemble des solutions de la population $\overline{f}$.

4.9.3.3.3. La sélection

Nous réalisons une sélection des individus à reproduire par la méthode de la *sélection par roulette*. Les parents sont sélectionnés en fonction de leur valeur d'adaptation. Meilleure est la solution (ou le chromosome), plus sa probabilité d'être choisie est grande.

4.9.3.3.4. La mutation

La mutation modifie aléatoirement la valeur d'un chromosome par l'inversion d'un bit dans la représentation binaire. Elle permet d'éviter que l'algorithme ne converge vers des extremums locaux et permet de créer des individus originaux. Elle est réalisée suivant une probabilité donnée assez faible (de l'ordre de 3%).

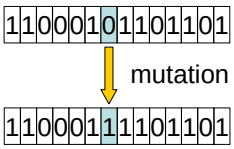


Figure 90 : Opérateur de mutation

4.9.3.3.5. Le croisement

Les chromosomes des individus sélectionnés de la population *t* sont alors recombinés pour former une nouvelle génération t_{+1}. A partir de deux individus (*parents*), l'opérateur de *croisement* sélectionne aléatoirement un point dans les chromosomes (de la représentation binaire), pour donner naissance à deux nouveaux individus (*enfants*) avec une partie des gènes de chaque parent. Ils héritent donc de leurs parents de certaines caractéristiques d'adaptation au problème.

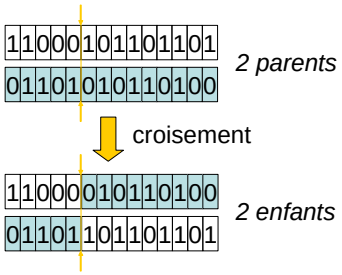


Figure 91 : Opérateur de croisement

4.9.3.3.6. Le critère d'arrêt

L'algorithme va réitérer la reproduction pour donner une nouvelle population t_{+1} à partir de la population *t*. On stoppera cette reproduction en fonction d'un critère d'arrêt, dans notre cas un nombre fixe de générations égal à 100 (Figure 92), assurant ainsi un temps constant pour le calcul. Cette valeur est déterminée selon la puissance de calcul disponible, le nombre de variables considérées et la fonction d'adaptation (Magnin, 2006). Nous choisirons alors le meilleur individu de la population, comme la solution résultante.

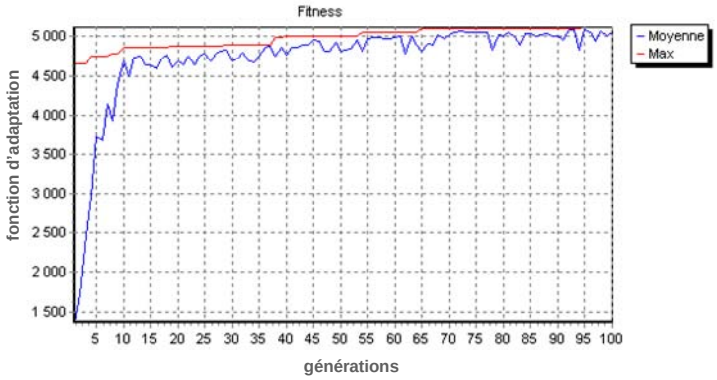


Figure 92 : Evolution de la population (moyenne et maximum de la fonction d'adaptation)

4.9.3.3.7. Codage Gray et Distance de Hamming

Un inconvénient majeur du codage binaire est que deux solutions proches dans l'espace de recherche des variables de la solution, ne sont pas nécessairement proches dans leur codage binaire (Whitley, 2001). Par exemple, en codage binaire standard, deux valeurs proches comme 3 et 4 sont représentées respectivement par les chaînes binaires 0011 et 0100 (Figure 93). Dans ce cas, trois bits sur quatre sont différents, ce qui se traduit par une *distance de Hamming* de 3. La *distance de Hamming* entre deux chaînes binaires est le nombre de bits qui diffère de l'une à l'autre.
Pour remédier à cela, on utilise généralement le codage Gray qui possède une *distance de Hamming* de 1. Pour notre exemple, les valeurs 3 et 4 sont alors codées par les deux chaînes 0010 et 0110, avec une *distance de Hamming* de 1. Ce codage a montré qu'il améliorait les résultats pour les algorithmes génétiques (Whitley, 2005).

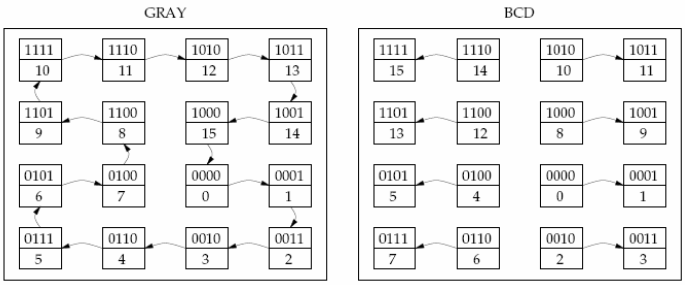


Figure 93 : Codage Gray et Codage Binaire Standard (Whitley, 2001)

4.9.3.4. Les résultats

La Figure 94 illustre les résultats obtenus sur un ensemble de 16 polygones. Les solutions issues de notre méthode correspondent exactement aux solutions optimales (issues de la méthode *brute-force*[2]) sauf pour un cas où la solution trouvée est proche de la solution idéale (voir Figure 94j, solution *brute-force* en bleue et solution de notre algorithme en rouge).

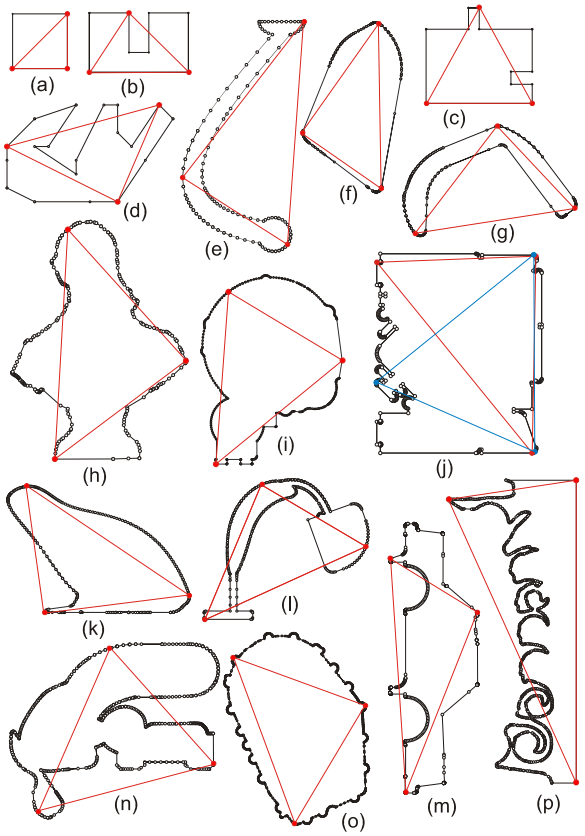


Figure 94 : Résultats par la méthode de localisation sur k-gon (k=3) pour 16 polygones

On peut comparer les temps de calcul par rapport à une approche *brute-force* (Tableau 18). Les résultats montrent que si le nombre d'éléments *N* est grand, les temps de calcul deviennent alors très importants pour une méthode *brute-force*. On notera que notre algorithme, lui a un temps de calcul quasiment constant (fixé par le nombre de générations).

[2] Méthode *brute-force* ou méthode de recherche exhaustive : technique qui consiste à énumérer toutes les solutions possibles et retenir la meilleure solution.

	Modèle	k	N	Algo Brute Force		Algo AG	
				Aire (mm^2)	temps (s)	Aire (mm^2)	temps (s)
a	Carre	3	4	5000	0,00	5000	0,08
b	Forme_U	3	8	3000	0,00	3000	0,08
c	Test2	3	12	4500	0,00	4500	1,31
d	Graham	3	19	34	0,00	34	0,08
e	Pied	3	117	390,063	0,17	390,063	0,09
f	Massive	3	178	4705,79	0,64	4702,62	1,75
g	Tordue	3	232	13277	1,42	13277	0,13
h	Ferry	3	259	5321,19	2,00	5321,19	0,11
i	Carter 2	3	305	58375,9	3,28	58375,9	0,13
j	Plaque	3	311	49580,2	3,47	47941,4	0,09
k	Grenouille	3	315	120,34	3,61	120,34	0,11
l	Tubulure	3	384	12637,9	6,58	12636,8	0,11
m	Car	3	557	20774,8	20,13	20774,7	0,11
n	Turbo	3	573	7069,47	21,64	7069,47	0,09
o	Carter	3	955	50191,6	101,59	50189,4	1,34
p	Lion	3	1363	52401	295,97	52401	0,08

Tableau 18 : Tableau de résultats pour deux méthodes : algorithme brute-force et notre algorithme génétique (sur Intel Xeon CPU 3.40Ghz, 2 Go de RAM)

La complexité pour la méthode brute-force revient à la combinaison de k éléments d'un ensemble de N éléments soit $C_N^k = \frac{N!}{k! \times (N-k)!}$.

Pour k=3, $C_N^3 = \frac{N \times (N-1) \times (N-2)}{6}$, soit une complexité $\Theta(N^3)$.

Si le nombre d'entités à placer k est supérieur à 3, les temps de calcul de la méthode brute-force augmentent très vite. Avec notre algorithme, les temps de calcul restent constants, quelles que soient les valeurs k et N. En effet, ils sont proportionnels au temps de calcul de la fonction d'adaptation et à la taille de la population. Notre méthode devient encore plus avantageuse comme le montre le Tableau 19.

Modèle	k	N	Algo Brute Force		Algo AG	
			fitness	temps (s)	fitness	temps (s)
Pied 2	3	75	6241,02	0,05	6241,02	1,55
Pied 2	4	75	8047,53	1,69	7508,96	0,14
Pied 2	5	75	8947,61	33,09	8947,61	0,14
Pied 2	6	75	9316,12	594,94	9284,67	0,17

Tableau 19 : Comparaison suivant le nombre d'entités k

4.9.3.5. Implantation

La Figure 95 illustre l'utilisation de notre algorithme pour générer automatiquement entre deux couches les entités d'assemblage par imbrication. Celles-ci sont ensuite intégrées à la fabrication des couches.

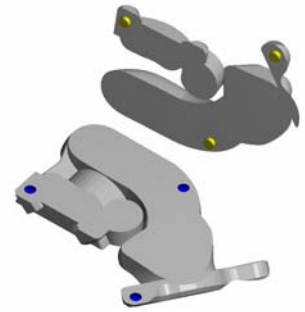


Figure 95 : Illustration de l'algorithme de placement automatique d'entités d'assemblage (plots en jaune et logements en bleu)

4.9.3.6. Conclusion

Nous avons mis en œuvre un algorithme génétique pour la mise en place d'éléments d'assemblage. Nous avons démontré sa rapidité et sa capacité à gérer un nombre important d'entités à placer quelle que soit la taille du polygone initial. Nous pouvons cependant noter les avantages et les inconvénients de cet algorithme :

Les avantages :

- Rapidité quelque soit le nombre d'entités k à placer
- Nombre d'entités quelconque au choix k
- Critère d'optimisation facilement modifiable

Les inconvénients :

- Minimum locaux
- Résultat pas répétable d'une fois à l'autre

4.10 Bilan des méthodes de localisation d'entités

On peut faire une comparaison des différentes méthodes que nous avons mises en œuvre suivant plusieurs critères :

- Les formes

Critère permettant d'évaluer si la méthode s'adapte quelque soit la forme sur laquelle on place les entités

- Paramétrage

La difficulté à paramétrer la méthode pour l'utilisateur ou le nombre de paramètres à choisir.

- Temps de calcul

Les temps de calcul nécessaires pour l'exécution des algorithmes.

- Zones non couvertes

La capacité d'un algorithme à ne pas laisser de zones sans entité (voir Figure 72 page 85).

- Beaucoup d'entités

Certains algorithmes placent un nombre d'entités trop important, celles-ci étant inutiles voire rendent le montage plus difficile à cause de la précision de positionnement nécessaire au moment de l'assemblage.

- Adaptées à k entités

Des méthodes sont plus ou moins adaptées si l'on définit au départ un nombre fixe k d'entités à placer.

- Solution optimale

Certains algorithmes parviennent à tendre vers une solution optimale ou peuvent avoir tendance à dériver vers des minimums locaux de leur fonction d'optimisation (voir § 4.9.3.4 Les résultats, page 101).

- Chevauchement d'entités

Les entités peuvent se chevaucher ou au contraire respecter une distance minimum entre elles.

Méthodes	Quelque soit les formes	Paramétrage difficile	Temps de calcul	Zones non couvertes	Beaucoup d'entités	Adaptée à k entités fixe	Solution optimale	Chevauchement / Distance entité maîtrisée	BILAN
Grille	---	-[1]	-[2]	---	---	---	*NA*	++	--
Discrétisation 1D	---	++	+++	+	--	++	*NA*	--	-
Forces de répulsion	+	--[3]	---	--	++	+++	--	+++	-
Rotating Calipers	--	++	++	--	++	+[4]	+++	+++	+
k-gon maximum et AG	++	++	+++	--	++	+++	--	+++	++

Tableau 20 : Bilan des méthodes de localisation

Légende :
Evaluation de la méthode par rapport au critère :
--- : très mauvaise / -- : mauvaise / - : insuffisante / + :suffisante / ++ : bonne / +++ : très bonne

(1) Position et pas de la grille
(2) Si pièce grande ou pas faible
(3) Positions de départ
(4) Seulement si k=2
NA : critère pas applicable à cette méthode

La dernière méthode implantée de maximisation de distances par algorithme génétique ressort comme la plus adaptée à notre problématique suivant nos critères de sélection (Tableau 20). Cependant on remarque que, comme les autres méthodes, elle conserve le défaut de laisser des zones sans entités d'assemblage pouvant alors poser des problèmes de résistance mécanique sur nos pièces réassemblées.

4.11 Conclusion

Nous avons présenté diverses approches de localisation de nos entités d'assemblage au travers d'algorithmes de placement par grilles, par forces de répulsion ou par un algorithme génétique. Nous avons analysé leurs avantages et inconvénients pour notre application et nous avons remarqué leur faiblesse notamment en ce qui concerne les zones non couvertes par les entités, laissant des parties non assemblées risquant de se désolidariser. C'est pourquoi nous proposons, dans le chapitre suivant, une méthode plus avancée qui va tenir compte des géométries de la pièce en utilisant le squelette interne de celle-ci.

5. Méthode de localisation automatique d'entités par squelettisation

5.1 PRINCIPE

5.2 L'ALGORITHME
5.2.1 L'algorithme principal
5.2.2 Construction du squelette
5.2.3 Simplification du squelette
5.2.4 Discrétisation des branches
5.2.5 Placement des entités
5.2.6 Modification de l'incidence des sommets proches
5.2.7 Suppression des sommets d'incidence trop faible
5.2.8 Fin de l'algorithme

5.3 EVALUATION DE L'ALGORITHME
5.3.1 Comparaison méthode grille
5.3.2 Variantes

5.4 RESULTATS

5.5 IMPLEMENTATION DU PROTOTYPE LOGICIEL

5.6 CONCLUSION
5.6.1 Extension à d'autres applications

Nous développons ici un algorithme original de localisation automatique des entités par squelettisation permettant l'optimisation du placement des entités par rapport à la géométrie des couches. Nous présentons en détail l'implantation de l'algorithme, puis nous l'évaluons par comparaison à une localisation par grille et nous exposons ses résultats sur un ensemble varié de pièces.

5.1 Principe

Une entité assure le maintien sur une partie de la pièce (zone de maintien). On place une première entité sur la pièce. Ensuite on place une nouvelle entité dans les zones restantes non couvertes par la première entité. On renouvelle cette opération jusqu'à que l'on ait couvert la totalité de la pièce avec nos entités. Pour choisir l'endroit pour placer une entité, on utilise le *squelette* de l'inter-strate.

«*Le squelette d'un objet est une figure mince centrée dans la forme et qui en résume l'aspect. Il est utile en analyse d'images pour la description et la reconnaissance de formes, la quantification, la mise en correspondance etc…*»[3]
Il nous fournit une indication sur l'épaisseur locale de matière de la strate.

5.2 L'algorithme

5.2.1 L'algorithme principal

Nous proposons de réaliser cette localisation grâce à un squelette de notre surface S_{IS} (Tableau 21).
La méthode, s'appuyant sur le squelette de l'inter-strate, tient compte de sa forme, de la quantité de matière entre une position et les frontières de la surface S_{IS}.
Chaque entité, placée sur le squelette, assure le maintien d'une partie de la pièce à assembler (zone de maintien). On peut ainsi répartir au mieux les entités sur l'ensemble de la surface pour assurer un maintien global de la pièce en s'assurant que le nombre d'entités soit optimisé (pas plus d'entités que nécessaire).
On tient compte également d'une distance minimum E_p entre chaque entité d'assemblage.

1. Construction du squelette de la surface S_{IS} (Voronoi de segments)
2. Simplification du squelette
3. Discrétisation des branches du squelette
4. Placement d'une entité F_i sur le squelette simplifié en fonction de la distance ρ au bord de la surface S_{IS}
5. Modification de la valeur de ρ après placement de F_i (Figure 97)
6. Elimination des positions chevauchant le bord de la surface ou les autres entités déjà placées
7. Fin de l'algorithme si l'espace est insuffisant pour placer une entité, sinon placement d'une autre entité (étape 4).

Tableau 21 : Algorithme de localisation par squelettisation

[3] Extrait de Attali, D. (1995), "*Squelettes et Graphes de Voronoi 2D et 3D*", PhD thesis, Informatique, Joseph Fourier - Grenoble I, Grenoble, 175 pages.

5.2.2 Construction du squelette

Nous utilisons le *diagramme de Voronoi* généralisé des éléments frontières (Figure 96) ; dans notre cas il s'agit d'un diagramme de Voronoi de segments (O'Rourke, 1998). Cette structure représente un squelette interne du polygone. Il est également appelé *axe médian* (Aurenhammer, 1991, Memari, 2002) lorsqu'il ne représente pas les branches reliées aux angles rentrants.

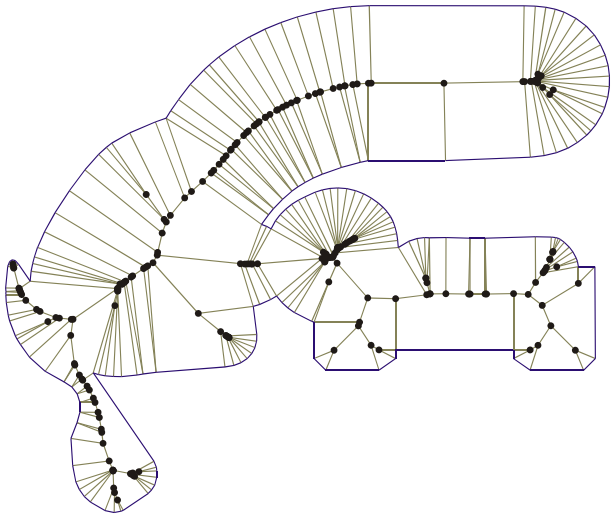


Figure 96 : Diagramme de Voronoi généralisé

La frontière de la surface *S* est un polygone *P* constitué de *n* segments de droite.
Le *diagramme de Voronoi VD(P)* du polygone *P* est une partition en cellules, où chaque cellule est associée à un segment du polygone *P* (ou à un sommet rentrant). Cette cellule représente le voisinage le plus proche du segment. Par définition, la frontière commune à deux cellules adjacentes est une courbe équidistante aux deux segments dont sont issues les deux cellules et se nomme *bissectrice*. Toutes les bissectrices sont des segments de droites ou des arcs de paraboles pour les sommets rentrants du polygone. Les points partagés par trois bissectrices ou plus sont appelés *sommets* du diagramme de Voronoi.

A chaque point *v* de *VD(P)* correspond une valeur égale à la distance euclidienne minimale entre le squelette et le polygone *P*, représentant le rayon du disque maximal centré en *v* et contenu dans *P* (Figure 97). Nous l'appellerons *incidence* et la noterons $\rho(v)$. Cette incidence peut être considérée comme l'*épaisseur locale* de la pièce (Équation 4).

$$\rho(v) = \min\left\{\delta(v, p) \,\middle|\, p \in P\right\}$$

Équation 4 : Incidence

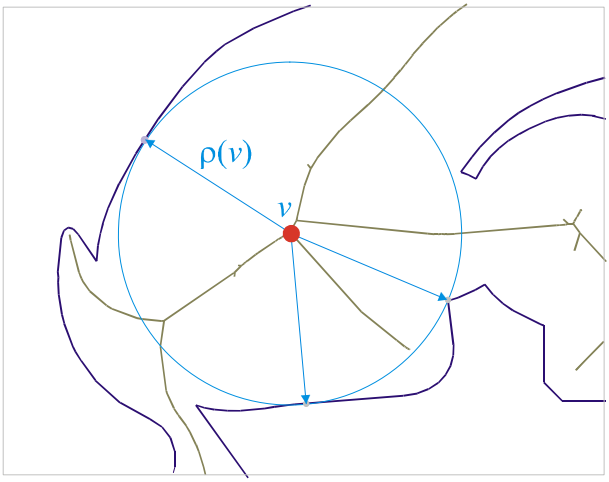


Figure 97 : Rayon du disque maximal *ρ(v)*

L'algorithme de construction du diagramme de Voronoi, que nous avons choisi, est un algorithme de propagation de front d'onde décrit par (Held, 1998).
Il est réalisé en calculant les bissectrices des éléments du polygone (Figure 98a), puis par phases successives, le calcul de leurs intersections, en suivant l'ordre d'incidence des sommets et en créant de nouvelles bissectrices issues de celles-ci (Figure 98b à Figure 98f).

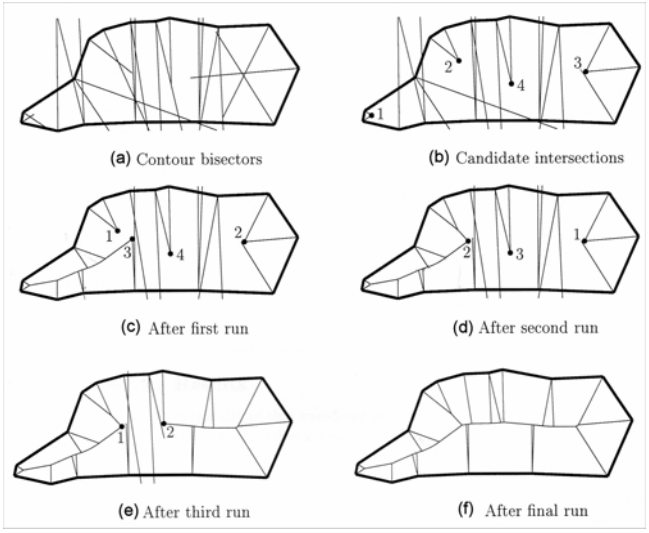


Figure 98 : Algorithme de construction du diagramme de Voronoi par l'algorithme de propagation du front d'onde (Held, 1998)

5.2.3 Simplification du squelette

La simplification du squelette est nécessaire étant donné que de petites perturbations non significatives sur le polygone génèrent des branches inutiles. Nous utilisons la méthode d'*élagage* proposée par Attali (Attali, 1995) qui

consiste à supprimer les branches extrémités du Voronoi non significatives suivant deux critères complémentaires. Le premier critère est la distance du sommet de Voronoi *v* par rapport au polygone $\rho(v)$, le second critère est le critère d'*angle bissecteur* qui représente l'angle formé par le sommet de Voronoi *v* et les deux points de contacts p_1 et p_2 du polygone avec le cercle maximal centré en *v*. Nous le noterons $\alpha(v)$ (Figure 99).

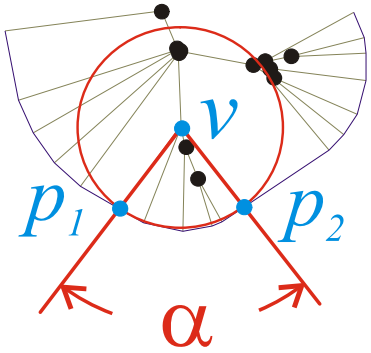
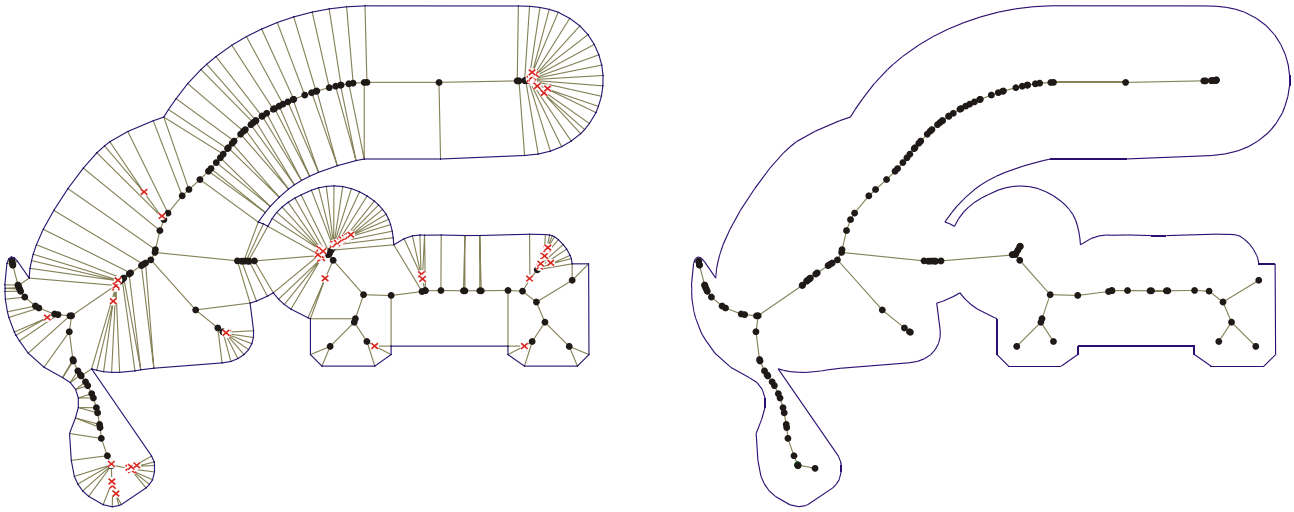


Figure 99 : Angle bissecteur $\alpha(v)$

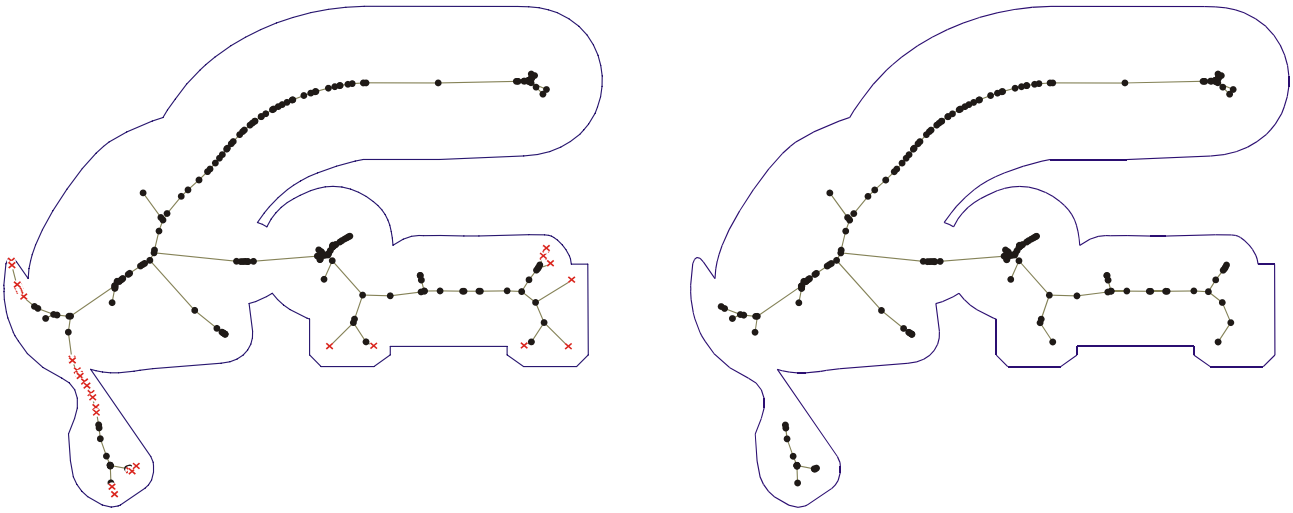
Ainsi nous supprimons les sommets *v* où $\alpha(v)$ est inférieur à un angle seuil α_{min} (Figure 100) ou si $\rho(v)$ est inférieure à une distance seuil ρ_{min} (Figure 101).
Nous fixerons α_{min} = 0.4 π (voir (Attali, 1995)) et $\rho_{min} = D_p$ (diamètre de l'entité).



(a) (b)

× *sommets supprimés*

Figure 100 : Simplification sur l'angle bissecteur (α_{min} =0.4 π)
(a) avant simplification / (b) après simplification



(a) (b)

× *sommets supprimés*

Figure 101 : Simplification sur l'incidence ($\rho_{min} = D_p = 6$; $E_p = 10$; $\alpha_{min} = 0.4\ \pi$)
(a) avant simplification / (b) après simplification

5.2.4 Discrétisation des branches

Nous pouvons placer chaque point sur le squelette, c'est à dire sur les bissectrices ou les sommets du diagramme de Voronoi. Nous proposons, pour restreindre le domaine de recherche des positions, de placer les entités uniquement sur les sommets de Voronoi. Cependant certaines branches du Voronoi peuvent être de longueur importante empêchant le placement d'entités dans ces zones (Figure 102a). Pour remédier à cela, nous choisissons de discrétiser les bissectrices de longueur supérieure à l_{max}, et de créer de nouveaux sommets où pourront être placées des entités (Figure 102b). A chacun de ces sommets sera affectée une incidence calculée en fonction des incidences des sommets aux extrémités de la bissectrice. L'écart minimum entre deux entités étant fixé à E_p, comme deux positions sur le squelette ne doivent pas être distantes de plus de la moitié de E_p, nous fixons l_{max} égale à $E_p/3$.

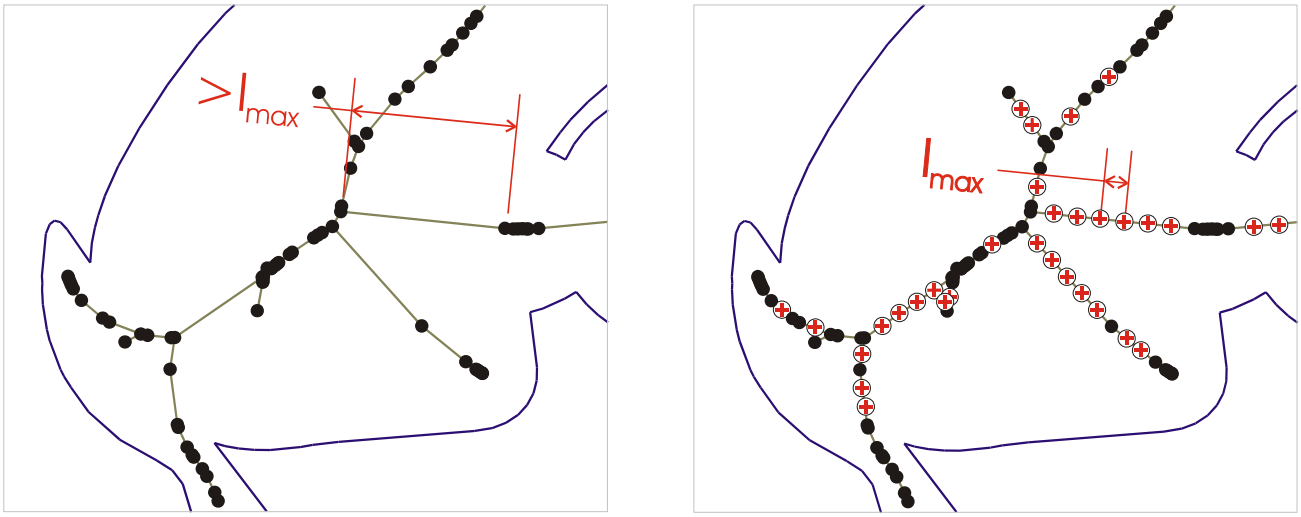


Figure 102 : Discrétisation des branches (E_p = 10 ; l_{max} = E_p/3)

5.2.5 Placement des entités

Les sommets de Voronoi sont ensuite ordonnés suivant leur incidence décroissante. Nous choisissons le sommet de plus grande incidence pour placer une entité, c'est à dire le point le plus éloigné du contour.

5.2.6 Modification de l'incidence des sommets proches

Le placement d'une entité (k) sur un sommet de Voronoi v_k change alors l'incidence des sommets (v_i) proches de sa position suivant un critère de proximité λ_i. Ce critère est calculé en fonction du diamètre de l'entité D_p, de la distance Euclidienne entre le sommet de l'entité v_k et le sommet v_i, notée $\delta(v_k, v_i)$ et de l'écart minimum entre deux entités E_p.
L'incidence ρ_k est recalculée pour chaque sommet v_i (Figure 103) suivant la formule suivante :

$$\lambda_i = \delta(v_k, v_i) - D_p - E_p$$
$$\rho_k(v_i) = \min(\rho_{k-1}(v_i), \lambda_i)$$

avec k étant la $k^{ième}$ entité placée

Équation 5: Calcul de la nouvelle incidence ρ_k d'un sommet v_i

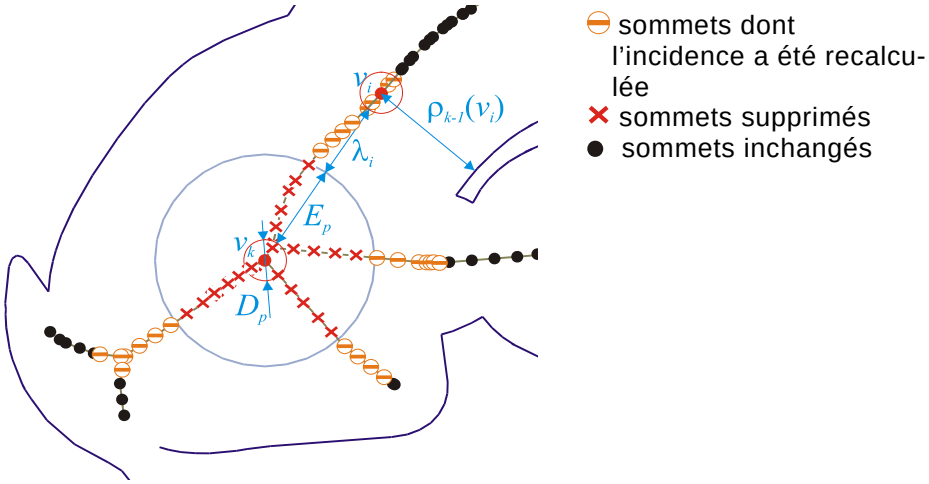


Figure 103 : Modification de l'incidence (D_p = 6 ; E_p = 10)

5.2.7 Suppression des sommets d'incidence trop faible

Pour qu'une entité puisse être placée à l'intérieur de la surface et qu'elle ne chevauche pas une autre entité, son centre doit être distant au minimum d'un diamètre D_p du bord de la surface et d'une autre entité. Cela est équivalent à choisir un sommet de Voronoi uniquement si son incidence est supérieure au diamètre de l'entité ($\rho(v) > D_p$). Nous supprimons donc tous les sommets dont l'incidence est inférieure au diamètre de l'entité.

5.2.8 Fin de l'algorithme

L'algorithme vérifie s'il reste encore des positions où l'on peut placer une autre entité. Dans le cas positif, nous bouclons sur l'étape 4 (5.2.5 Placement des entités), pour placer à nouveau une entité, sinon l'algorithme s'arrête (Figure 104).

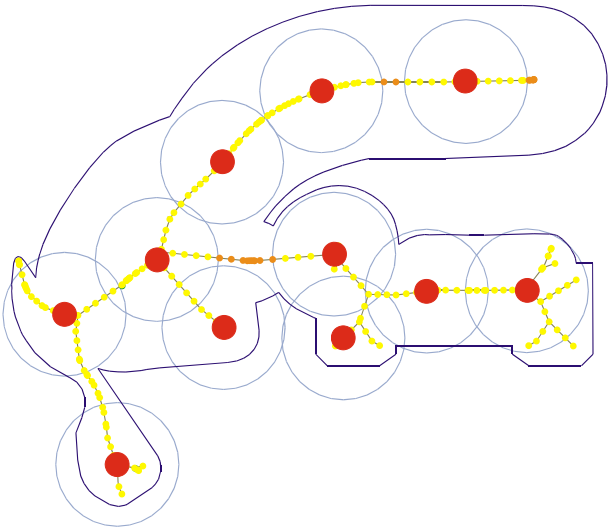


Figure 104 : Résultat du placement des entités
(D_p = 6 ; N_p = illimité ; E_p = 10 ; α_{min} = 0.4 π ; incidence maxi)

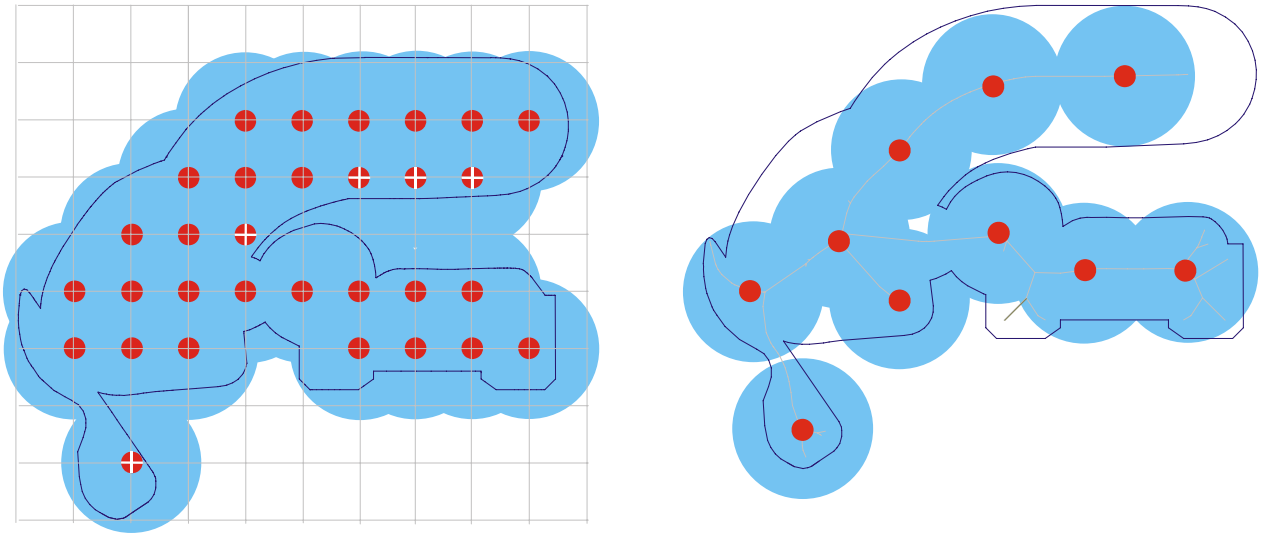
5.3 Evaluation de l'algorithme

5.3.1 Comparaison méthode grille

On peut analyser le résultat de l'algorithme en le comparant à un placement réalisé sur une grille d'un pas égal à l'écart minimum entre plot E_p plus un diametre D_p (Figure 105).

Si nous considèrons qu'une entité assure le maintien sur un rayon R égal au pas de la grille autour du plot, le placement par grille réalise une couverture complète de la pièce soit 100% contre 85% pour l'algorithme de placement par squelette. Par contre le nombre d'entité est de 10 entités pour notre algorithme contre 31 entités pour la grille. La répartition est donc nettement plus optimisée.

De plus, lors du placement sur une grille, certaines entités sont placées très proche du bord de la surface (entités barrées d'une croix blanche sur la Figure 105a). Cela pose un problème de fragilité dans la pièce par manque de matière à proximité de ces entités.

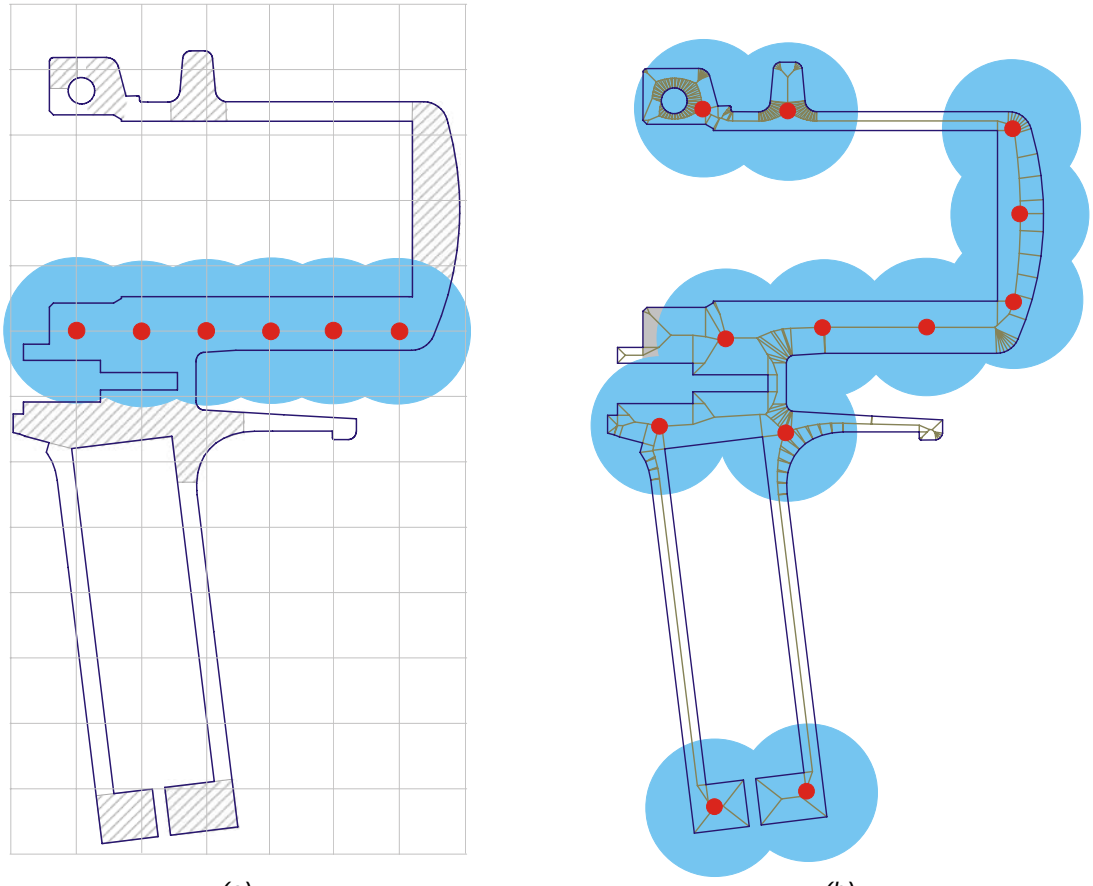


(a)
Placement par grille, 31 entités, Couverture à 100 %

(b)
Placement par squelette, 10 entités, Couverture à 85 %

Figure 105 : Comparaison placement par grille (a) et par squelette (b)

Les pièces à parois fines ou à géométrie plus complexes montrent encore plus les avantages de notre algorithme (Figure 106). Avec le placement par grille, seules 6 entités sont placées mais la zone de couverture est de seulement 30% contre 95 % pour notre algorithme, si on exclut les zones où la matière est insuffisante pour placer une entité. Des parties complètes n'ont pas d'entités car elles se trouvent en dehors du pas de la grille (zones hachurées sur la Figure 106a).



(a)
Placement par grille,
*6 entités, Couverture à 30 %**

(b)
Placement par squelette,
*12 entités, Couverture à 95 %**

** si on exclut les zones où une entité ne peut être placée car il n'y a pas suffisamment de matière*

Figure 106 : Comparaison placement par grille (a) et par squelette (b) sur pièces à parois fines

5.3.2 Variantes

Plusieurs variantes sont possibles pour cet algorithme :

5.3.2.1. Choix de la plus petite ou de la plus grande incidence

Lors du placement de l'entité (étape 4, voir 5.2.5 Placement des entités), nous choisissons le sommet d'incidence maximum. On peut faire le choix de l'incidence minimum. Dans ce cas, nous placerons les entités dans les zones les plus proches de la frontière de la surface S (Figure 107). Cette variante permet de privilégier le placement des entités aux extrémités du squelette plutôt qu'au centre de la matière.

5.3.2.2. Nombre fixe d'entités à placer

Un des intérêts de cet algorithme est que l'on peut choisir de limiter au départ le nombre d'entités à placer N_p. Nous stopperons dans ce cas l'algorithme, à l'étape 7, lorsque ce nombre sera atteint (Figure 108).

5.3.2.3. Diamètre de l'entité variable

Le diamètre des entités à placer est fixé au départ de l'algorithme D_p. On peut également choisir de faire varier ce diamètre, de manière décroissante, au cours de l'algorithme (Figure 109). Un diamètre minimum sera fixé par le procédé de fabrication (par exemple le diamètre de l'outil en fraisage). Cela permet de réduire la taille des entités si la surface S est trop faible. On peut d'ailleurs par notre méthode déterminer la taille maximum de l'entité que l'on pourra placer sur la surface. Il suffit de rechercher l'incidence maximum de notre squelette pour connaître le diamètre maximum de cette entité.

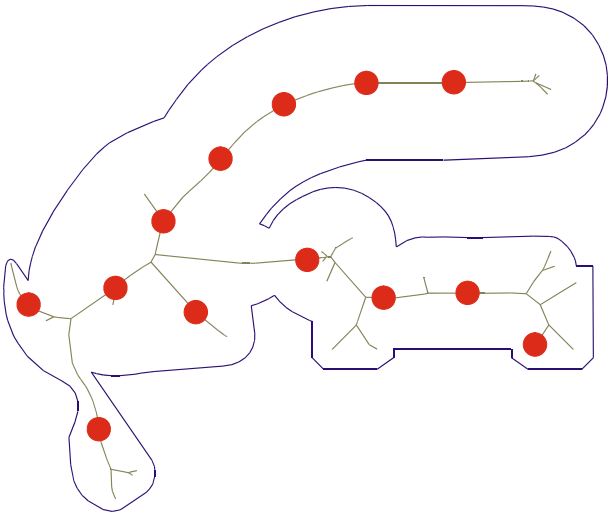


Figure 107 : Variante 1 (plus petite incidence)
Dp = 6 ; Np = illimité ; Ep = 10 ; ***plus petite incidence***

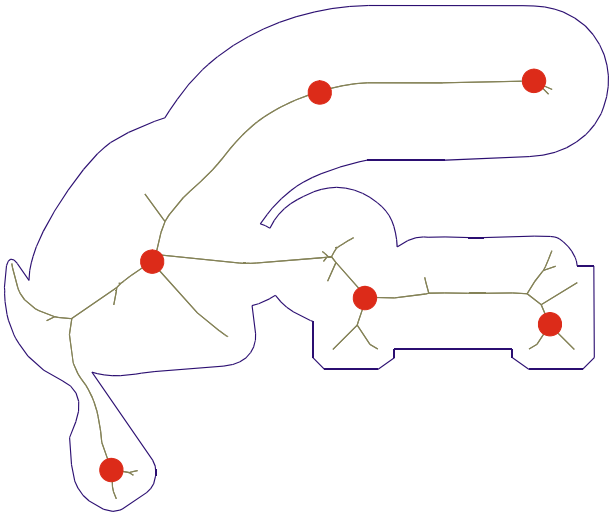


Figure 108 : Variante 2 (Nombre limité de plots)
Dp = 6 ; ***Np = 6*** *; Ep = 10*

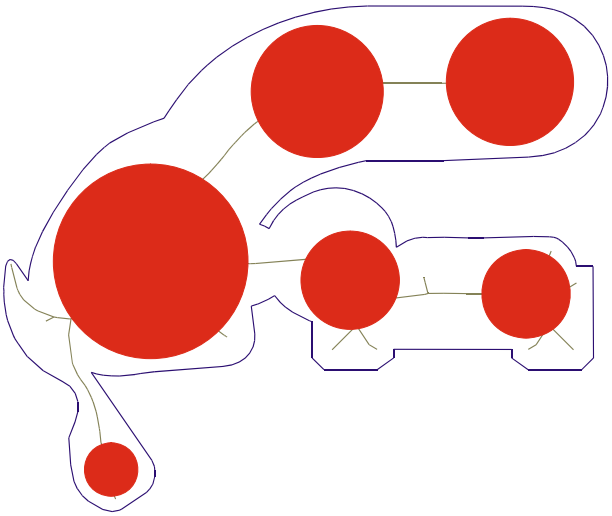
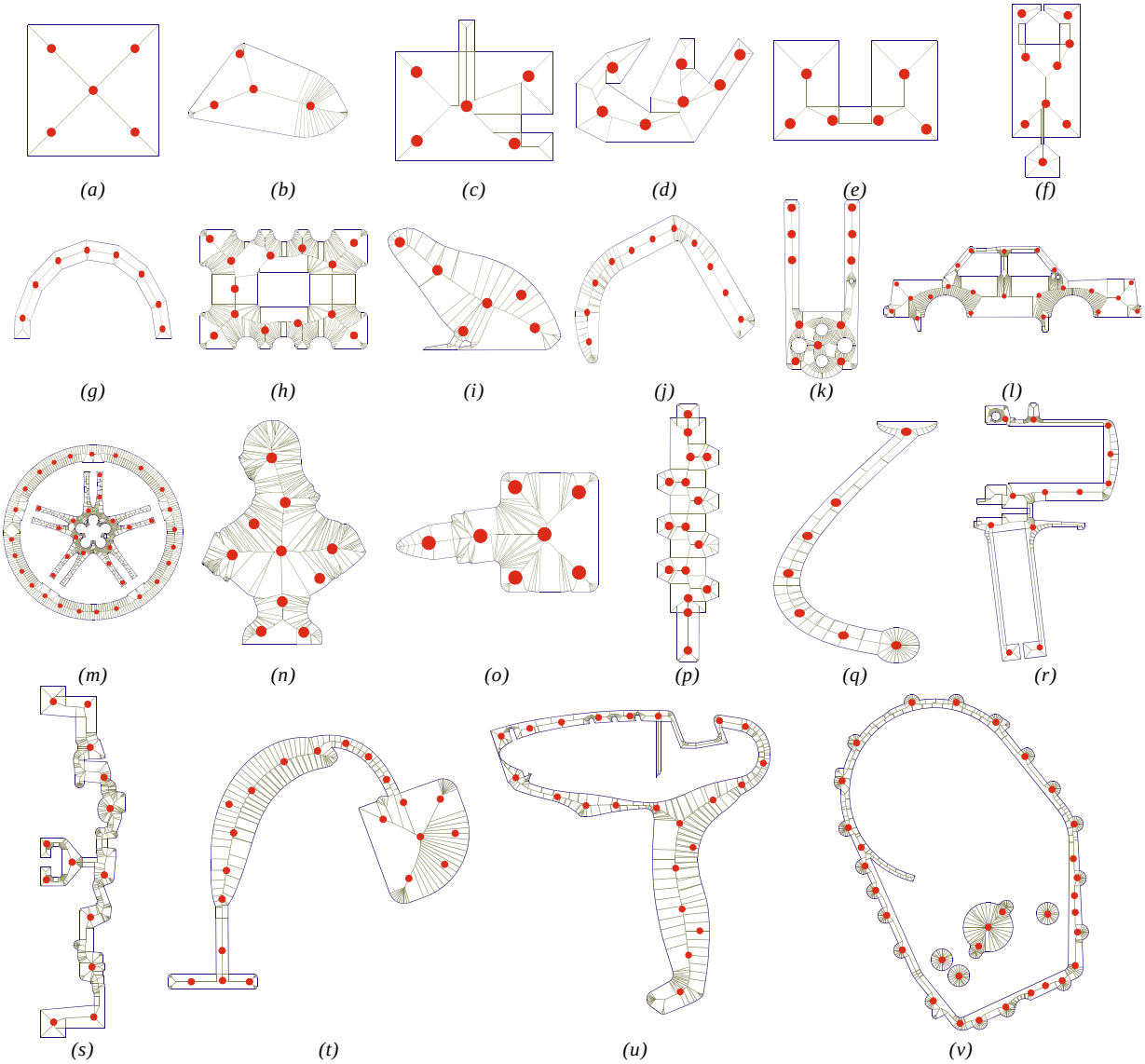
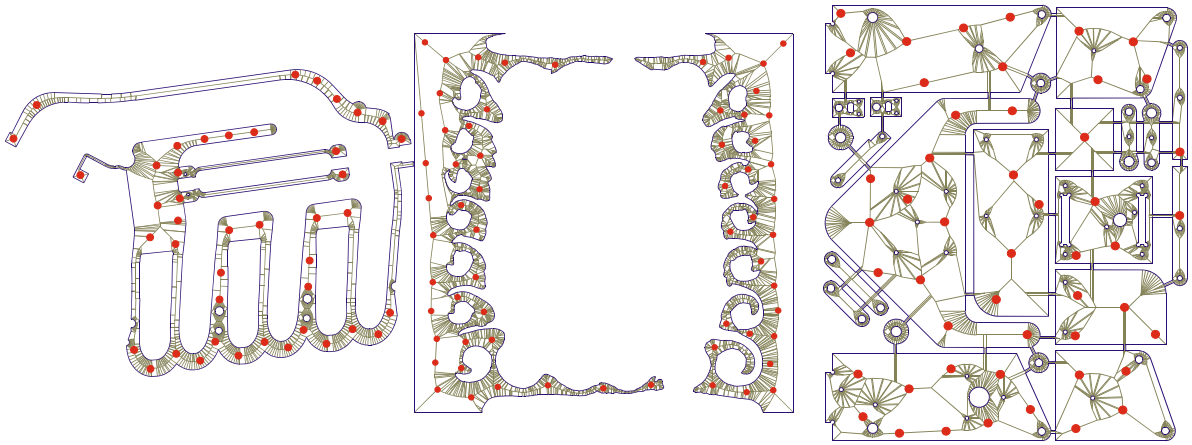


Figure 109 : Variante 3 (Diamètre des plots variable)
Dp = variable *(mini=6) ; Np = illimité ; Ep = 10*

5.4 Résultats

La Figure 110 présente les résultats de l'algorithme de localisation par squelette d'entités pour un ensemble de 25 surfaces. On notera que l'algorithme réussit à répartir très régulièrement les entités quelque soit la forme géométrique de la pièce. La couverture des formes est complète lorsqu'il y a suffisamment de matière pour placer une entité et le nombre d'entité est optimisé. Quelque soit la géométrie, le placement ne laisse aucune zone de la pièce sans entité (voir le problème décrit sur la Figure 106*a*). De plus l'algorithme s'adapte quelque soit la complexité de la surface : formes simples (Figure 110 *a* à *g*), formes 'massives' (Figure 110 *b*,*i*,*n*), formes à parois fines (Figure 110 *r*,*u*,*v*,*w*) et formes avec des trous dans la surface (Figure 110 *h*,*k*,*x*).





(w) *(x)* *(y)*

Figure 110 : Algorithme de placement d'entités appliqué à différentes pièces (D_p = 6 ; N_p = illimité ; E_p = 10 ; α_{min} = 0.4 π ; incidence maxi)

Le Tableau 22 donne les temps d'exécution pour chaque surface, N étant le nombre de points du polygone. On remarque que les temps de calcul s'échelonnent de quelques centièmes à un peu plus d'une seconde pour les plus grosses pièces. Le temps est directement lié au nombre d'élément du polygone (N). En effet la complexité de l'algorithme est déterminée par l'algorithme de construction du squelette, qui est de complexité *O(N log N) (Held, 1998).*

Algo Squelettisation			
	Modèle	N	temps (s)
a	Carre	4	< 0,01
b	Massive	178	0,016
c	Test2	12	< 0,01
d	Graham	19	< 0,01
e	Forme_U	8	< 0,01
f	Etroit_Int_Ext	20	< 0,01
g	Surface_U	18	0,016
h	Case_Ih	452	0,125
i	Grenouille	315	0,015
j	Tordue	232	< 0,01
k	Eurocast	218	0,094
l	Car	557	0,109
m	Jante	1087	0,281
n	Ferry	259	0,047
o	Roulant2	93	0,016
p	Vis_ss_fin	72	0,015
q	Pied	117	0,015
r	Crosse	157	0,031
s	Psa	324	0,062
t	Tubulure_ress	178	0,031
u	Sofragraf	289	0,063
v	Carter	955	0,110
w	Intake	1115	0,344
x	Lion2	2476	1,094
y	Plaque_a_dec	2080	1,67

Tableau 22 : Temps de l'algorithme par squlettisation (sur Intel Xeon CPU 3.40Ghz, 2 Go de RAM)

5.5 Implémentation du prototype logiciel

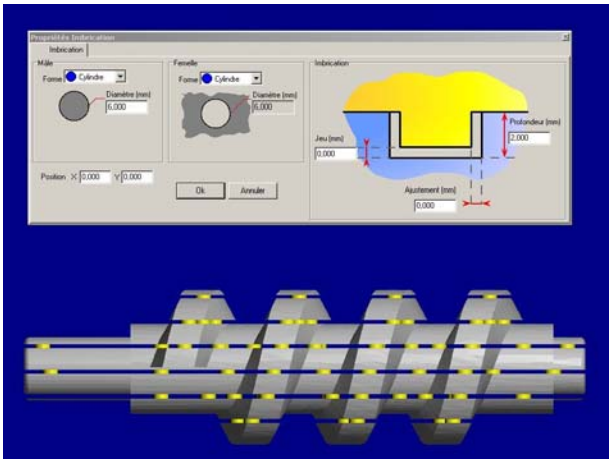


Figure 111 : Implémentation logicielle de l'algorithme

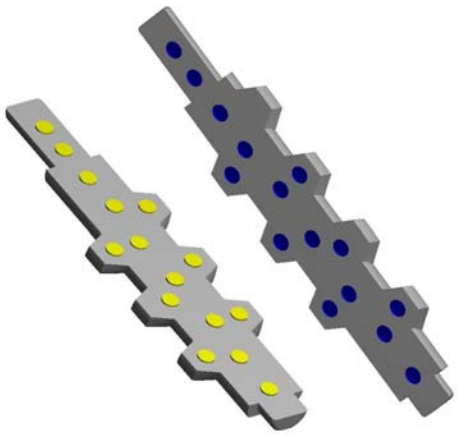
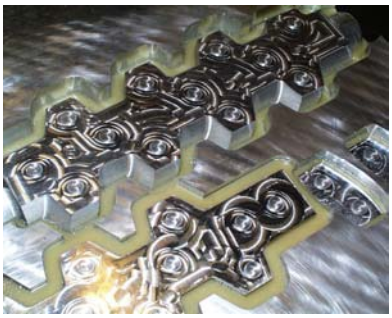


Figure 112 : Deux strates et leurs plots et logements associés (localisation par squelettisation)

Une application prototype a été développée à partir de notre algorithme en utilisant le langage objet C++ et le logiciel Stratoconcept (Stratoconcept, 2006). A partir d'un modèle 3D au format STL, le logiciel calcule le tranchage et génère les parcours d'usinage de chaque tranche.

Après l'étape de tranchage, pour chaque inter-strate (interface entre les couches) nous calculons la surface de contact et l'algorithme est appliqué suivant les paramètres définis par l'utilisateur (diamètre et formes des plots, jeu et ajustement). La génération des entités d'assemblage (plots et logements) est ainsi automatiquement réalisée pour l'ensemble des strates (Figure 111 et Figure 112).

Les strates sont ensuite usinées par micro-fraisage rapide. Les trajectoires d'outil pour la réalisation des plots et logements sont intégrées lors de cet usinage (Figure 113).



(a) Usinage des strates avec les plots et les logements



(b) Montage des strates



(c) Pièce assemblée

Figure 113 : Réalisation au CIRTES d'une pièce en Stratoconception avec des entités d'assemblage intégrées (localisation par squelettisation)

5.6 Conclusion

Nous avons pu montrer l'intérêt de notre algorithme de génération automatique d'entités d'assemblage en le comparant à un placement réalisé sur une grille et valider sa mise en œuvre pour notre application de prototypage rapide.
Plusieurs améliorations de notre algorithme de localisation sont envisagées comme la distinction des sommets critiques du squelette (sommets simples, multiples, terminaux) (Attali, 2006 à paraitre) pour privilégier le placement d'entités aux lieux importants.

L'algorithme que nous avons présenté dans le cadre de l'assemblage en Stratoconception peut être adapté à d'autres applications.

5.6.1 Extension à d'autres applications

5.6.1.1. Décomposition avancée de modèles en CAO

La fabrication de pièces de grandes dimensions par les procédés d'usinage conventionnel ou par les procédés de prototypage rapide pose souvent le problème des capacités dimensionnelles trop faibles des machines. Pour résoudre ce problème, on décompose le modèle en plusieurs parties, de plus petites dimensions, afin de les réaliser individuellement (Houtmann, 2007a). Il convient ensuite de prévoir le réassemblage de ces différentes parties et, avant tout, de parvenir à positionner précisément celles-ci les unes par rapport aux autres. Pour atteindre cet objectif, on ajoute des entités de part et d'autre de la surface de décomposition, qui permettront le positionnement par imbrication. Cette opération, effectuée manuellement par l'opérateur CAO, peut parfois être difficile et longue à réaliser si le modèle initial est complexe. L'algorithme que nous avons présenté peut être utilisé dans ce cadre pour générer automatiquement des entités sur la surface de décomposition.

5.6.1.2. Moules à plusieurs parties

Des outillages à parties multiples, qui sont constitués de plus de deux parties, sont aujourd'hui utilisés pour produire des pièces à géométrie complexe. Des algorithmes permettent de générer ceux-ci automatiquement à partir du modèle de la pièce (Priyadarshi, 2004). Cependant il est nécessaire de réassembler les différentes parties. Nos travaux peuvent trouver une application pour la mise en place d'éléments de positionnement dans ces parties multiples.

5.6.1.3. Placement des vis sur un carter

Une autre application peut être la mise en place d'éléments vissés dans la conception CAO de carters.

6. Emboîtement complet

6.1 PROBLEMATIQUE ET CONTRAINTES

6.2 DIFFERENTES SOLUTIONS
6.2.1 Emboîture verticale simple
6.2.2 Emboîture verticale décalée
6.2.3 Emboîture verticale variable
6.2.4 Emboîture à inclinaison constante à 45°
6.2.5 Emboîture à inclinaison normale à la surface
6.2.6 Brevet d'invention
6.2.7 Emboîture par portions

6.3 PROFONDEUR DE L'EMBOITEMENT
6.3.1 Problématique
6.3.2 Algorithme de gestion de la profondeur

6.4 FORMES IMBRICABLES
6.4.1 Problématique
6.4.2 Formes complémentaires
6.4.3 Formes r-régulières
6.4.4 Notre algorithme
6.4.5 Reprise des zones non r-régulières du plot

6.5 EMBOITEMENT ET PERSPECTIVES POUR LES FONCTIONS AVANCEES

Ce chapitre présente une seconde approche différente : l'emboîtement complet. Une unique emboîture est générée à partir des contours de l'inter-strate. Plusieurs solutions d'emboîture sont envisagées avec la gestion de la profondeur de celle-ci. Elles induisent également la problématique des formes imbricables, c'est-à-dire la création de formes mâles et femelles complémentaires et réalisables par l'outil d'usinage (problème d'accessibilité de l'outil).

6.1 Problématique et contraintes

Les contraintes sont les mêmes que pour les plots et logements (voir §3.3 Les contraintes page 64), c'est à dire réaliser un positionnement précis des deux strates et assurer le maintien de celles-ci.
Pour la génération de l'emboîture, il faut tenir compte également de l'inclinaison des bords (dépouille ou contre-dépouille) et également de la problématique des flipots (2.2.5.4 Autres inconvénients page 39). De plus, il faut réaliser des formes correctement imbricables car les emboîtures étant de formes libres et étant donné l'accessibilité de l'outil, leur imbrication est plus complexe à réaliser que pour des formes simples d'entités (cercle, carré, triangle, etc.…) utilisées pour les plots et logements.

6.2 Différentes solutions

Nous proposons de réaliser une imbrication de l'ensemble de la strate supérieure dans la strate inférieure. Il n'y aura en quelque sorte qu'un seul plot qui aura pour forme le contour d'inter-strate C_{IS}. Dans ce cas, nous appellerons le plot et le logement associé l'*emboîture*. On peut envisager plusieurs solutions de génération pour la forme de l'emboîture.

6.2.1 Emboîture verticale simple

L'emboîture verticale simple consiste pour la partie mâle (le plot) à l'extrusion verticale du contour 2D d'inter-strate C_{IS} sur une hauteur de p et sur l'autre strate, pour la partie femelle, d'une poche formée par le même contour d'inter-strate C_{IS} d'une profondeur p (Figure 114 et Figure 115).

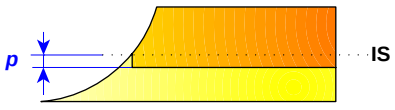


Figure 114 : Emboîture verticale simple

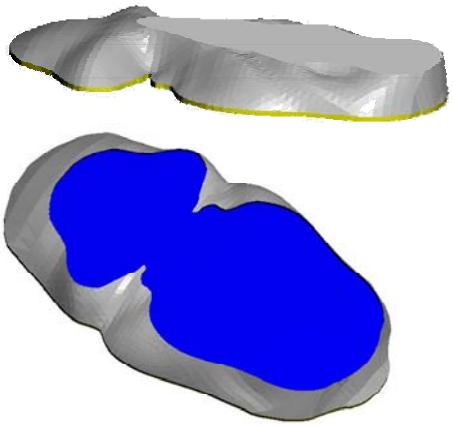


Figure 115 : Deux strates avec une emboîture verticale simple (jaune = plot, bleu = logement)

Cette technique convient aux pièces qui sont entièrement dépouillantes.
Elle présente l'avantage de pouvoir être réalisée en usinage Recto uniquement, c'est à dire sans retournement (§3.4.3.1 Usinage Recto/Verso page 68). Pour cette raison, on le nomme usuellement *emboîtement recto*.
Une limitation apparaît cependant rapidement en fonction de l'inclinaison de la surface au niveau du joint. Si $\vec{n}$ est la normale à la surface en un point du contour d'inter-strate C_{IS}, nous désignerons α l'angle entre cette normale $\vec{n}$ et la normale au plan d'inter-strate (Figure 116). Si α est faible (inférieur à 45°) il n'y a pas de problème d'emboîture (Figure 117a). Cela permet de résoudre le problème de flipot illustré sur la Figure 116 (voir également 2.2.5.4 Autres inconvénients, page 39) en augmentant l'épaisseur de matière de la strate supérieure.

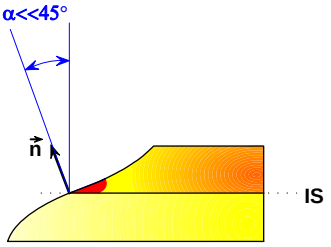


Figure 116 : Flipot pour inclinaison faible

Par contre si α est important (très supérieur à 45°), cela fait apparaître une fragilité sur la strate qui contient le logement de l'emboîture (zone représentée en rouge sur la Figure 117b). On crée en quelque sorte un flipot vertical.
Pour éviter cette zone d'épaisseur de matière faible, nous proposons alors de décaler l'emboîture verticale vers l'intérieur de la strate.

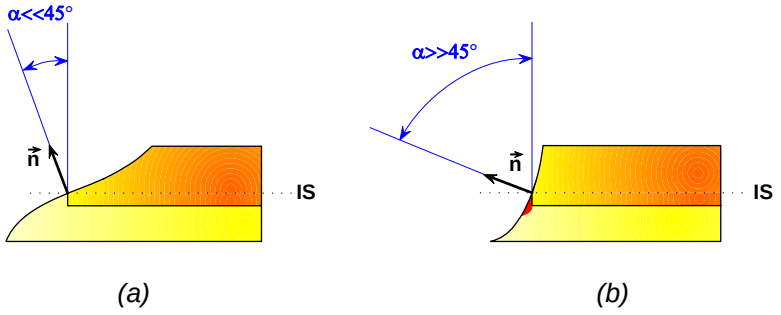


Figure 117 : Problème des surfaces verticales avec l'emboîture verticale simple

6.2.2 Emboîture verticale décalée

L'emboîture verticale décalée est réalisée en décalant le contour d'inter-strate C_{IS} d'une valeur r vers l'intérieur de la strate (r est choisie en fonction du matériau et de la taille de la pièce). Cette opération est effectuée grâce au calcul de l'offset intérieur du contour C_{IS}. Cette forme est calculée à la fois sur le plot (l'extrusion) et sur le logement (la poche) avec une profondeur p (Figure 118 et Figure 119).

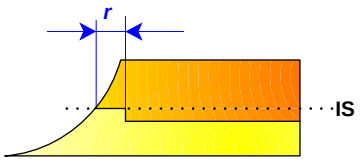


Figure 118 : Emboîture verticale décalée

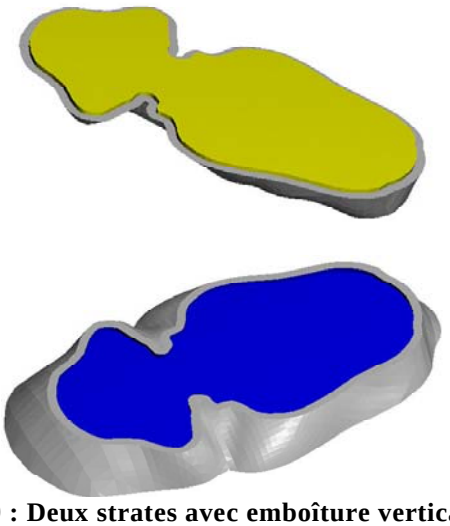


Figure 119 : Deux strates avec emboîture verticale décalée

Cette technique nécessite cependant d'être réalisée en usinage Recto/Verso avec retournement pour usiner soit la partie mâle ou la partie femelle de l'emboîture suivant le sens de l'imbrication.

Comme l'illustre la Figure 120a, pour un angle d'inclinaison important α>45°, l'emboîture ne présente plus de problème de flipot, mais c'est le cas cette fois pour un angle faible α<45° (Figure 120b). On peut cependant dire que cette technique est meilleure étant donné, que ce dernier cas de figure est généralement moins présent sur l'ensemble des pièces et que cet inconvénient était déjà présent sur des pièces réalisées sans emboîtement. Donc la technique d'emboîtement ne crée pas, dans ce cas, de problème géométrique supplémentaire. De plus, on peut utiliser l'emboîture verticale simple sur certaines strates et l'emboîture verticale décalée sur d'autres strates suivant leur inclinaison.

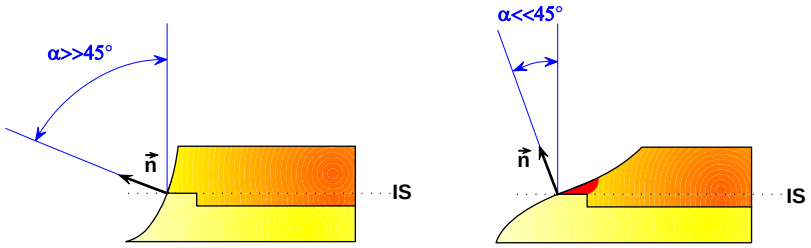


Figure 120 : Inclinaison au joint de la surface avec une emboîture verticale décalée

Malgré tout, nous proposons pour résoudre ce flipot restant, de mixer en quelque sorte ces deux techniques, par la réalisation d'une emboîture verticale variable.

6.2.3 Emboîture verticale variable

Le principe est de réaliser une emboîture verticale simple pour les surfaces où l'angle d'inclinaison est faible (α<45°) et une emboîture verticale décalée pour les zones où l'inclinaison est forte (α>45°).

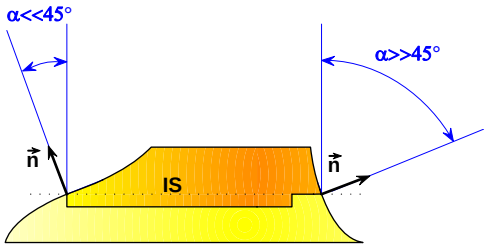


Figure 121 : Emboîture verticale variable

Pour calculer le contour de l'emboîture, nous calculons tout d'abord le contour C_{ISB} correspondant au contour d'une inter-strate placée à une profondeur p par rapport à l'inter-strate IS (Figure 122a). Ce contour est décalé vers son intérieur d'une valeur r (contour $C_{ISB}\downarrow r$). Nous calculons alors l'intersection de ce contour et du contour d'inter-strate initial C_{IS} pour obtenir le contour d'emboîture (Figure 122b).

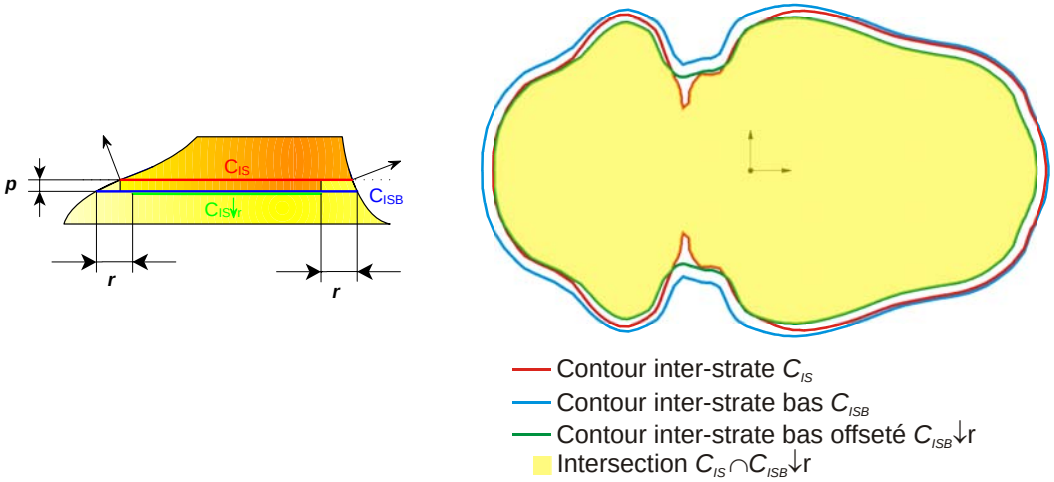


Figure 122 : Calcul de l'emboîture verticale variable

Ainsi, pour les zones faiblement inclinées, on prend le contour d'inter-strate C_{IS} (soit une emboîture verticale simple) et pour les zones fortement inclinées on prend le contour offseté $C_{ISB}\downarrow r$ (une emboîture verticale décalée). Nous obtenons ainsi une emboîture verticale variable suivant l'inclinaison de la surface comme illustrée sur la Figure 123.

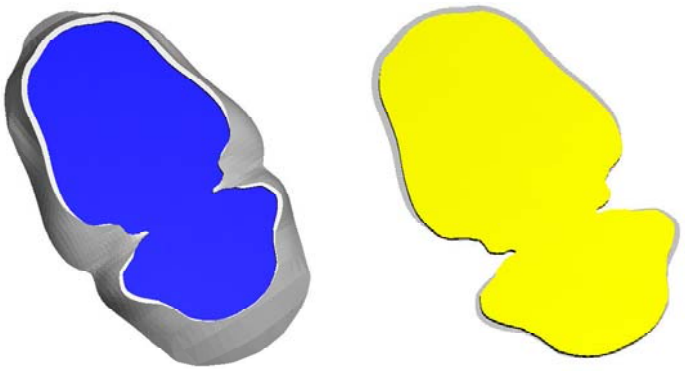


Figure 123 : Deux strates avec emboîture verticale variable

Une visualisation des zones de flipots de la strate supérieure (Figure 124) nous permet de contrôler la localisation de l'emboîture verticale simple sur les zones de flipots.

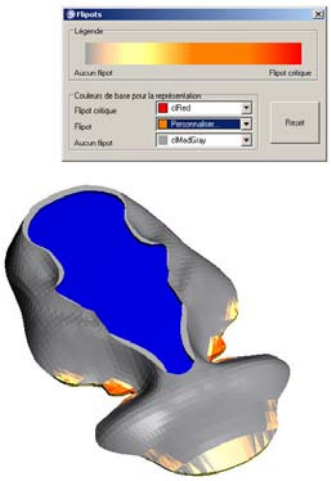


Figure 124 : Emboîture verticale simple et flipots

6.2.4 Emboîture à inclinaison constante à 45°

Une autre idée pour adapter l'emboîture à la normale de la surface au joint est de réaliser une emboîture qui n'est plus verticale mais qui présente un angle fixe β par rapport au plan d'inter-strate (Figure 125). L'usinage de cet angle constant sur toute la périphérie de la strate pourra être effectué par un outil à chanfreiner (Figure 126). Si on choisit un angle β égal à 45°, la même fraise sera utilisée pour la réalisation du plot et du logement en usinage par retournement ou grâce à un outil de forme spécial à dépouille inversée.

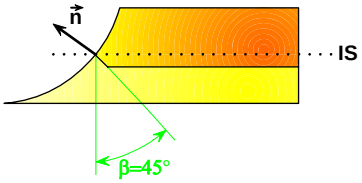


Figure 125 : Emboîture à inclinaison constante (45°)



Figure 126 : Fraises à chanfreiner à 45°

On constate que quelque soit l'angle d'inclinaison de la surface au joint, l'emboîture ne pose plus de problème de flipots (Figure 127a et b).

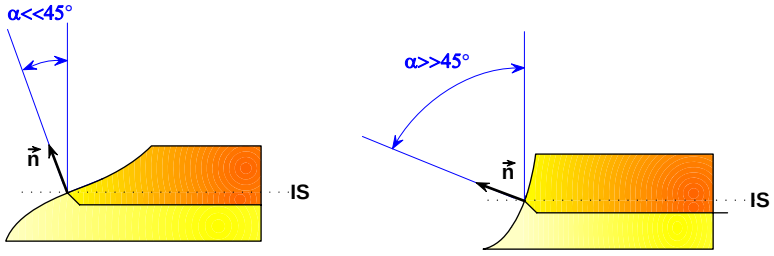


Figure 127 : Emboîture à inclinaison constante suivant l'inclinaison de la surface

6.2.5 Emboîture à inclinaison normale à la surface

A partir de l'idée de l'emboîture avec une inclinaison fixe, on peut généraliser cette technique en modifiant l'angle d'inclinaison de l'emboîture en fonction de la normale à la surface au joint $\vec{n}$, afin que l'angle d'inclinaison de l'emboîture β soit le même que l'angle d'inclinaison α (Figure 128).

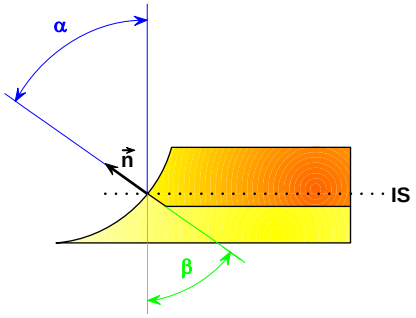


Figure 128 : Emboîture à inclinaison égale à la normale à la surface de joint

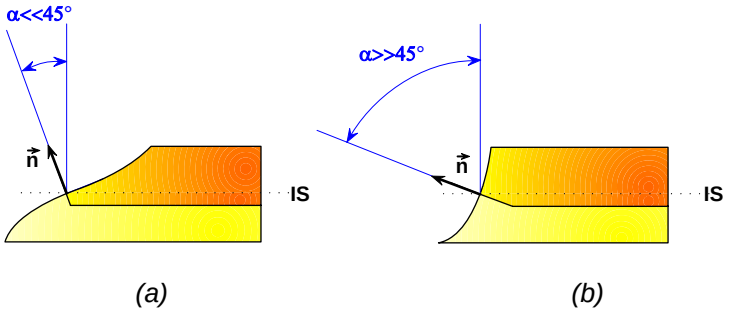


Figure 129 : Emboîture à inclinaison normale à la surface de jonction

La réalisation par usinage 2 axes ½ ou 3 axes de la surface de joint devient alors difficile à réaliser pour obtenir une bonne précision d'ajustement souhaitée pour l'assemblage. La Figure 130 illustre la forme du joint devant être réalisée sur l'ensemble de la périphérie de la strate (en rouge).
De plus, pour les angles β proches de 90°, il faut prévoir un moyen de positionnement des strates entre-elles par un centrage supplémentaire (Figure 130 réf 8).

6.2.6 Brevet d'invention

Nos travaux sur ces emboîtures et leur optimisation, nous ont permis le dépôt de trois brevets d'invention français, européen et américain intitulés « *Procédé pour l'optimisation des joints de strates dans une modélisation ou prototypage par décomposition en strates et pièces ainsi obtenues* » (Barlier, 2003, Barlier, 2005b, Barlier, 2006). Ces brevets sont issus en partie du résultat des travaux présentés dans ce manuscrit comme les différentes techniques de génération des emboîtures évoquées dans les paragraphes précédents et les variantes que l'on peut y apporter (Figure 130).

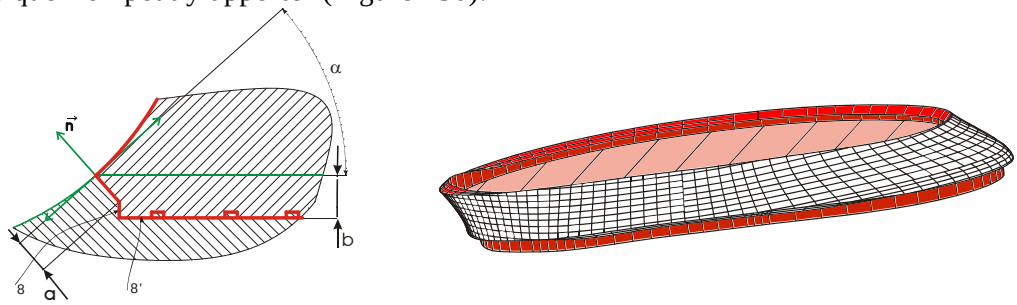


Figure 130 : Brevet sur l'optimisation des joints de strates dans une modélisation ou prototypage par décomposition en strates (Barlier, 2003)

On peut par exemple rendre l'emboîture indémontable par la présence d'une contre-dépouille sur le profil de l'emboîture et grâce à l'élasticité du matériau (Figure 131 FIG. 7). Il est également possible d'aménager le joint pour réaliser une étanchéité par déformation de la matière ou pour une réserve où est mis en place un joint d'étanchéité (Figure 131 FIG. 8A/8B/8C). L'annexe I présente l'énoncé du brevet français.

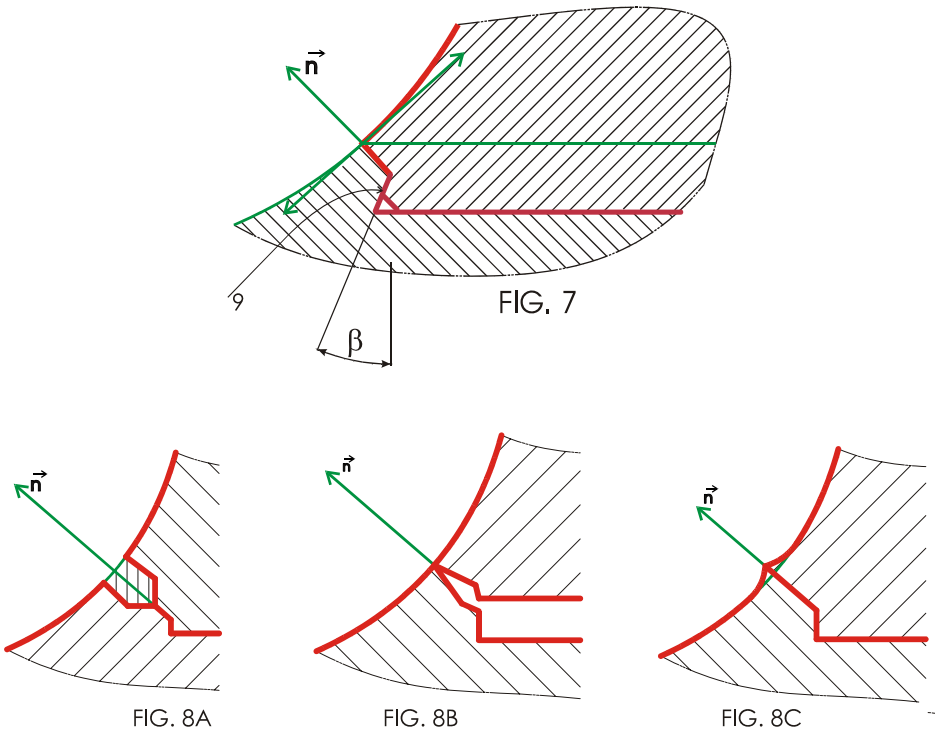


Figure 131 : Brevet emboîture et variantes (Barlier, 2003)

6.2.7 Emboîture par portions

6.2.7.1. Emboîture intérieure

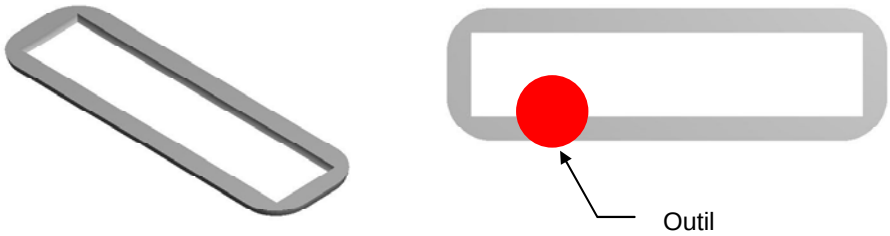


Figure 132 : Emboîture et pièces à parois fines

Pour réaliser une emboîture, il faut que l'épaisseur de la pièce permette de réaliser un plot et un logement d'une largeur suffisante. Si l'épaisseur est trop faible pour le plot celui-ci n'aura pas une résistance mécanique suffisante et le logement doit avoir, au minimum, une largeur égale au diamètre de l'outil qui va usiner la poche. Cependant, pour les pièces à parois fines l'épaisseur de matière n'est pas suffisante (Figure 132).

Dans ce cas, on peut réaliser une emboîture uniquement sur les contours intérieurs de la pièce (Figure 133).

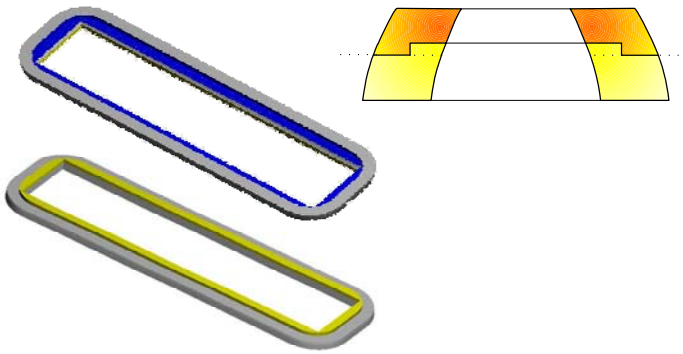


Figure 133 : Emboîture intérieure

6.2.7.2. Emboîture partielle

L'emboîture peut se faire également sur une partie du contour de la pièce seulement, nous parlerons dans ce cas d'*emboîture partielle* (Figure 134). On peut prévoir de réaliser cette emboîture suivant une partie du contour, suivant des secteurs angulaires ou en fonction de l'épaisseur locale de la pièce.

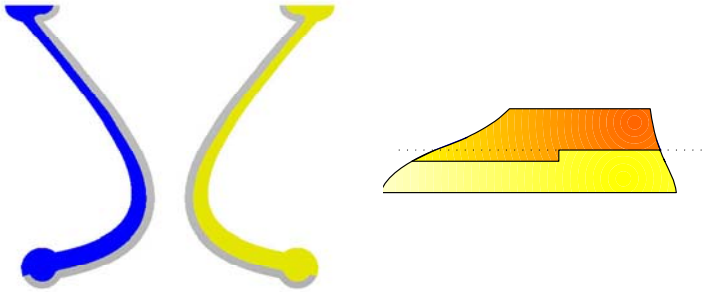


Figure 134 : Emboîture partielle

6.3 Profondeur de l'emboîtement

6.3.1 Problématique

Pour les parties en contre-dépouille, suivant le sens et la profondeur *p* de l'emboîture, celle-ci peut dépasser en partie à l'extérieure de la strate où se trouve le logement de celle-ci (zone illustrée en vert sur la Figure 135).

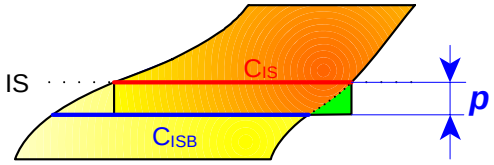


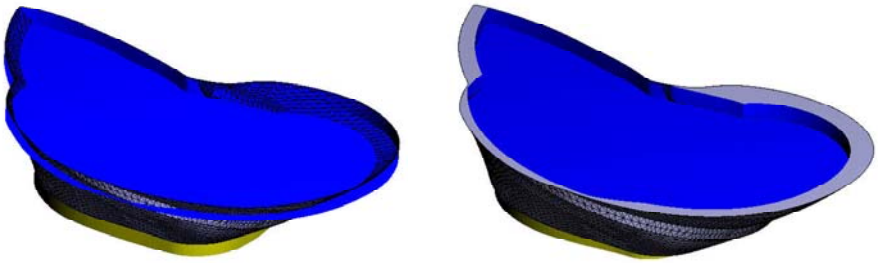
Figure 135 : Problème de la profondeur de l'emboîture

6.3.2 Algorithme de gestion de la profondeur

Pour résoudre ce problème, nous proposons d'utiliser le principe de l'algorithme présenté pour l'emboîture variable (voir 6.2.3 Emboîture verticale variable page 127).
Nous calculons tout d'abord le contour C_{ISB} correspondant au contour d'une inter-strate placée à une profondeur p par rapport à l'inter-strate initiale IS (Figure 135). Nous calculons ensuite l'intersection de ce contour et du contour d'inter-strate initial C_{IS} pour obtenir le contour d'emboîture C_{EMB} (Équation 6). Dans les zones de contre-dépouille, le contour de l'emboîture suivra le contour C_{ISB} et pour les zones dépouillantes il correspondra au contour C_{IS}.

$$C_{EMB} = C_{IS} \bigcap C_{ISB}$$

Équation 6 : Calcul du contour de l'emboîture en fonction de la profondeur *p*



(*a*) (*b*)

Figure 136 : Exemple d'emboîture sans (a) et avec (b) la gestion de profondeur

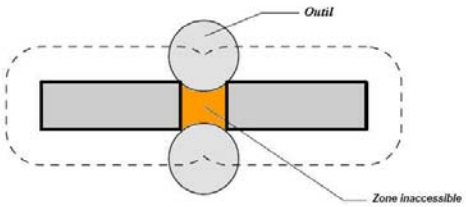
Cette technique peut être utilisée avec une emboîture décalée. Nous utiliserons cet algorithme pour déterminer la surface d'inter-strate S_{IS} pour le placement de plots et logements (voir §3 L'emboîtement page 55). Ainsi, on ne placera des plots et logements qu'aux endroits où l'épaisseur de la strate est supérieure à la hauteur du plot.
On peut également faire varier la profondeur de l'emboîture ou réaliser plusieurs profondeurs d'imbrication. Ainsi, suivant la surface au joint et son inclinaison, on peut réaliser des imbrications plus ou moins profondes.

6.4 Formes imbricables

6.4.1 Problématique

L'emboîtement d'une partie mâle dans une partie femelle, nous impose la contrainte que les parties mâle et femelle doivent être de *formes complémentaires*, c'est à dire que leur profil doit être identique pour pouvoir s'assembler.

Cependant, nous réalisons ces formes par fraisage 2 axes ½ avec un outil cylindrique de diamètre donné D_o. Ce diamètre d'outil rend certaines zones inaccessibles à l'outil sans endommagement de la forme originale de la pièce. On parle alors d'*inaccessibilité d'outil* (Lauvaux, 2005). Les angles concaves, les rainures et certaines formes de taille inférieure au diamètre de l'outil vont représenter autant de zones inaccessibles et engendrer un surplus de matière sur la pièce usinée (Figure 137).



Zones globalement inaccessibles à l'outil : interactions entre des éléments non-consécutifs du contour



Plus l'angle est fermé, plus l'erreur commise est importante.

Figure 137 : Inaccessibilité de l'outil (Lauvaux, 2005)

Pour pouvoir réaliser deux formes complémentaires mâle et femelle à partir d'un même profil, il nous faut tenir compte de ces inaccessibilités de l'outil et modifier en conséquence la forme du profil pour que celui-ci puisse être usiné, pour la partie mâle, par l'extérieur (Figure 138b), et pour la partie femelle, par l'intérieur (Figure 138a) sans que cela ne génère de zones inaccessibles sous peine de quoi les deux formes ne seraient plus complémentaires.

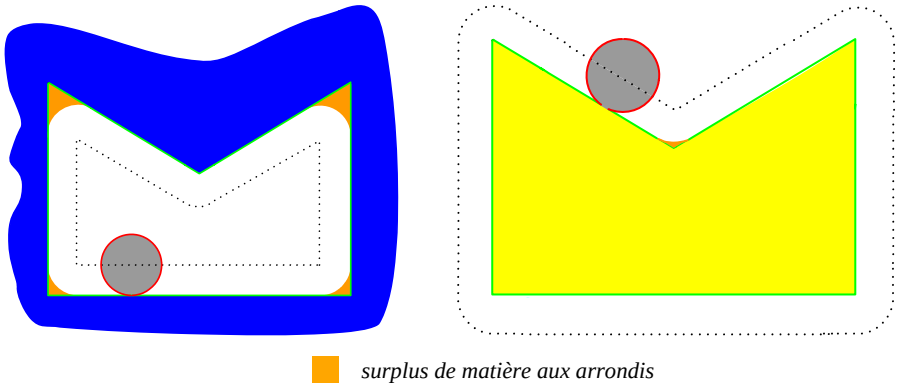


Figure 138 : Usinage de formes mâle et femelle

6.4.2 Formes complémentaires

La trajectoire du centre de l'outil cylindrique de rayon r est calculée par un offset intérieur ou extérieur de la forme à usiner. Le calcul de cet offset peut être défini comme la *somme* ou la *différence de Minkowski* (O'Rourke, 1998) du polygone *P* - représentant la frontière de la forme - et du rayon de l'outil *r*.

$$P\uparrow_r = P \oplus r \qquad P\downarrow_r = P \ominus r$$

(a) *(b)*

Les opérateurs ⊕ et ⊖ étant respectivement la somme et la différence de Minkowski.

Équation 7 : Dilatation (a) et érosion (b) d'un polygone P

La somme de Minkowski $P \oplus r$ peut être vue comme la copie d'un disque de rayon *r* translaté pour chaque point du polygone *P*.
Lors d'un usinage d'une forme extérieure (Figure 138b), l'offset est extérieur, on parlera de *dilatation* du polygone *P* d'un rayon *r* et on notera celui-ci $P\uparrow_r$. (Rossignac, 1986)
Pour un usinage d'une forme intérieure (Figure 138a), l'offset calculé est intérieur, il correspondra à une *érosion* du polygone *P* d'un rayon *r* et on le notera $P\downarrow_r$.
Le profil obtenu par l'usinage de la fraise cylindrique de rayon *r* d'un polygone sera alors une forme arrondie intérieurement pour une partie femelle et arrondie extérieurement pour une partie mâle.
On retrouve cette problématique pour les problèmes de morphologie mathématique pour le traitement d'images (Williams, 2005).
On définit deux opérations R_r et F_r respectivement comme l'arrondissement extérieur (*Rounding*) et arrondissement intérieur (*Filleting*). Ces opérateurs

sont la combinaison de deux offsets successifs décrits par l'Équation 8 (Rossignac, 1986).

$$R_r(P) = (P \ominus r) \oplus r = (P\downarrow_r)\uparrow_r$$

$$F_r(P) = (P \oplus r) \ominus r = (P\uparrow_r)\downarrow_r$$

Équation 8 : Opérateurs R_r et F_r (*Rounding* et *Filleting*)

On remarque que l'opérateur R_r arrondit les angles convexes du polygone et l'opérateur F_r arrondit les angles concaves du polygone (Figure 138 a et b en orange). De plus, opérateur R_r réduit la surface et l'opérateur F_r l'augmente, permettant d'écrire la relation suivante :

$$R_r(P) \subset P \subset F_r(P)$$

Équation 9 : Relation d'inclusion (Rossignac, 1985)

Le résultat de l'usinage (intérieur) d'un logement peut être calculé par l'opérateur R_r et le résultat de l'usinage (extérieur) d'un plot par l'opérateur F_r. Pour que les formes usinées du logement et du plot soient complémentaires, il faut que la forme du plot (R_r) soit incluse dans la forme du logement (F_r), c'est à die que notre polygone respecte la condition suivante :

$$F_r(P) \subseteq R_r(P)$$

Équation 10: Condition pour la complémentarité des formes Logement et Plot

En couplant l'Équation 10 et l'Équation 9 on obtient notre condition d'imbrication :

$$Fr(P) = Rr(P) = P$$

Équation 11 : Condition pour l'imbrication

Une forme respectant la condition de l'Équation 11 est dite *r-régulière*.

6.4.3 Formes r-régulières

Une forme en tout point accessible par un rayon *r* extérieurement et intérieurement est dite *r-régulière* (Figure 139). Attali (Attali, 1995) définit la forme *r-régulière* par la relation suivante :

$$P = (P \ominus r) \oplus r = (P \oplus r) \ominus r$$

Équation 12 : Relation d'une forme r-régulière

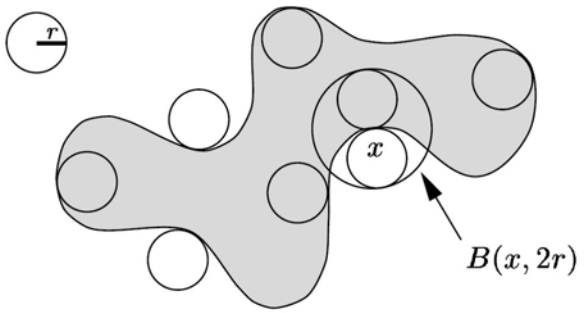


Figure 139 : Définition d'une forme r-régulière (Attali, 1995)

Les opérateurs précédents sont utilisés dans de nombreuses applications de géométrie et de modélisation, notamment pour la création d'offset ou d'arrondis en CAO (Rossignac, 1986, Chen, 2005), la reconstruction de surfaces (Attali, 1997) ou la simplification de formes (Williams, 2004a).
Nous devons donc à partir de notre contour d'emboîtement obtenir un contour d'emboîtement modifié qui soit *r-régulier*, si *r* représente notre rayon d'outil. Williams (Williams, 2004b) propose une fonction de lissage appelée *Masson*(*P*) qui va par un calcul de différence d'aire et d'une segmentation réaliser une combinaison des deux précédents opérateurs R_r et F_r. Cet algorithme est applicable uniquement à l'imagerie et laisse cependant des zones non r-régulières intérieures ou extérieures.

L'opérateur d'arrondissement R_r garantit la r-régularité intérieure de la forme, et l'opérateur F_r garantit la r-régularité extérieure (Williams, 2005). On peut alors combiner ces deux opérateurs. Les combinaisons des opérateurs comme $R_r(F_r(P))$ et $F_r(R_r(P))$ tendent à donner des formes qui sont r-régulières. Cependant $R_r(F_r(P))$ et $F_r(R_r(P))$ ne garantissent pas cette régularité, ils peuvent contenir des irrégularités comme des points de rebroussement ou des resserrements (Williams, 2004a).

6.4.4 Notre algorithme

La méthode que nous proposons est basée sur le calcul d'un quadruple offset (Tableau 23), c'est à dire à la combinaison des deux opérateurs R_r et F_r. Cette technique a été récemment utilisée pour le lissage de modèle CAO (Chazal, 2006) ou pour le traitement d'image (Williams, 2005).

1. Calcul de la surface d'emboîture à partir du profil d'inter-strate $S_{EMB} = f(S_{IS})$ (voir §6.3.2 Algorithme de gestion de la profondeur page 134)
2. Calcul du profil du plot (mâle)
   - 2.1. Calcul de $S' = R_r(S_{EMB}) = (S_{EMB} \ominus r) \oplus r$
   - 2.2. Calcul de $S_m = F_r(R_r(S_{EMB})) = F_r(S') = (S' \oplus r) \ominus r$
3. Calcul du profil du logement (femelle)
   - 3.1. Calcul de $S'' = F_r(S_{EMB}) = (S_{EMB} \oplus r) \ominus r$
   - 3.2. Calcul de $S_f = R_r(F_r(S_{EMB})) = F_r(S'') = (S'' \ominus r) \oplus r$
4. Test de r-régularité
   Si $S_m \not\subset S_f$ alors $S_r = S_m - S_f$
5. Calcul des trajectoires centre outil
   $SU_m = S_m \oplus r$ et $SU_f = S_f \ominus r$
6. Usinage du plot trajectoire SU_m (*Figure 140 en jaune*)
7. Usinage du logement trajectoire SU_f (*Figure 140 en bleue*)
8. Si $S_r \neq \varnothing$ alors Reprise sur le plot des zones non r-régulières par surfaçage de S_r

Tableau 23 : Algorithme de calcul des formes complémentaires mâle et femelle

Le calcul peut être simplifié pour obtenir directement la trajectoire outil par le calcul d'un double offset.

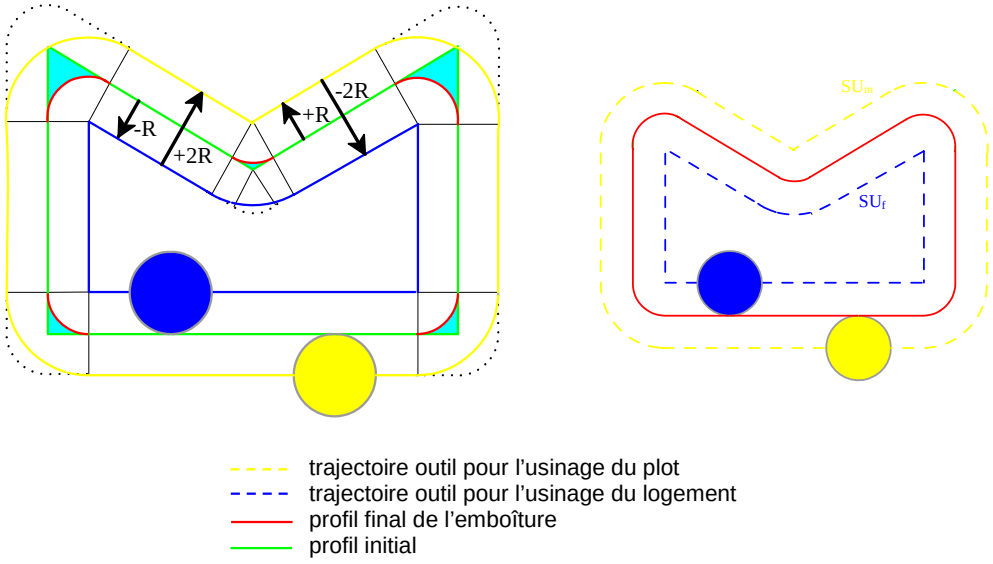


Figure 140 : Calcul d'une forme r-régulière par double offset

La Figure 140 illustre un exemple du résultat de cet algorithme sur une forme simple. Le profil initial (en vert) est le résultat du calcul de l'emboîture S_{EMB} dont le calcul est décrit en détail au paragraphe 6.3.2 (Algorithme de gestion de la profondeur page 134). Le profil de la trajectoire du centre outil pour l'usinage du logement de l'emboîture est représenté en couleur bleue, en jaune, le profil de la trajectoire centre outil pour l'usinage du plot de l'emboîture. On remarquera les arrondis générés par les opérateurs R_r et F_r sur les concavités intérieures ou extérieures (en rouge). Ces arrondis vont

ajouter ou ôter de la matière par rapport au profil initial (zones représentées en couleur bleue claire). Cette modification de forme et cette quantité de matière sont limitées par les deux relations suivantes (Williams, 2005):

$$R_r(P) \subseteq R_r(F_r(P)) \subseteq F_r(P)$$

$$R_r(P) \subseteq F_r(R_r(P)) \subseteq F_r(P)$$

Figure 141 : Modifications limitées pour la combinaison des opérateurs R_r et F_r (Williams, 2005)

Pour cet exemple, le résultat est une forme r-régulière exactement identique pour la partie mâle et femelle de l'emboîture (en rouge sur la Figure 140).

Cependant, lorsque le profil initial présente des zones globalement inaccessibles pour l'outil comme l'illustre l'exemple de la Figure 142. Dans cet exemple, le logement (représenté en bleu) et le plot (en jaune) sont différents sur les zones d'inaccessibilité globale dues à la présence de deux rainures d'une largeur inférieure au diamètre de l'outil. Cependant, dans cet exemple, la partie mâle de l'emboîture est incluse dans la partie femelle car $F_r(R_r(S)) \subset R_r(F_r(S))$.

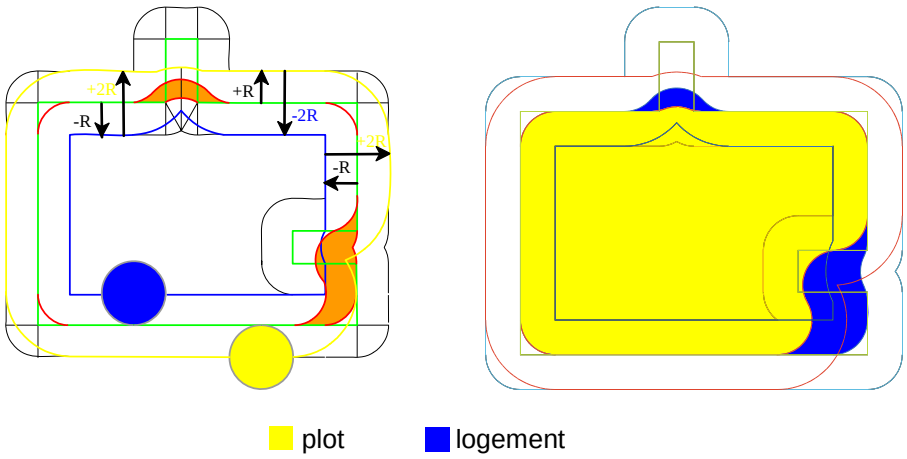


Figure 142 : Double offset et inaccessibilité globale

6.4.5 Reprise des zones non r-régulières du plot

Comme la combinaison de nos opérateurs R_r et F_r ne garantit pas la régularité, il se peut que $F_r(R_r(S)) \not\subset R_r(F_r(S))$, c'est à dire que la partie mâle ne soit pas incluse dans la partie femelle. On a, dans ce cas, un problème d'imbrication des deux parties (Figure 143). Nous proposons dans notre méthode de détecter ce cas particulier, à la suite du calcul, et d'effectuer une reprise d'usinage sur la partie mâle pour assurer la complémentarité.

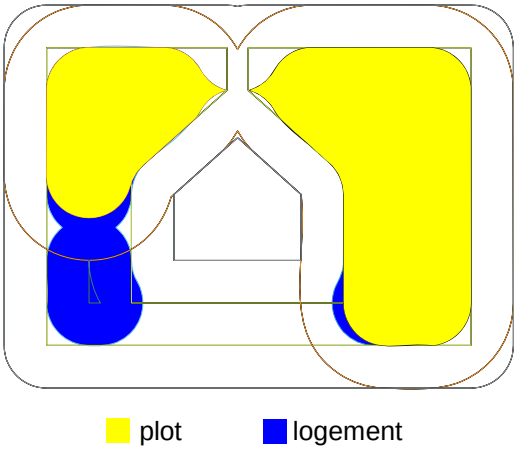


Figure 143 : Formes non imbricables par le double offset

Si $S_m \not\subset S_f$, alors nous calculons la différence de la surface de la partie mâle et de la partie femelle $S_r = S_m - S_f$. Cette surface S_r est ensuite retirée du plot par surfaçage (en rouge sur la Figure 144).

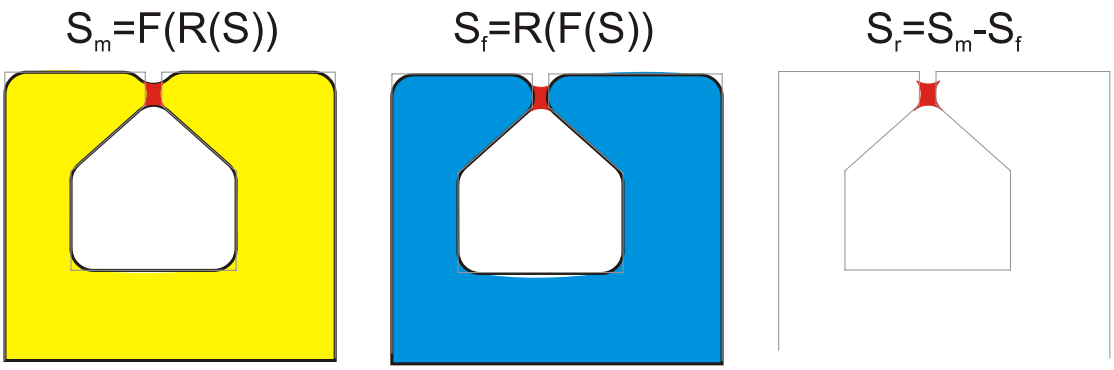


Figure 144 : Reprise d'usinage du plot

6.5 Emboîtement et perspectives pour les fonctions avancées

La décomposition en couches fait apparaître, entre deux couches consécutives, une surface de contact : l'inter-strate. Elle permet aujourd'hui d'intégrer au cœur des outils, de nouvelles fonctionnalités pour optimiser les performances des outillages et pour améliorer l'assemblage des couches, comme nous venons de le présenter.

Ainsi, le procédé permet de réaliser, lors de la fabrication de l'outillage, des aménagements (canaux, logements, …) qui permettent d'incorporer des fonctions de circulation de fluides, d'aspiration, d'instrumentation ou d'amélioration de la tenue mécanique pour parvenir à un outillage plus optimisé pour son refroidissement, une aspiration mieux maîtrisée, ou une surveillance intégrée. De plus, ces fonctions ainsi optimisées ne sont pas réalisables par les procédés conventionnels. Ceci conduit à l'amélioration de la productivité des

outillages réalisés, et à l'obtention de nouvelles formes de pièces grâce à la réduction des contraintes technologiques.

Plusieurs nouvelles innovations procédé pour les outillages sont maintenant validées industriellement. L'emboîtement va pouvoir permettre de les intégrer dans l'inter-strate et de les améliorer par exemple en réalisant une emboîture complète avec des logements spécifiques pour ces nouvelles fonctionnalités.

- L'intégration de *canaux de type conformables* au sein des couches pour l'optimisation de la régulation grâce à un système de refroidissement directement fabriqué en même temps que l'empreinte améliorant ainsi le refroidissement des outillages d'injection, de fonderie, etc. (Pelaingre, 2003).

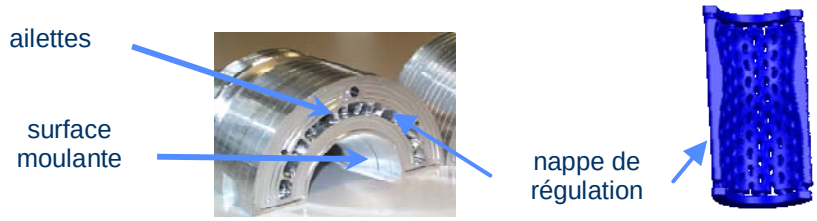


Figure 145 : Canaux conformables et nappes de régulation (Pelaingre, 2003)

- L'aménagement de *canaux de busage* pour l'amélioration de l'injection de pièces polystyrènes du procédé de moulage par modèle perdu pour une application automobile (Cunin, 2005).

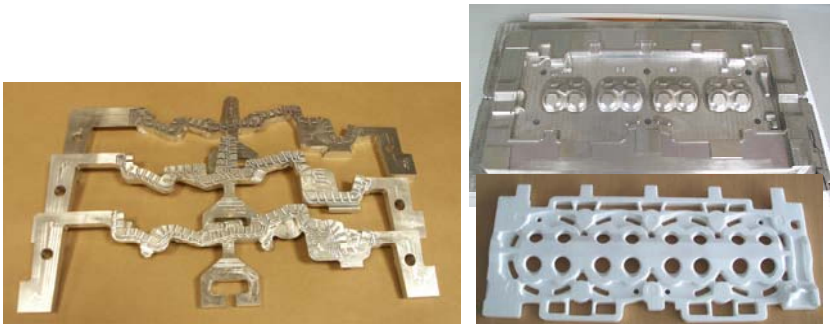


Figure 146 : Canaux de busage sur outillage d'injection de polystyrène - Contrat CIRTES/PSA (Cunin, 2005)

- La mise en place de *canaux d'aspiration* dans les strates de modèles pour le thermoformage.

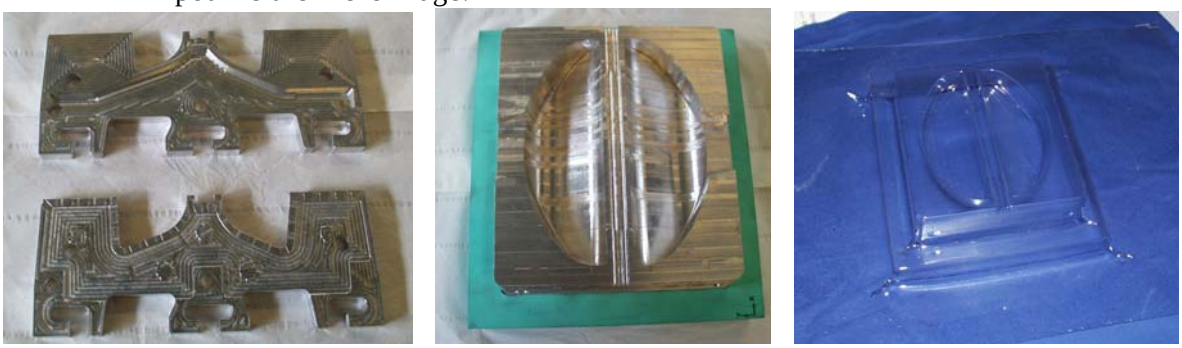


Figure 147 : Outil de thermoformage avec canaux d'aspiration intégrés (CIRTES)

- L'intégration de *capteurs* pour instrumenter et surveiller les procédés de fabrication (Pelaingre, 2005, Thabourey, 2005).

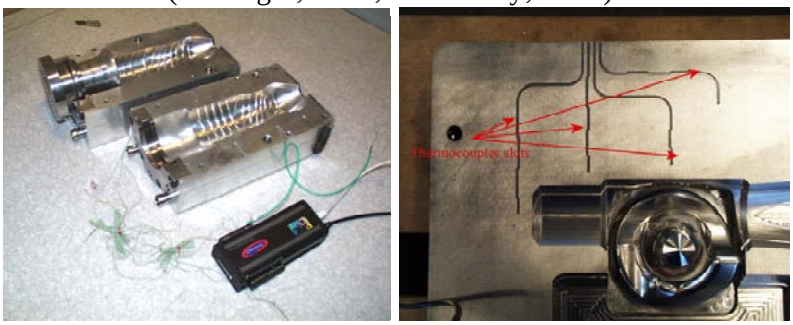


Figure 148 : Outillages instrumentés par capteurs de température (Pelaingre, 2005, Thabourey, 2005)

- L'incorporation de logements pour une meilleure maîtrise et une assistance des méthodes d'assemblage par collage ou par brasage pour accroître la tenue mécanique des pièces (Thabourey, 2006).

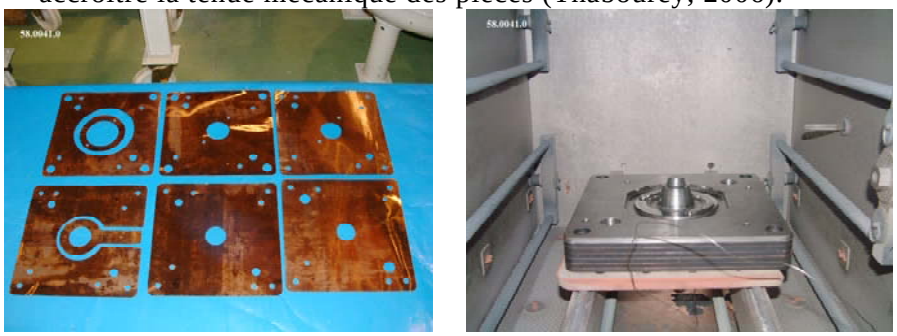


Figure 149 : Outillage brasé par feuillard intégré aux inter-strates projet MOLSTRA (CIRTES)

- L'imbrication permet également de réaliser une étanchéité des strates d'un moule soit par des chicanes, soit par incorporation de joints d'étanchéité dans des rainures réalisées dans les couches.

Plusieurs brevets internationaux ont été déposés sur ces travaux (Barlier, 2004c, Barlier, 2005a, Barlier, 2006).

6.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développé une seconde approche de notre méthode d'assemblage, l'emboîtement complet. Cette emboîture unique, générée à partir d'inter-strate, a nécessité la résolution de deux problèmes : la création de formes mâles et femelles complémentaires et leur réalisation par l'outil d'usinage notamment à cause du problème d'accessibilité de l'outil.
Le choix entre les deux solutions proposées plots/logements et emboiture complète sera fait suivant les besoins de l'application de la pièce et de sa géométrie. L'emboitement complet permettra de résoudre la problématique du flipot, d'augmenter la résistance mécanique sur la totalité de la pièce, d'éviter le délaminage même pour des pièces à parois fines et d'ajouter des fonctionnalités d'étanchéité ou de collage entre les strates. La solution des plots et des logements, quant à elle, sera préférée pour un assemblage plus précis en maitrisant mieux les ajustements par la réalisation de formes plus simples et en permettant un montage plus facile. De plus la surface d'inter-strate étant conservée, elle permet une combinaison simple avec les solutions actuelles pour les canaux de busage. L'ensemble de ses développements a été implanté dans le logiciel du procédé pour permettre la mise en œuvre sur des pièces prototypes réelles. C'est cette implantation que nous présentons dans le chapitre suivant.

7. Applications

7.1 IMPLEMENTATION LOGICIELLE DANS STRATOCONCEPT III

7.2 REALISATIONS DE PIECES

Nous mettons ici en évidence les premiers résultats industriels au travers des outils implémentés dans la version professionnelle du logiciel du procédé de Stratoconception et des pièces réalisées par cette nouvelle méthode.

7.1 Implémentation logicielle dans Stratoconcept III

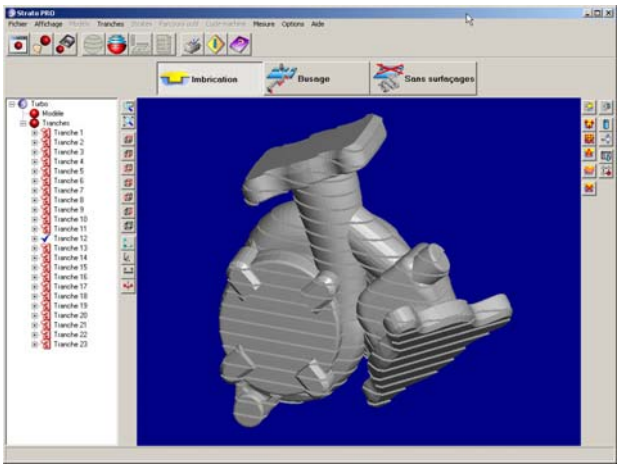


Figure 150 : Module imbrication sous le logiciel Stratoconcept

Un module pour la mise en place des emboîtements a été réalisé et implanté dans la version III du logiciel Stratoconcept (Figure 150). La mise en place des entités d'assemblage se fait après le tranchage au même moment que la mise en place des inserts ou des pontets (les deux méthodes pouvant être mixées). Le développement des algorithmes a été réalisé en C++ objet (voir §3.8 Modélisation de données objet de l'emboîtement page 77).

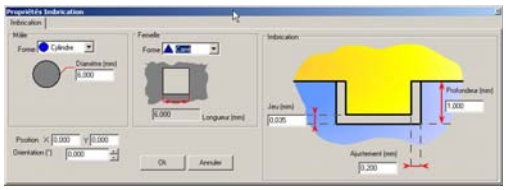


Figure 151 : Fenêtre de paramétrage des plots et logements

Tous les éléments d'assemblage sont intégrés à la structure actuelle interne du logiciel (tranche, inter-strate, etc.…) et les parcours outil correspondants à

l'usinage des entités sont générés au sein du code machine de réalisation des strates.

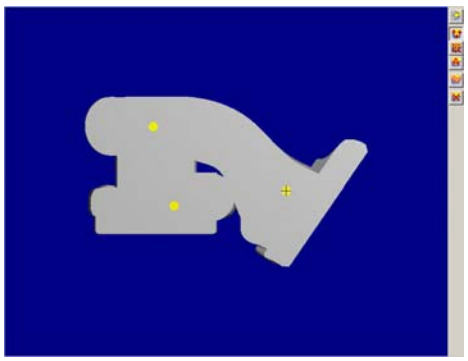


Figure 152 : Placement manuel des entités d'assemblage

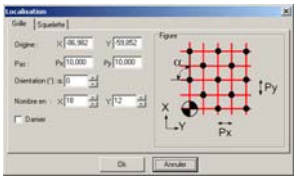


Figure 153 : Fenêtre de paramétrage de la localisation par grille

Chaque entité plot et logement est paramétrable, ainsi que les jeux associés (Figure 151). Le positionnement des entités peut se faire manuellement (Figure 152), par grille (Figure 153), par localisation, par squelettisation (Figure 154) ou encore suivant une emboîture complète verticale décalée (Figure 155).

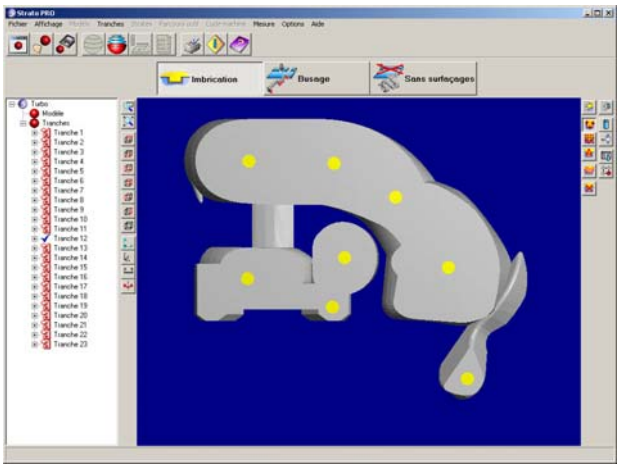


Figure 154 : Localisation par squelettisation

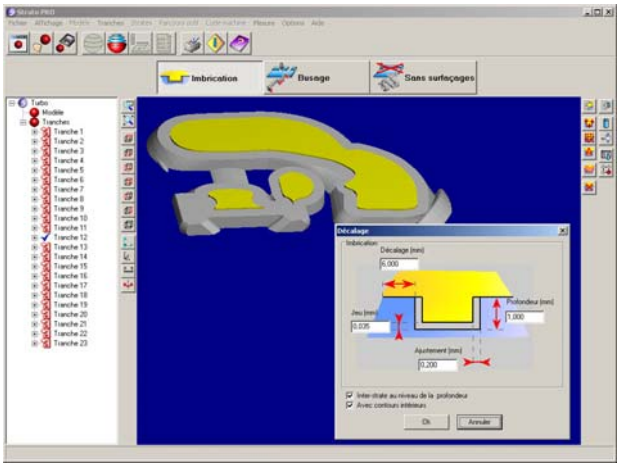


Figure 155 : Génération de l'emboîture verticale décalée

Ce module logiciel a permis de réaliser des pièces par le procédé en intégrant cette nouvelle méthode d'assemblage.

7.2 Réalisations de pièces

Nous présentons ici la réalisation de 11 pièces avec deux types d'emboîtement : 6 pièces avec une emboîture verticale complète et 5 pièces assemblées avec l'emboîtement par plots et logements.

Pour chaque pièce, nous précisons les paramètres des emboîtements : décalage ou diamètre des entités, hauteur de l'emboîtement, les jeux et le diamètre de l'outil qui a usiné les entités d'assemblage.

Plusieurs matériaux ont été testés : Polystyrène extrudé, aluminium, résine PU et PMMA. L'usinage a été réalisé sur la plate-forme du CIRTES, sur des stations Stratoconcept STE128 et STO3015 pour les matériaux légers et sur une machine REALMECA RV8 pour l'aluminium. Nous présentons le résultat du calcul des emboîtures sur quelques strates, les strates réelles et la pièce finale réassemblée. On remarquera que les images du résultat calculé de l'emboîture ne représentent pas les zones inaccessibles pour l'outil (elles sont calculées au moment de la génération des trajectoires de l'outil).

Toutes les pièces démontrent particulièrement l'intérêt de l'emboîtement pour des modèles à parois fines (Modèles Pale, Bouton Droit, Jante, Raccord vanne), ou de formes géométriques complexes (Modèles Renacor, Aube, Chambre combustion, Vis sans fin) et également pour les pièces ayant besoin d'un très bon aspect esthétique (Modèles Pale, Flacon) ou nécessitant une résistance mécanique importante (Modèles Engrenage, Turbine).

Modèle	**Bouton Droit**	
Type d'emboîtement	Emboîture Verticale Décalée	
Matière	Polystyrène Extrudé	
Epaisseur des couches	3 mm	
Epaisseur de maintien	0.2 mm	
Emboîture	Décalage Hauteur	0.6 mm 0.4 mm
	Jeu Ajustement	0.1 mm 0.1 mm
Nombre de strates	8	
Diamètre de l'outil	2 mm	
Observations	Petite pièce (42 mm x 41 mm x 22 mm) Parois fines épaisseur 3 mm	



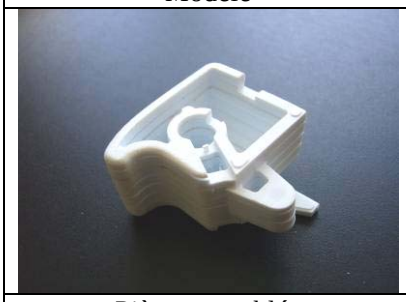
Modèle



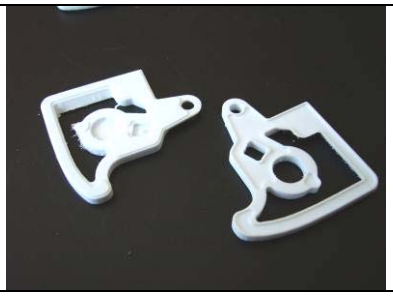
Strate n°3



Strate n°2



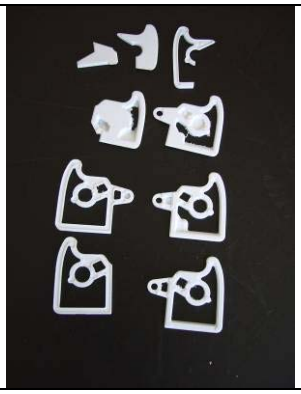
Pièce assemblée



Deux strates



Emboîture mâle



Panoplie des strates



Une emboîture femelle

Modèle	**Aube**	
Type d'emboîtement	Emboîture Verticale Décalée	
Matière	Aluminium	
Epaisseur des couches	12 mm	
Epaisseur de maintien	1.4 mm	
Emboîture	Décalage Hauteur	2 mm 1.4 mm
	Jeu Ajustement	0.1 mm 0.01 mm
Nombre de strates	7	
Diamètre de l'outil	2 mm	
Observations		



Modèle



Strate n°3



Strate n°4



Pièce réassemblée



Deux strates avec emboîture



Emboîture verticale extérieure et intérieure



Emboîture femelle



Emboîture mâle

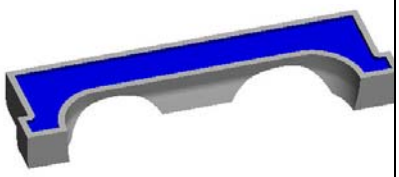
Modèle	**Chambre combustion**	
Type d'emboîtement	Emboîture Verticale Décalée	
Matière	Aluminium	
Epaisseur des couches	10 mm	
Epaisseur de maintien	1 mm	
Emboîture	Décalage Hauteur	1.5 mm 1 mm
	Jeu Ajustement	0.2 mm 0.1 mm
Nombre de strates	10	
Diamètre de l'outil	2 mm	
Observations		



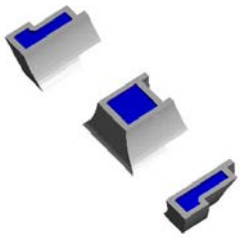
Modèle



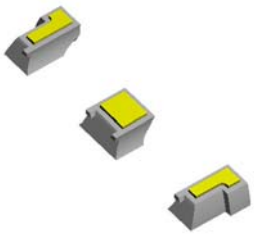
Strate n°6



Strate n°7



Strate n°5



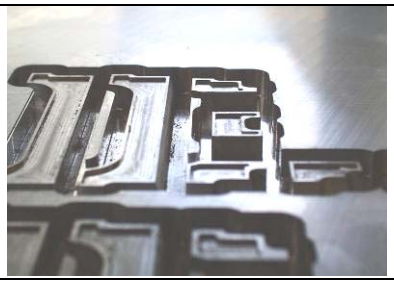
Strate n°4



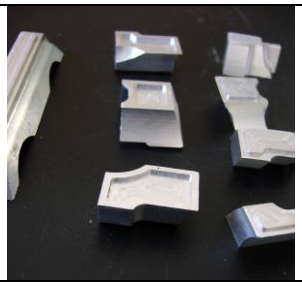
Pièce assemblée



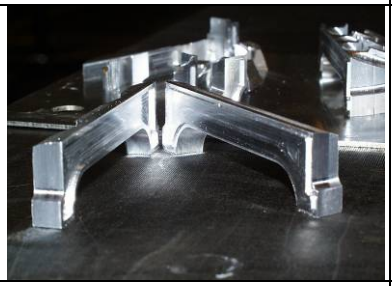
Plusieurs strates



Usinage des logements



Parties de strates



Deux strates

Modèle	**Raccord vanne**	
Type d'emboîtement	Emboîture Verticale Décalée	
Matière	Résine PU verte densité 0.65	
Epaisseur des couches	19 mm	
Epaisseur de maintien	1 mm	
Emboîture	Décalage Hauteur	0.8 mm 1 mm
	Jeu Ajustement	0.2 mm 0.065 mm
Nombre de strates	4	
Diamètre de l'outil	3 mm	
Observations		



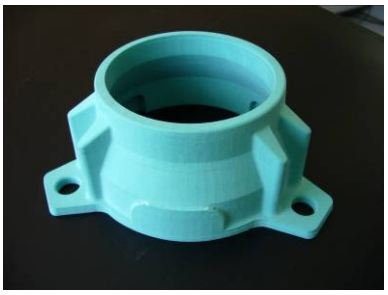
Modèle



Strate n°1



Strate n°2



Pièce assemblée



Deux strates



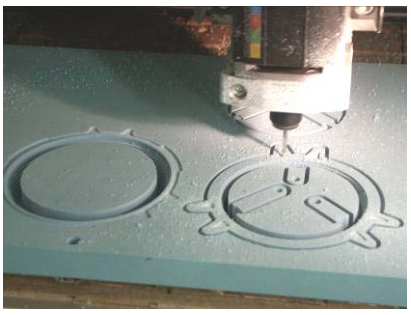
Emboîture verticale décalée



Emboîture mâle



Emboîture femelle

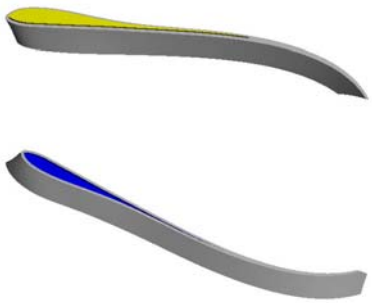


Usinage des emboîtures

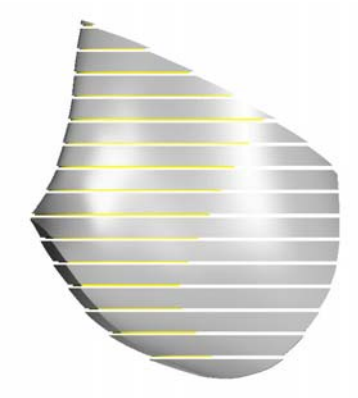
Modèle	**Pale**	
Type d'emboîtement	Emboîture Verticale Décalée	
Matière	PMMA transparent et aluminium	
Epaisseur des couches	12 mm	
Epaisseur de maintien	1 mm	
Emboîture	Décalage Hauteur	1 mm 1 mm
	Jeu Ajustement	0.3 mm 0.1 mm
Nombre de strates	15	
Diamètre de l'outil	2 mm	
Observations	Forme très galbée Paroi très fine sur l'ensemble de la pièce avec des épaisseurs variant de 1 à 12 mm	



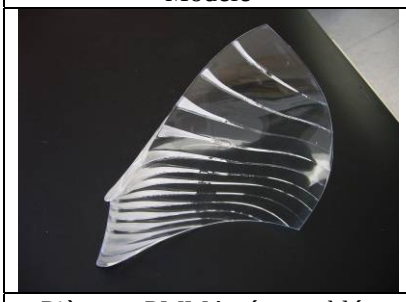
Modèle



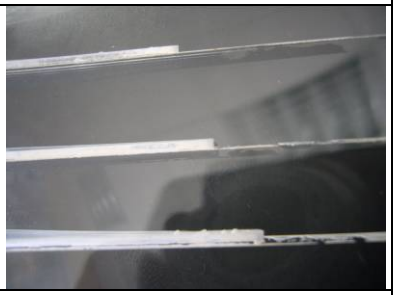
Strate n°9 & n°10



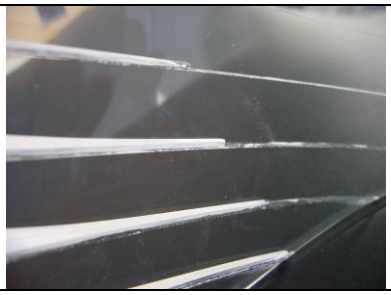
Ensemble des strates et emboîtures



Pièce en PMMA réassemblée



Détail de la profondeur de l'emboîture



Détail de l'emboîture verticale décalée



Pièce en aluminium assemblée

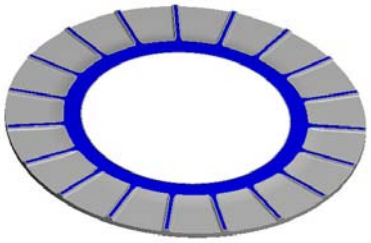


Profil de la pièce aluminium

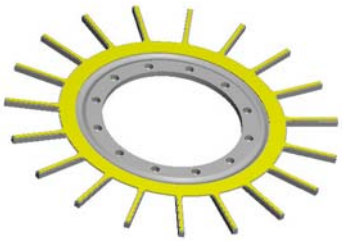
Modèle	**Turbine**	
Type d'emboîtement	Emboîture Verticale Décalée	
Matière	Aluminium	
Epaisseur des couches	10 et 12 mm	
Epaisseur de maintien	1 et 2 mm	
Emboîture	Décalage Hauteur	1.5 mm 1 mm
	Jeu Ajustement	0.2 mm 0.035 mm
Nombre de strates	8	
Diamètre de l'outil	2 mm	
Observations	Résistance mécanique nécessaire	



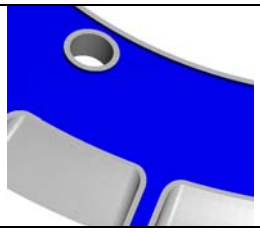
Modèle



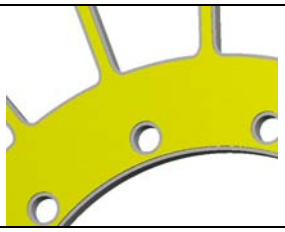
Strate n°1



Strate n°2



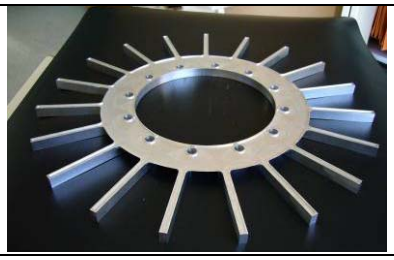
Détail sur une emboîture femelle



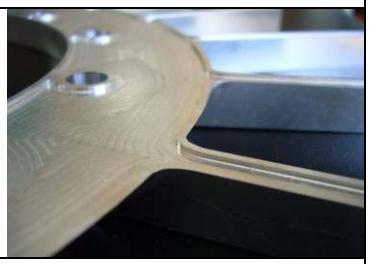
Détail sur une emboîture mâle



Pièce assemblée



Strate avec emboîture femelle verticale décalée



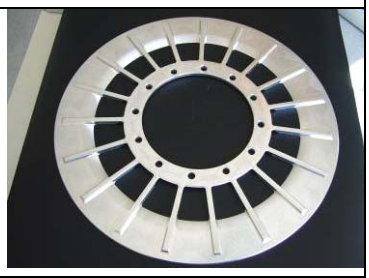
Détail emboîture femelle



Détail r-régularité mâle

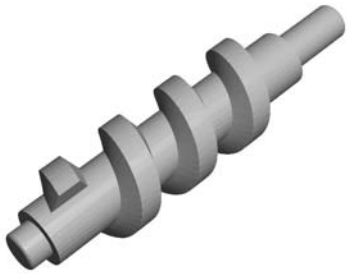


Détail r-régularité femelle

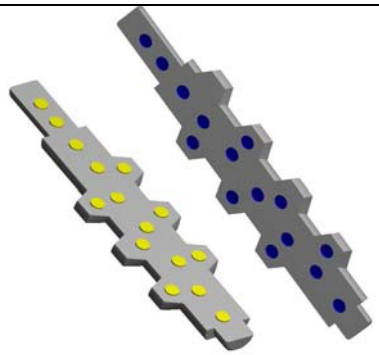


Strate avec emboîture mâle verticale décalée

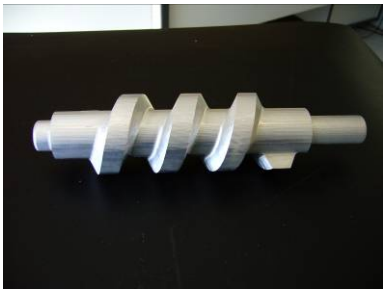
Modèle	**Vis sans fin**	
Type d'emboîtement	Plots et Logements	
Matière	Aluminium	
Epaisseur des couches	11 mm	
Epaisseur de maintien	1 mm	
Plots/Logements	Diamètre Hauteur	6 mm 1 mm
	Jeu Ajustement	0.25 mm 0.015 mm
Nombre de strates	6	
Diamètre de l'outil	4 mm	
Observations	Localisation par squelettisation	



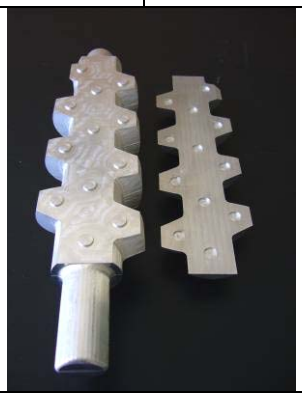
Modèle



Strate n°3 & n°4



Pièce assemblée



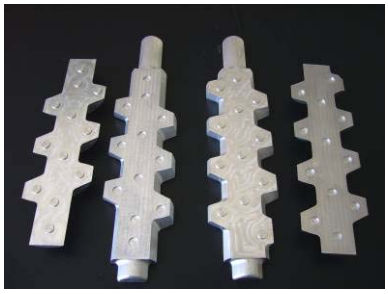
Deux strates avec plots et logements



Logements



Plots



Toutes les strates avec leurs entités d'assemblage



Au montage

Modèle	**Renacor**	
Type d'emboîtement	Plots et Logements	
Matière	Aluminium	
Epaisseur des couches	12 mm	
Epaisseur de maintien	1 mm	
Plots/Logements	Diamètre Nombre Hauteur	5 mm 3 1.3 mm
	Jeu Ajustement	0.15 mm 0.01 mm
Nombre de strates	2	
Diamètre de l'outil	4 mm	
Observations		



Modèle



Strate n°1



Strate n°2



Pièce assemblée



Deux strates avec 3 entités



3 logements cylindriques



3 plots

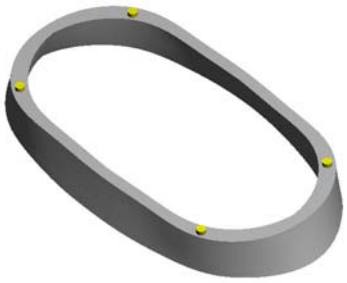
Modèle	**Flacon**	
Type d'emboîtement	Plots et Logements	
Matière	Résine PU densité 0.65	
Epaisseur des couches	10 mm	
Epaisseur de maintien	1 mm	
Plots/Logements	Diamètre Nombre Hauteur	4 mm 4 1 mm
	Jeu Ajustement	0.2 mm 0.025 mm
Nombre de strates	9	
Diamètre de l'outil	3 mm	
Observations	Prototype d'aspect	



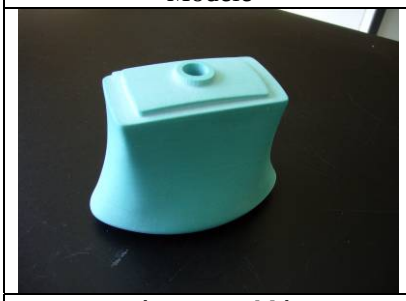
Modèle



Strate n°4



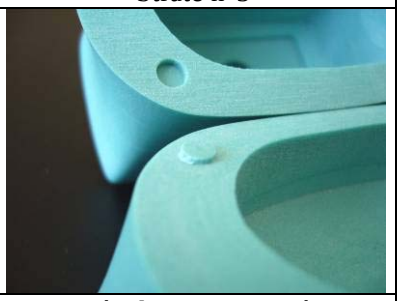
Strate n°3



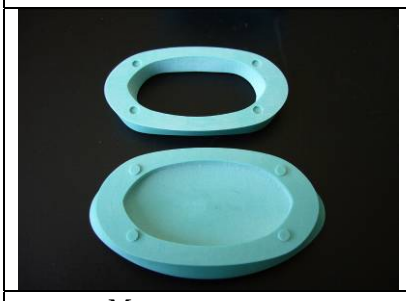
Pièce assemblée



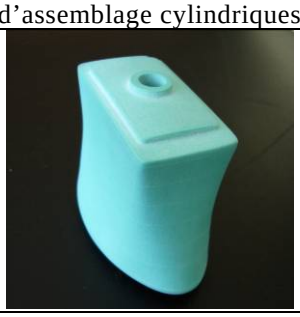
Deux parties avec 4 entités d'assemblage cylindriques



Détail sur une entité d'assemblage



Montage en cours

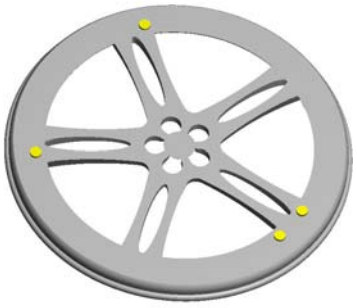


Pièce au final

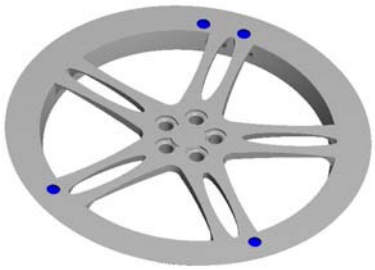
Modèle	**Jante**	
Type d'emboîtement	Plots et Logements	
Matière	Aluminium	
Epaisseur des couches	10 mm	
Epaisseur de maintien	1 mm	
Plots/Logements	Diamètre Nombre Hauteur	5 mm 4 1 mm
	Jeu Ajustement	0.2 mm 0.01 mm
Nombre de strates	7	
Diamètre de l'outil	2 mm	
Observations		



Modèle



Strate n°1



Strate n°2



Pièce assemblée



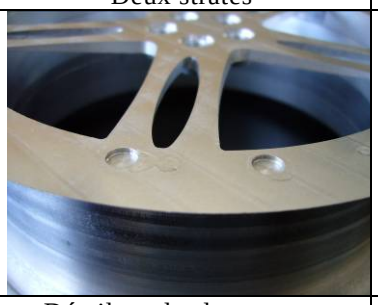
Deux strates



Strates avec 4 plots



Strate avec 4 logements



Détail sur les logements

Modèle	**Engrenage**	
Type d'emboîtement	Plots et Logements	
Matière	Aluminium	
Epaisseur des couches	12 mm	
Epaisseur de maintien	2 mm	
Plots/Logements	Diamètre Nombre Hauteur	5 mm 3/4 1.8 mm
	Jeu Ajustement	0.4 mm 0.015 mm
Nombre de strates	4	
Diamètre de l'outil	4.5 mm	
Observations	Canaux de graissage intégrés aux couches	



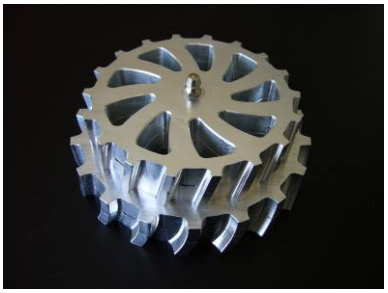
Modèle



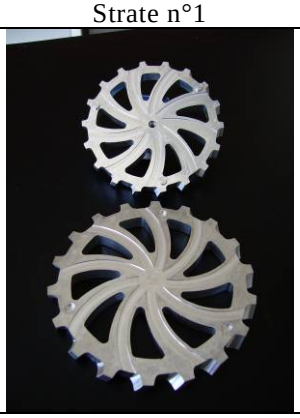
Strate n°1



Strate n°2



Pièces réassemblée



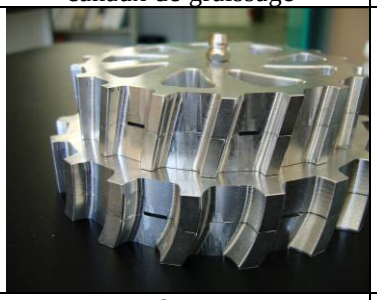
Deux strates avec 3 plots et canaux de graissage



4 plots males cylindriques



4 plots femelles cylindriques



canaux de graissage

7.3 Conclusion

Ces réalisations de pièces prototypes réelles, issues des contrats de R&D du CIRTES, nous ont permis de valider notre concept sur des pièces d'utilisation diverse : prototypes esthétiques, prototypes fonctionnels ou prototypes nécessitant une forte résistance mécanique. Nous avons validé les deux approches plots/logements et emboiture complète et nous avons pu contrôler la réalisation et l'assemblage de nos formes complémentaires générées automatiquement. Nous avons montré que certaines pièces ne permettant pas d'utiliser les techniques d'assemblage actuelles, notamment à cause des inserts, pouvaient être réalisées et assemblées par la technique de l'emboitement et ceci quelques soient leur géométrie. Nous allons dans le chapitre suivant dresser un bilan complet sur ces travaux.

8. Conclusion

8.1 TRAVAUX REALISES ET CONCLUSION

8.2 PERSPECTIVES

8.1 Travaux réalisés et conclusion

Les solutions de prototypage rapide et d'outillage rapide apportent aujourd'hui une réponse au besoin des industriels dans des délais de conception et d'industrialisation de plus en plus réduits pour le développement de produits nouveaux. Le procédé original de fabrication par couches solides de Stratoconception propose des solutions pour des gains de productivité pour de nombreuses applications, notamment pour les outillages. Des innovations du procédé permettent d'apporter cette valeur ajoutée au cœur des outillages, dans leur conception interne en parvenant à un refroidissement optimisé, à une aspiration mieux maîtrisée, et à une surveillance intégrée irréalisables par les procédés conventionnels.

Nous avons apporté notre contribution à ces travaux, par une recherche sur l'*intégration de fonctions avancées à l'inter-strate de pièces réalisées par le procédé de Stratoconception* en concevant et en développant les outils associés.

Nous avons souligné que l'assemblage du procédé reste encore une opération qui demande une intervention manuelle importante de l'utilisateur et que les techniques utilisées aujourd'hui ne garantissent pas toujours la répétabilité du système et peuvent entraîner une rupture de la chaîne numérique du procédé. Nous avons dressé un bilan des méthodes actuelles utilisées pour l'assemblage des strates en Stratoconception : le collage, le brasage, l'assemblage mécanique et les éléments de positionnement (inserts, pontets). Nous avons analysé leurs inconvénients, leurs difficultés de mise en œuvre et leurs limites.

Notre contribution a porté sur l'intégration de l'assemblage au sein des couches grâce à une nouvelle méthode d'assemblage par emboîtement. Nous avons présenté le principe de cette méthode et les éléments qui la composent : les entités d'assemblage. Nous avons défini leur forme, leur dimension, leurs ajustements et surtout leur positionnement au sein des couches. Pour cela, nous avons développé un système de génération automatique de ces entités dans le processus grâce à des outils permettant d'optimiser cette opération. Nous avons présenté diverses approches de localisation de nos entités

d'assemblage au travers d'algorithmes de placement par grilles, par forces de répulsion ou par un algorithme génétique. Nous avons analysé leurs avantages et inconvénients pour notre application. Nous avons également développé un algorithme original de localisation automatique des entités par squelettisation permettant l'optimisation du placement des entités par rapport à la géométrie des couches.
Une seconde approche a été mise en œuvre : l'emboîtement complet. Une unique emboîture est générée à partir des contours de l'inter-strate. Elle a nécessité la création de formes mâles et femelles complémentaires et réalisables par l'outil d'usinage (problème d'accessibilité de l'outil).
Le choix entre les deux solutions proposées est fait suivant les besoins de l'application de la pièce et de sa géométrie. L'emboitement complet permet de résoudre la problématique du flipot, d'augmenter la résistance mécanique sur la totalité de la pièce, d'éviter le délaminage même pour des pièces à parois fines et d'ajouter des fonctionnalités d'étanchéité ou de collage entre les strates. La solution des plots et des logements, quant à elle, sera préférée pour un assemblage plus précis en maitrisant mieux les ajustements et en permettant un montage plus aisé. De plus la surface d'inter-strate étant conservée, elle permet une combinaison simple avec les solutions actuelles pour les canaux de busage.
Enfin, nous avons pu valider notre concept avec les premiers résultats industriels grâce aux outils implantés dans le logiciel du procédé et au travers des contrats de R&D et des pièces réelles réalisées et assemblées par cette nouvelle méthode.
Grâce à ce nouveau concept d'assemblage, nous sommes parvenus à intégrer l'assemblage au sein des couches lors de leur fabrication. Par un système de génération automatique dans le processus, nous avons réduit la main d'œuvre pour le montage. L'assemblage, ainsi réalisé, minimise les interventions manuelles et les incertitudes dues au choix de l'utilisateur. La conception de l'assemblage est devenue ainsi une opération logicielle automatisée et systématique et a permis de simplifier l'opération manuelle.
Ces travaux ont conduit par leur originalité au dépôt de brevets internationaux (Barlier, 2003, Barlier, 2005b, Barlier, 2006) et à des publications pour des conférences et des revues internationales (Delebecque, 2007, Delebecque, submitted).

8.2 Perspectives

Les travaux de cette thèse se sont principalement concentrés sur la partie logicielle de la génération automatique du processus de l'emboîtement. Des travaux futurs pourront faire l'objet d'une recherche complémentaire notamment sur des aspects mécaniques, portant sur l'étude de la résistance

mécanique de l'emboîtement, sur la qualification géométrique des pièces ainsi obtenues, et plus spécialement, sur le tolérancement nécessaire aux ajustements des emboîtures. Ces travaux pourront également être poursuivis pour être appliqués au réassemblage de modèles 3D décomposés en plusieurs parties (Houtmann, 2007a, Houtmann, 2007b, Houtmann, submitted). Comme nous l'avons évoqué dans le paragraphe 6.5 (Emboîtement et perspectives pour les fonctions avancées page 141), une voie semble très prometteuse : le mixage de l'emboîtement et d'aménagements de canaux ou de logements pour l'intégration de fonctions nouvelles au cœur des prototypes. Elle permettra l'amélioration de la productivité et la conception de formes nouvelles de pièces, réduisant ainsi les contraintes technologiques actuelles.

Bibliographie

Antoine, J.-L., Dietsche, M., Delebecque, B. & Barlier, C. (1997) Intégration du Prototypage Rapide dans le domaine du Design - Application du procédé de Stratoconception, *Sixièmes Assises du Prototypage Rapide*, 2-3 Décembre 1997, Paris, France, AFPR.

Attali, D. (1995), "Squelettes et Graphes de Voronoi 2D et 3D", PhD thesis, Informatique, Joseph Fourier - Grenoble I, Grenoble, 175 pages.

Attali, D. (1997) r-Regular shape reconstruction from unorganized points, *13th ACM Symposium on Computational Geometry*, June 1997, Nice, France.

Attali, D., Boissonnat, J.-D. & Edelsbrunner, H. (2006 à paraitre), "Stability and computation of medial axes --- a state-of-the-art report." in EDS. T. MOELLER, B. H. A. B. R. (Ed.), *Mathematical Foundations of Scientific Visualization, Computer Graphics, and Massive Data Exploration*, Springer-Verlag.

Aurenhammer, F., (1991) "Voronoi Diagrams - A Survey of a Fundamental Geometric Data Structure", *ACM Computing Surveys*, vol 23, pp 345–406.

Barlier, C., (1991) "Procédé pour la création et la réalisation de pièces par C.A.O et pièces ainsi obtenues", Brevet N° 91-02437**,** France.

Barlier, C., (1998) "Procédé de réalisation de pièces mécaniques, en particulier de prototypes, par décomposition en strates, strates élémentaires obtenues selon le procédé et pièces mécaniques ainsi obtenues", Brevet N° 98 14687**,** France.

Barlier, C. & Wadsworth, A., (2000) "Dispositif pour la réalisation de plaques destinées à un procédé de prototypage rapide, procédé d'usinage et d'assemblage desdites plaques et pièces prototypes ainsi obtenues", Brevet N° 0006181**,** France.

Barlier, C., Cunin, D. & Delebecque, B., (2003) "Procédé pour l'optimisation des joints de strates dans une modélisation ou prototypage par décomposition en strates et pièces ainsi obtenues", Brevet N° FR2834803**,** France.

Barlier, C. (2004a), Conception en Mécanique Industrielle : Calculs-Agencement-Prototypage Dunod.

Barlier, C., Cunin, D. & Delebecque, B., (2004b) "Procédé pour l'optimisation des joints de strates dans une modélisation ou prototypage par décomposition en strates et pièces ainsi obtenues", Brevet N° 02 00514**,** France.

Barlier, C., Pelaingre, C., Cunin, D. & Levaillant, C., (2004c) "Pièce mécanique avec au moins un circuit de transport de fluide et son procédé de conception par strates", Brevet N° 02 12389**,** France.

Barlier, C., Catoire, D., Cunin, D. & Desbordes, G., (2005a) "Procédé de modification localisée d'un dispositif de moulage stratifié et insert de modification localisée dans une strate", Brevet N° 0508251**,** France.

Barlier, C., Cunin, D. & Delebecque, B., (2005b) "Method of Optimising the Joints Between Layers in Modelling or Prototyping Involving Layer Decomposition and Parts Thus Obtained", Brevet N° WO2004079463**,** European.

Barlier, C., Delebecque, B. & Cunin, D., (2006) "Method of Optimising the Joints Between Layers in Modelling or Prototyping Involving Layer Decomposition and Parts Thus Obtained", Brevet N° US2006142884**,** United States.

Barth, A., Abel, C., Barlier, C. & Poirier, P. (2000) OrthoStrato concept : une station de prototypage rapide dédiée à l'orthopédie, *8èmes Assises du Prototypage Rapide*, 3-4 Mai 2000, CNIT, La Défense, Paris, AFPR.

Barthelemy, S. (2000), Algorithmes Génétiques, http://barth.netliberte.org/ia/ag.html.

Bénazet, D. (1994), "Les Différents Procédés d'Assemblage", in DUNOD (Ed.), *Conception en Mécanique Industrielle - Les Référenciels DUNOD*.

Berg, D., Kreveld, V., Overmars & Schwarzkopf, O. (2000), "Voronoi Diagrams - The Post Office Problem", *Computational Geometry - Algorithms and Applications,*, second revised edition ed., Springer.

Bernard, A. & Taillandier, G., (1998), Le Prototypage Rapide, Hermès.

Bonaldi, P., Barlier, C. & Delebecque, B. (1997) Examination of the different algorithms improving placing and reducing machining time in the Stratoconception Rapid Prototyping Process, *6th European Conferences on Rapid Prototyping and Manufacturing*, July, 1-3 1997, Nottingham, England.

Brass, P., Rote, G. & Sanepoel, K. J., (2001) "Triangles of Extremal Area or Perimeter in a Finite Planar Point Set", *Discrete and Computational Geometry*, vol 26, pp 51-58.

Brost, R. C. & Goldberg, K. Y., (1996) "A Complete Algorithm for Designing Planar Fixtures Using Modular Components", *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, vol 12, pp 31-46.

Burley, G., Naing, S., Odi, R. & Corbett, J. (2001) J.A.M. PROJECT (Jigless Aerospace Manufacture), JAM/PR/1, Cranfield, School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield University

Chan, C. K. & Tan, S. T., (2003) "Generating Assembly Feature onto Split Solid Models", *Computer Aided Design*, vol 35, pp 1315-1336.

Chassignet, P. (1999), Enveloppe convexe d'un ensemble de points du plan, Ecole Polytechnique, http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Philippe.Chassignet/98-99/TD/td__10.html.

Chazal, F., Cohen-Steiner, D., Lieutier, A. & Thibert, B. (2006) Shape Smoothing using Double Offsets, RR-5991 INRIA

Chen, Y., Wang, H., Rosen, D. W. & Rossignac, J. (2005) Filleting and Rounding Using a Point-based Method, *ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, September 24-28, 2005, Long Beach, California, ASME.

CIRTES (2004) FASTOOL - Development of an advanced strata technique dedicated to rapid tooling - Final report, CONTRACT N° : G1ST-CT-2001-50133, EUROPEAN COMMUNITY, CRAFT Project N° : CRAF-1999-70789

CIRTES (2006) Manuel de Formation - Stratoconcept III, Logiciel de Prototypage et Outillage Rapide, Saint-Dié-des-Vosges, CIRTES

Crossno, P. & Angel, E. (1997) Isosurface Extraction Using Particle Systems, *8th IEEE Conference on Visualization '97*, Phoenix, Arizona, United States IEEE Computer Society Press

Cunin, D., Barlier, C., Delebecque, B., Maucourt, J.-M., Craipeau, P., Gunther, C., Jungo, N. & Lyet, D. (1996) Application du procédé de prototypage rapide par Stratoconception au développement de produits nouveaux - Un exemple d'ingénierie simultanée appliqué à une balayeuse de voirie, *MICAD*, 13 Février 1996, Paris, France.

Cunin, D. & Charbonneau, S. (1998) Utilisation du procédé de Stratoconception® pour la réalisation de moules de thermoformage, *Septièmes Assises Européennes du Prototypage Rapide*, 19-20 novembre 1998, Paris, AFPR.

Cunin, D. & Duval, A. (2005) Outillage Rapide pour la Fabrication de Pièces Moteur Automobiles, *11ème Assises Europeennes du Prototypage Rapide*, Maison de la mécanique, Courbevoie, France.

D'Souza, R. M., Sequin, C. & Wright, P. K., (2004) "Automated Tool Sequence Selection for 3-axis machining of Free-Form Pockets", *Computer-Aided Design*, vol 36, pp 595-605.

Daumain, R. (1982), "Assemblage des Pièces Métalliques", *Techniques de l'Ingénieur*, Editions Techniques de l'Ingénieur.

Delebecque, B., Barlier, C., Bouvier, N. & Lyet, D. (1995) Une nouvelle station de Prototypage Rapide par Stratoconception et microfraisage rapide de matériaux légers, *4th European Conferences on Rapid Prototyping*, 4-5 Octobre 1995 Paris, France, AFPR.

Delebecque, B., Weinstoerffer, M., Barlier, C. & Hoffschir, D. (1997) Evolution du procédé de Stratoconception - Station CHARLYROBOT Stratoconcept-PC version II, *Sixièmes Assises du Prototypage Rapide*, 2-3 Décembre 1997, Paris, France, AFPR.

Delebecque, B., Barlier, C. & Abel, C. (1999a) Research into surface reconstruction algorithms intended for complex layers in 5 axis ultra high speed machining for the Stratoconception process, *8th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, July 6-8th, 1999, Nottigham, England, The University of Nottingham.

Delebecque, B., Barlier, C. & Dussert, P. (1999b) Procédé de Stratoconception : de nouvelles stations orientées vers l'outillage rapide, *7èmes Assises Européennes du Prototypage Rapide*, 19-20 Novembre 1999, Paris, France, AFPR.

Delebecque, B., Abel, C., Gendre, J., Barlier, C. & Bernard, A. (2000a) Usinage de couches complexes en UTGV 5 axes pour le procédé de Stratoconception, Analyse du pilotage machine et algorithmes associés, *Conférence Internationale sur la Conception et la Fabrication Intégrées en Génie Mécanique, Forum SCGM 2000, IDMME 2000*, 16 au 19 Mai 2000 Montréal, Québec, Canada.

Delebecque, B., Lauvaux, G. & Barlier, C. (2000b) Stratification Adaptative, *8èmes Assises Européennes du Prototypage Rapide*, 3-4 Mai 2000, CNIT, La Défense, Paris, france, AFPR.

Delebecque, B., Abel, C. & Barlier, C. (2001) Stratoconception : 3ème génération – Nouvelle version du logiciel Stratoconcept et innovations procédés, *Euro-RP' 2001 – 9èmes Assises Européennes du Prototypage Rapide / 10th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, 7 et 8 Juin 2001, Paris, France, AFPR.

Delebecque, B., Houtmann, Y., Ris, G., Lauvaux, G. & Barlier, C. (2007) Un Algorithme Génétique pour l'Assemblage Appliqué à la Fabrication par Couches, *5ème Conférence Internationale sur l'Automatisation Industrielle*, 11-13 Juin 2007, Ecole de Technologie Supérieure, Montreal, Canada, Université du Québec.

Delebecque, B., Houtmann, Y., Lauvaux, G. & Barlier, C., (submitted) "Automated generation of assembly features in layered manufacturing", *Rapid Prototyping Journal*.

Deneux, D., (1999) "Introduction to Assembly features - An Illustrated Synthesis Methodology", *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol 10, pp 29-39.

Dhaliwal, S., Gupta, S. K., Huang, J. & Kumar, M., (2001) "A Feature-Based Approach to Automated Design of Multi-Piece Sacrificial Molds", *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol 1, pp 225-234.

Dragomatz, D. & Mann, S., (1997) "A Classified Bibliography of Literature on NC Milling Path Generation", *Computer Aided Design*, vol 29, pp 239-247.

Dupont (2003), "Techniques d'assemblage - Catégorie I - Vis, emmanchement à force, emboîtage élastique", *DuPont™ polymères techniques - Principes généraux de conception – Module I*, E.I. du Pont de Nemours and Company.

EFAC & Committee, E. F. A. (2003), Suppliers of Assembly and Handling Technology Build European Network, EFAC, www.efac.org.

Eppstein, D. (1991) New Algorithms for Minimum Area k-gons, Department of Information and Computer Science University of California, Irvine

Eskilander, S. (2001), "Design for Automatic Assembly", PhD Thesis, Departement of Production Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 189 pages.

Fanchon, J.-L., (1994), Guide des Sciences et Technologies Industrielles, AFNOR - Nathan.

FreeForm (2007), FreeForm Modeling, Sensable Technologies, http://www.sensable.com.

Heemskerk, C. J. M. (1990), "A Concept for Computer-Aided Process Planning for Flexible Assembly", PhD Thesis, Delft University, Netherlands, 276 pages.

Held, M., (1998) "Voronoi Diagrams and Offset Curves of Curvilinear Polygons", *Computer-Aided Design*, vol 30, pp 287-300.

Holland, W. V. (1997), "Assembly Features in Modelling and Planning", PhD thesis, Technische Universiteit Delft, Delft, 161 pages.

Holland, W. V. & Bronsvoort, W. F., (2000) "Assembly Feature in Modeling and Planning", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol 16, pp 277-294.

Houtmann, Y., Delebecque, B., Barlier, C. & Ris, G. (2007a) Decomposition applied to layered manufacturing using critical points, *1st DAAAM International Specialized Conference on Additive Technologies*, 20th April 2007, Celje, Slovenia.

Houtmann, Y., Delebecque, B., Lauvaux, G., Barlier, C. & Ris, G. (2007b) Une décomposition adaptée au prototypage rapide par l'exploitation de points critiques, *5ème Conférence Internationale sur l'Automatisation Industrielle*, 11-13 juin 2007, Ecole de Technologie Supérieure, Montréal, Canada, Université du Québec.

Houtmann, Y., Delebecque, B., Lauvaux, G. & Barlier, C., (submitted) "Decomposition applied to layered manufacturing using parting lines", *Computers in Industry*.

Hsu, W., Fuh, J. Y. H. & Zhang, Y., (1998) "Synthesis of Design Concepts from a Design for Assembly Perspective", *Computer Integrated Manufacturing Systems*, vol 11, pp 1-13.

Huang, J., Gupta, S. K. & Stoppel, K., (2003) "Generating sacrificial multi-piece molds using accessibility driven spatial partitioning", *Computer-Aided Design*, vol 35 pp 1147–1160.

Hughes, J. (2005), Technica, http://isodomos.com/technica/history/history.php.

IMTI, I. (2000) "Integrated Manufacturing Technology Roadmapping Project - Manufacturing Processes & Equipment", Oak Ridge, USA, IMTI, Inc., http://www.IMTI21.org

Inui, M. & Kimura, F. (1991) Algebraic Reasoning of Position Uncertainties of Parts in an Assembly, *ACM Symposium on Solid and Physical Modeling*, Austin, Texas, United States, ACM.

Jacobs, P. F. (1993), Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography Mcgraw-Hill

Jakiela, M. J. & Papalambros, P. Y. (1986) A Design For Assembly Optimal Sugestion Expert System, *7th international Conference on Assembly Automation*, Zurich, IFS Publications and Springer-Verlag, Berlin.

Janardan, R. & Woo, T. C. (2004), "Manufacturing Processes", in GOODMAN, J. E. & O'ROURKE, J. (Eds.), *Handbook of Discrete and Computational Geometry*, CRC Press, Boca Raton, FL.

Kulkarni, P., Marsan, A. & Dutta, D., (2000) "A Review of Process Planning Techniques in Layered Manufacturing", *Rapid Prototyping Journal*, vol 6, pp 18-35.

Lauvaux, G. (2005), "Réalisation d'oeuvres d'art par prototypage rapide avec le procédé de Stratoconception", PhD thesis, IFTS, Ecole Doctorale de l'Université de Reims, Charleville-Mézières, France, 204 pages.

Lee, A., Brink, J. & Anderson, D. (2003) Wire Path Rapid Tooling Process and Supporting Software Development, *DAC2003: 29th Design Automation Conference*, September 2-6, 2003, Chicago, Illinois, ASME.

Legardeur, J., Garreau, L. & Couture, N. (2003) Des interacteurs pour l'assemblage mécanique en CAO, *Electronical Proc. CPI'2003*, , 22-24 Octobre 2003, Meknes (Morocco), .

Leroy, P. & Tournier, H. (1982), "Assemblage des Pièces en Matières Plastiques", *Techniques de l'Ingénieur*, Editions Techniques de l'Ingénieur.

Liang, J. S. & Lin, A. C., (2003) "System development of adaptive spraying paths for rapid prototyping", *Rapid Prototyping Journal*, vol 9, pp 289-300.

Magnin, V. (2006), Optimisation et algorithmes génétiques, Polytech'Lille et IEMN ed., Cours et Ressources Pédagogiques en Ligne, UniversitySurf.net, http://magnin.plil.net.

Marsan, A. L., Kumar, V., Dutta, D. & Pratt, M. J. (1998) An Assessment of Data Requirements and Data Transfer Formats for Layered Manufacturing. in TECHNOLOGY, U. S. D. O. C.-N. I. O. S. A. (Ed.).

Memari, P. (2002) Calcul d'axes médians stables, Sophia Antipolis, Département d'Informatique, INRIA, Rapport de stage

Muller, F., Rigolet, F., Freneaux, O. & Barlier, C. (1996) Réalisation et validation d'un outillage de presse par prototypage rapide, *5TH EUROPEAN CONFERENCES ON RAPID PROTOTYPING,* 2/3 Octobre 1996, Centre International de l'automobile, Pantin, France.

Naing, S. (2004), "Feature Based Design for Jigless Assembly", PhD Thesis, School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield University, 283 pages.

Neuenschwander, T. R., (1988) "Method for manufacture of laminated parts ", Brevet N° 4738020**,** US.

Noort, A. & Bronsvoort, W. F., (1998) "Enhanced multiple-view feature modelling", *CAD Tools and Algorithms for Product Design,* pp 80-94.

O'Rourke, J. (1998), Computational Geometry in C (second edition), Cambridge University Press.

Ostrovsky-Berman, Y. (2005), "Shape and Position Uncertainty in Mechanical Assemblies", PhD Thesis, Computer Science Department Hebrew University, Jerusalem , Israel, 140 pages.

Pandey, P. M., Reddy, N. V. & Dhande, S. G., (2003) "Slicing procedures in layered manufacturing: a review", *Rapid Prototyping Journal,* vol 9, pp 274-288.

Pelaingre, C., Velnom, L., Barlier, C. & Levaillant , C. (2003) A cooling channels innovating design method for rapid tooling in thermoplastic injection molding, *VRAP 1st International – Conférence on Advanced Research In Virtual and Rapid Prototyping,* Leiria, Portugal.

Pelaingre, C. (2005), "Contribution au développement et à la modélisation d'outillage rapides obtenus par Stratoconception : application aux moules d'injection des thermoplastiques", PhD thesis, ENSTIMAC/CROMeP, Ecole Doctorale de l'Ecole des Mines de Paris, 264 pages.

Pirzadeh, H. (1999), "Computational Geometry with the Rotating calipers", Master of Science, School of Computer Science, McGill University, Montréal, Québec, 130 pages.

Priyadarshi, A. K. & Gupta, S. K., (2004) "Geometric algorithms for automated design of multi-piece permanent molds", *Computer-Aided Design* pp 241–260.

Renner, G. & Ekart, A., (2003) "Genetic Algorithms in Computer-Aided Design", *Computer-Aided Design,* vol 35, pp 709-726.

Reyne, M. (2001), "Procédés d'assemblage des plastiques", *Techniques de l'Ingénieur*, Editions Techniques de l'Ingénieur.

Ricatte, H. (2007) Comparatif des temps d'assemblage en Stratoconception, CIRTES, rapport interne

Rossignac, J. R. (1985), "Blending and Offsetting Solid Models", PhD, Univeristy of Rochester, New York, 183 pages.

Rossignac, J. R. & Requicha, A. A. G., (1986) "Offseting Operations in Solid Modelling", *Computer Aided Design,* vol 3, pp 129-148.

Schneider, F. (2005) "Tolérancement Géométrique Interprétation", Metz, IUFM DE LORRAINE - UNIVERSITÉ DE METZ, www.ac-nancy-metz.fr

Stratoconcept (2006), 27 rue d'Hellieulle, 88100 Saint-Dié-des-Vosges, France, http://www.stratoconcept.com.

Sung, R. C. W., Corney, J. R. & Clark, D. E. R. (2000) Octree Based Recognition of Assembly Features, *Proceedings of DETC00 ASME Design Engineering Technical*

Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 10-13 September, 2000, Baltimore, Maryland.

Thabourey, J. (2005) The MOLSTRA CRAFT Project and related thesis subject *Workshop on Formulation aspects and algorithmic issues in some casting simulation problematics,* 11 mars 2005, CIRTES, Saint-Dié-des-Vosges, France.

Thabourey, J., Barlier, C., Cunin, D., Chobaut, J. P., Ezo'o, G. & Brenot, P. (2006) Filière innovante de conception et de réalisation d'outillages de fonderie pour des pièces conventionnelles ou à forte valeur ajoutée, *Journée de la fonderie,* 18-19 octobre 2006, Nancy, France.

Tong, K., Lehtihet, E. A. & Joshi, S., (2003) "Parametric error modeling and software error compensation for rapid prototyping", *Rapid Prototyping Journal*, vol 9, pp 301-313.

Toussaint, G. (1983) Solving Geometric Problems with the Rotating Calipers, *Proceedings of IEEE MELECON'83,* May 1983, Athens, Greece.

Uznanski, D. (2002), Grid, Eric W. Weisstein ed., MathWorld -A Wolfram Web Resource, http://mathworld.wolfram.com/Grid.html.

Wallack, A. & Canny, J. (1994) Planning for modular and hybrid fixtures, *International Conference on Robotics and Automation,* May 1994, San Diego, CA, USA.

Watanabe, Y., Ikegami, Y., Yamazawa, K. & Murakami, Y., (2006) "World of Scientific Puzzle Art Using Layer Manufacturing", *Forma,* vol 21, pp 37–48.

Whitley, D., (2001) "An Overview of Evolutionary Algorithms: Practical Issues and Common Pitfalls", *Journal of Information and Software Technology* vol 43, pp 817-831.

Whitley, D. & Rowe, J. (2005) Gray, Binary and Real Valued Encodings: Quad Search and Locality Proofs, *Foundations of Genetic Algorithms, 8th International Workshop, FOGA 2005,* January 5-9, 2005, Aizu-Wakamatsu City, Japan.

Williams, J. & Rossignac, J. (2004a) Mason: Morphological simplification, Technical Report GIT-GVU-04-05, Atlanta, GA, Graphics Visualization and Usability Center, Georgia Institute of Technology

Williams, J. & Rossignac, J. (2004b) Tightening: Curvature-Limiting Morphological Simplification, *14th Annual Fall Workshop on Computational Geometry,* November 2004, MIT. Boston.

Williams, J. & Rossignac, J., (2005) "Mason: morphological simplification", *Graphical Models*, vol 67, pp 285-303.

Wu, F.-C., Ma, W.-C. & Ouhyoung, M. (2003) Skeleton Extraction of 3D Objects with Visible Repulsive Force, *Computer Graphics Workshop 2003*, Hua-Lien, Taiwan.

Yang, Z. Y., Chen, Y. H. & Sze, W. S., (2001) "Determining Build Orientation for Layer-Based Machining", *The International Journal of Advanced Manufacturing technology,* vol 18, pp 313-322.

Index

A

accessibilité de l'outil · 121
algorithme génétique · 91, 95, 96, 100, 101, 102
angle bissecteur · 108
assemblage · 11, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 42, 47, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 73, 74, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 85, 101, 102, 105, 118, 127, 138, 140, 142, 143, 144
  mécanique · 18, 26, 30

B

brasage · 17, 18, 26, 28, 29, 30, 36, 37, 38, 39, 40, 50, 140

C

canaux · 48, 138, 139, 140
CAO · 11, 12, 13, 14, 15, 17, 24, 30, 36, 49, 61, 62, 81, 118, 119, 135
chromosome · 96, 97
codage Gray · 98
collage · 18, 26, 27, 28, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 49, 50, 51, 65, 140
croisement · 95, 96, 97

D

DFA · 19
distance de Hamming · 98

E

élagage
  méthode d' · 107
éléments d'assemblage · 16
emboîtage · 53
emboîtement · 54, 55, 56, 57, 59, 64, 70, 71, 77, 120, 124, 130, 131, 132, 135, 139, 142, 144
emboiture · 20, 54, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 136, 137, 139, 143, 144
  verticale décalée · 123, 124, 125, 144
  verticale simple · 121, 122, 123, 124, 125
  verticale variable · 124, 125
entités d'assemblage · 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 68, 70, 71, 73, 77, 78, 79, 81, 100, 103, 117, 118, 142, 144
entités de liaisons (voir entités d'assemblage) · 58
enveloppe convexe · 91, 92, 94
épaisseur de maintien · 68, 69, 70, 75
épaisseur locale (voir incidence) · 105, 106, 130

F

fabrication par couches (voir prototypage rapide) · 13
flipot · 39, 122, 124
fonction d'adaptation · 96, 98, 100
fonctions avancées · 120, 138
forces de répulsion · 79, 87, 88, 89

G

génération automatique de parcours d'outil · 14
génération automatique de processus · 11, 13, 14, 15, 21
grille · 40, 79, 81, 82, 83, 84, 85, 102, 104, 112, 113, 114, 118, 143

I

imbrication · 56, 63, 66, 100, 119, 121, 123, 131, 137, 140, 142
incidence · 104, 106, 107, 109, 110, 111, 112, 114, 115, 117
individu · 95, 96, 98
inserts · 13, 16, 17, 23, 24, 34, 35, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 53, 65, 83, 142
  non débouchant · 44, 45, 53
inter-strate · 32, 36, 45, 48, 56, 57, 59, 64, 66, 70, 71, 73, 74, 75, 83, 85, 87, 117, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 131, 136, 138, 139, 140, 142
  surface d' · 31, 56, 57, 59, 73, 74, 77, 78, 84, 85, 131

L

localisation · 55, 57, 58, 64, 73, 78, 79, 80, 82, 84, 85, 86, 88, 89, 91, 94, 99, 101, 102, 104, 105, 116, 117, 118, 125, 143
logement · 40, 43, 44, 45, 56, 57, 65, 66, 67, 68, 73, 74, 76, 121, 122, 123, 126, 129, 130, 134, 136, 137, 143

M

mutation · 96, 97

O

outillage rapide · 20, 33

P

parois fines
  pièces à · 31, 41, 42, 113, 114, 129
plot · 56, 57, 65, 66, 67, 68, 73, 74, 75, 76, 77, 81, 112, 120, 121, 122, 123, 126, 129, 131, 134, 136, 137, 138, 143
pontets · 16, 17, 24, 35, 39, 41, 42, 43, 47, 48, 50, 142
population · 95, 96, 97, 98, 100
prototypage rapide · 11, 12, 13, 15, 20, 51, 118

R

retournement · 16, 68, 122, 123
rotating calipers · 93
r-régulière · 120, 134, 135, 136, 137

S

squelette · 87, 89, 103, 104, 105, 106, 107, 109, 112, 113, 114, 115, 116, 118
squelettisation · 104, 105, 117, 118, 143
STL · 15, 117
stratoconcept
  logiciel · 11, 14, 15, 16, 17, 117, 142
Stratoconception
  procédé de · 11, 12, 13, 14, 15, 17, 20, 21, 24, 27, 30, 157

T

techniques d'assemblage · 18, 35, 39, 47

U

usinage recto/verso · 16, 44

V

Voronoi
  digramme de · 106, 107, 109

Z

zone de couverture (voir zone de maintien) · 113
zone de maintien · 104, 105

Annexe I

Brevet français d'invention intitulé : *Procédé pour l'optimisation des joints de strates dans une modélisation ou prototypage par décomposition en strates et pièces ainsi obtenues*, Brevet N° FR2834803, France.

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) **N° de publication :** **2 834 803**

(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) **N° d'enregistrement national :** **02 00514**

(51) Int Cl[7] : **G 05 B 19/4099**

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) **Date de dépôt :** 16.01.02.

(30) **Priorité :**

(43) **Date de mise à la disposition du public de la demande :** 18.07.03 Bulletin 03/29.

(56) **Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire** : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

(60) **Références à d'autres documents nationaux apparentés :**

(71) **Demandeur(s) :** *CIRTES SRC Société anonyme* — FR.

(72) **Inventeur(s) :** BARLIER CLAUDE, CUNIN DENIS et DELEBECQUE BENOIT.

(73) **Titulaire(s) :**

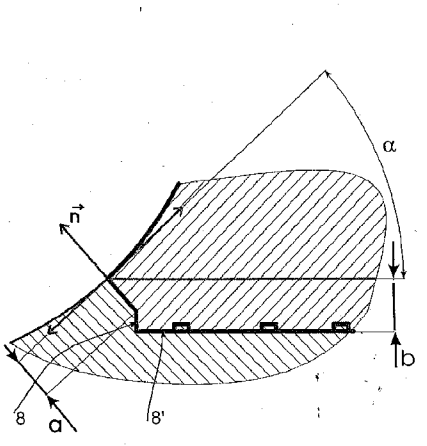
(74) **Mandataire(s) :** CABINET POUPON.

(54) PROCEDE POUR L'OPTIMISATION DES JOINTS DE STRATES DANS UNE MODELISATION OU PROTOTYPAGE PAR DECOMPOSITION EN STRATES ET PIECES AINSI OBTENUES.

(57) Procédé pour l'optimisation des joints de strates dans leur partie affleurant en surface d'une pièce obtenue par modélisation ou prototypage du type décomposition en strates assistée par ordinateur, caractérisé en ce que le profil de liaison de deux strates successives est mathématiquement et numériquement défini en mettant en oeuvre un algorithme dans lequel la surface du joint (7) au niveau de la zone d'extrémité à proximité de la partie venant en affleurement est toujours sensiblement normale

$\vec{n}$

au plan tangent à la surface au point d'affleurement.
Application: prototypage, modélisation, ou outillage.



FR 2 834 803 - A1

La présente invention a pour objet un procédé pour l'optimisation des joints de strates dans leur partie affleurant en surface d'une pièce obtenue par modélisation ou prototypage du type décomposition en strates assistée par ordinateur.

L'invention a également pour objet les strates élémentaires ainsi obtenues, ainsi que les pièces résultant de leur assemblage.

Dans un procédé de type connu de prototypage rapide, objet par exemple du brevet européen EP 0 585 502 –B1, on réalise une pièce prototype en mettant en œuvre un logiciel de décomposition de la pièce à réaliser en strates élémentaires, lesdites strates étant assemblées entre elles puis l'assemblage final pouvant être repris extérieurement en particulier pour enlever les éventuelles aspérités ou imperfections d'assemblage.

On a représenté aux figures 3 et 4 schématiquement un détail d'assemblage de strates avec illustration du problème rencontré.

Dans un assemblage de deux strates (1,2) une partie du joint (3) vient affleurer en extérieur selon (4). On comprend que la zone (5) de la strate (1) comporte à cet endroit peu de matière, ce qui par usinage, polissage, peut entraîner un enlèvement de matière au niveau précisément de ce joint comme représenté schématiquement à la figure 4 en (6).

Il en découle une pièce imparfaite, à surface non régulière et donc non satisfaisante pour certaines applications.

Cette conception de joint classique présente en outre d'autres inconvénients :

- faible résistance ;
- mauvaise tenue à l'usinage ;
- mauvaise tenue aux sollicitations mécaniques lors de l'utilisation (en particulier sollicitations à la pression, qu'elle soit d'origine mécanique ou fluidique) ;
- mauvaise tenue à toutes les opérations d'assemblage : collage, soudure, masticage ;
- déformations possibles lors de l'usinage, des manipulations et lors de l'assemblage.

L'invention a pour objet de remédier à ces inconvénients.

Conformément à l'invention on propose en effet un procédé pour l'optimisation des joints de strates dans leur partie affleurant en surface d'une pièce obtenue par modélisation ou prototypage du type décomposition en strates assistée par ordinateur, caractérisé en ce que le profil de liaison de deux strates successives est mathématiquement et numériquement défini en mettant en œuvre un algorithme dans lequel la surface du joint au niveau de la zone d'extrémité à proximité de la partie venant en affleurement est toujours sensiblement normale au plan tangent à la surface au point d'affleurement.

On comprendra mieux l'invention à l'aide de la description faite ci-après d'un certain nombre de variantes de mise en œuvre, en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1A et une représentation en CAO d'une pièce complexe à réaliser, avec quelques variantes de situation possibles,
- la figure 1B illustre en CAO une strate obtenue avec le procédé de l'invention, illustrant celle-ci en trois dimensions,
- les figures 2A et 2B représentant une strate obtenue conformément à l'invention, vue de dessus (fig. 2A), et coupe (fig. 2B),
- les figures 3,4 illustrent des problèmes rencontrés potentiellement avec les strates de l'art antérieur,
- les figures 5 et 6 illustrent schématiquement le principe de base du procédé selon l'invention,
- les figures 7, 8A, 8B, 8C illustrent des variantes simples de mise en œuvre,
- la figure 9 illustre une application à des profils en dépouille et/ou contre-dépouille,
- la figure 10 illustre un détail sur strate d'un assemblage selon la figure 9,
- la figure 11 illustre un détail sur strate d'un assemblage en contre-dépouille selon la figure 9, avec deux variantes,
- les figures 12A à F illustrent l'application à une paroi.

On se réfère tout d'abord à la figure 5.

On a indiqué sur la figure les paramètres essentiels d'un joint obtenu conformément au procédé de l'invention :

- angle α entre la tangente et le plan de strate,
- a : longueur du joint
- b : décalage du plan de strate,
- $\vec{n}$: normale au point de jonction.

Selon l'invention, le joint (7) est normal au plan tangent (T) sur une longueur a.

On notera que :

- si a est constant, b est f (α) ;
- si $\alpha = \pi/2$, b = 0.

On résout ainsi le problème du joint, tel qu'exposé ci-dessus, mais les strates ainsi obtenues nécessitant ce type de calcul, seront d'épaisseur variable.

En outre, le profil de la strate est variable tout au long de la périphérie. De plus, la ligne de joint n'est pas nécessairement dans un même plan.

Pour des angles α proches de $\pi/2$, il faudra en outre prévoir des moyens de positionnement relatif des strates entre elles, comme explicité ci-après.

On se référera à la figure 6.

Toutes choses égales par ailleurs par rapport à la réalisation de la figure 5, on réalise :

- une maîtrise de la matière au niveau du joint (but recherché),
- une maîtrise du positionnement en (X,Y) par un insert de centrage (8),
- une maîtrise de la précision en (Z) par le profil de positionnement (8'),
- maîtrise et renforcement de l'assemblage et de sa tenue mécanique.

Différentes remarques peuvent être apportées à cet égard :

- le profil de positionnement est calculé par rapport au contour extérieur de la strate, l'angle α étant variable le long de ce contour ;
- le profil peut être obtenu en microfraisage, en fraisage du profil ou à l'aide d'une fraise de forme. Dans ce dernier cas, il est bien entendu constant sur la périphérie ;
- l'emboîture est hyperstatique ; il est possible d'y prévoir des jeux pour privilégier certains contacts.

Différentes variantes seront décrites brièvement ci-après :

- à la figure 7, l'emboîture est rendue indémontable par la présence d'une contre-dépouille (β) sur le profil de positionnement (9), le montage étant possible du fait de l'élasticité des matériaux ;
- comme visible sur les figures 8A, 8B et 8C, il est également possible d'aménager le joint à l'extérieur en fonction du degré d'étanchéité recherché, à savoir :
    - pour amener de la matière en supplément ce qui entraîne un bourrelet extérieur par déformation : 8B puis 8C,
    - pour ménager une réserve de joint, figure 8A.

On a représenté aux figures 9, 10 et 11 des exemples d'application à des dépouilles et contre-dépouilles.

Les détails sur strates aux figures 8 et 9 montrent que les décompositions sont possibles en dépouille et contre-dépouille, toujours avec le même principe de joint, le choix étant en outre possible concernant le côté de l'emboîture (strate supérieure ou inférieure), voire leur combinaison dans l'espace.

Enfin, on a représenté aux figures 12A à 12F des variantes d'application aux parois :

- sans emboîture : figure 12A ;
- avec emboîture extérieure seulement et plan : figure 12B ;
- avec emboîture extérieure et intérieure et plan : figure 12C ;
- avec emboîture extérieure et intérieure dans le même plan : figure 12D ;
- avec décomposition normale simple : figure 12 E ;
- avec emboîture double à décrochement : figure 12 F.

On constatera de ce qui précède que c'est la numérisation du profil qui permet d'obtenir un profil de liaison et d'imbrication mathématiquement défini, paramètré fonctionnellement.

Il n'y a aucune limite, le profil pouvant être gauche, les surfaces de joint pouvant être complexes et calculées.

On comprendra que l'innovation majeure réside dans le principe d'emboîtement, les formes étant complètement paramétrées et dépendant de la surface de section dans laquelle s'effectue l'imbrication ; il peut s'agir d'une surface plane mais aussi d'une surface gauche, comme illustrée aux figures 1B ; 2A et 2B.

Par la mise en œuvre d'un algorithme géométrique, la forme des joints d'imbrication est obtenue par calcul informatique systématique.

En conséquence, la forme du joint dépend du plan de stratification, et elle ne peut donc être connue à l'avance.

On pourra, au niveau des emboîtures, prévoir les parties fonctionnelles des fonctions induites dans la pièce finale, par exemple non limitatif, des canaux de régulation (refroidissement, chauffage, etc...) et/ou d'amenée de produits d'assemblage et/ou de circulation de fluides.

Ce procédé trouve son application dans tous les domaines de la conception de pièces par strates par prototypage et outillage rapide déjà évoqués, avec toutes les extensions possibles imaginables par l'homme de l'art pour la décomposition de pièce existante ou pour la conception de nouvelles pièces.

REVENDICATIONS

1. Procédé pour l'optimisation des joints de strates dans leur partie affleurant en surface d'une pièce obtenue par modélisation ou prototypage du type décomposition en strates assistée par ordinateur, caractérisé en ce que le profil de liaison de deux strates successives est mathématiquement et numériquement défini en mettant en œuvre un algorithme dans lequel la surface du joint (7) au niveau de la zone d'extrémité à proximité de la partie venant en affleurement est toujours sensiblement normale $\vec{n}$ au plan tangeant à la surface au point d'affleurement.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que le profil de chaque strate est variable tout au long de la périphérie.
3. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que l'emboîture de deux strates superposées est rendue indémontable par la présente d'une contre dépouille (β) sur un profil de positionnement (9).
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que le joint est réalisé avec apport de matière en supplément ou réserve de joint.
5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que les profils sont adaptés à la dépouille et contre dépouille.
6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que l'on réalise une maîtrise du positionnement en (X,Y) par un insert de centrage (8) et en (Z) par un profil de positionnement (8').
7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que l'emboîture est hyperstatique.
8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que l'angle α entre la tangente T et le plan de strate n'est pas constant tout au long d'un même profil de joint.
9. Strate élémentaire, caractérisée en ce qu'elle est obtenue par la mise en œuvre du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8.

10. Pièce de modélisation, de prototypage ou d'outillage, caractérisée en ce qu'elle est obtenue par l'assemblage des strates selon la revendication 9.

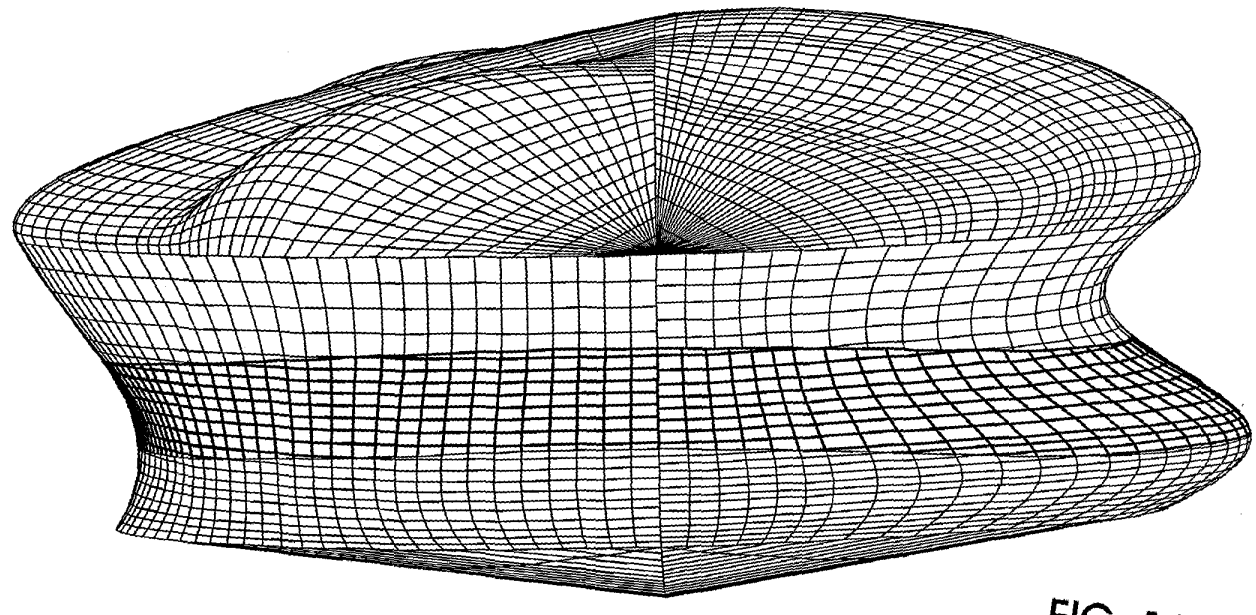


FIG. 1A

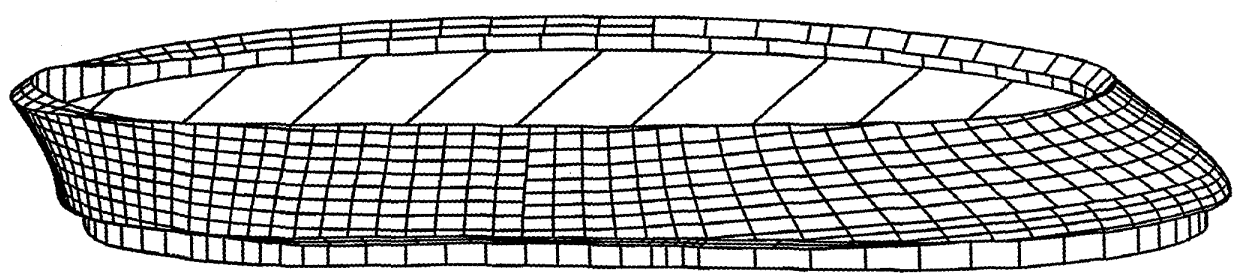


FIG. 1B

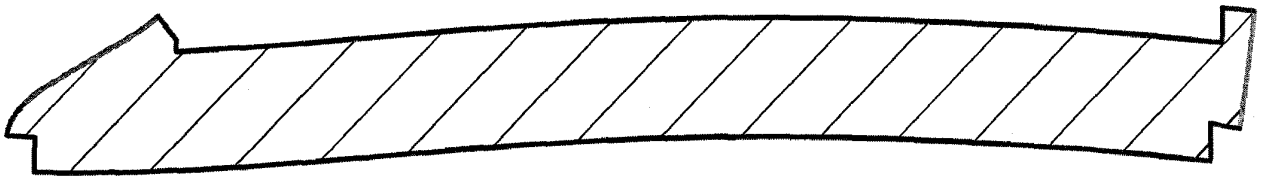


FIG. 2B

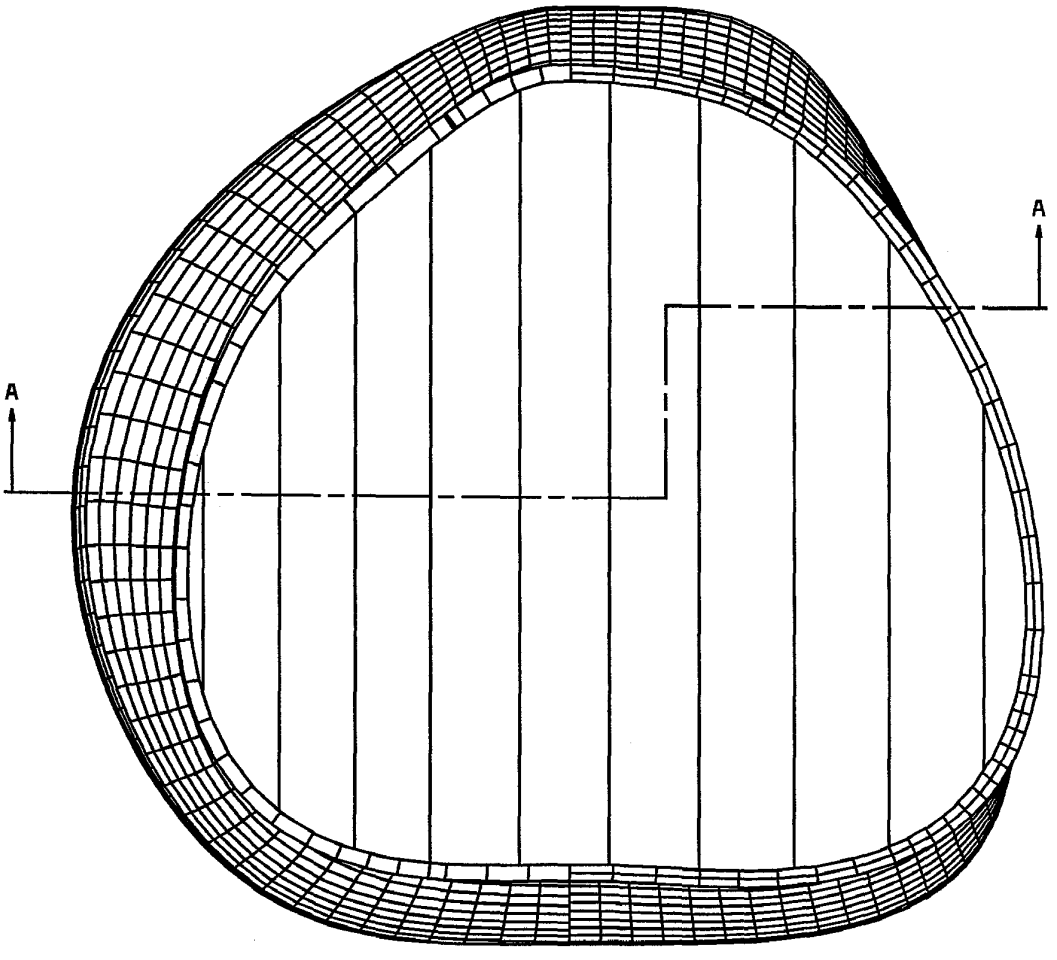


FIG. 2A

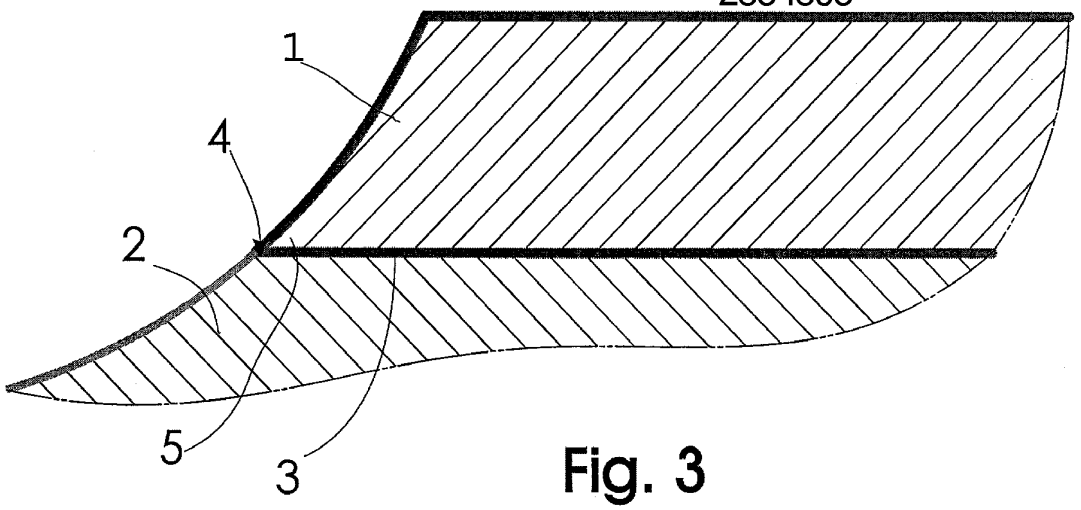


Fig. 3

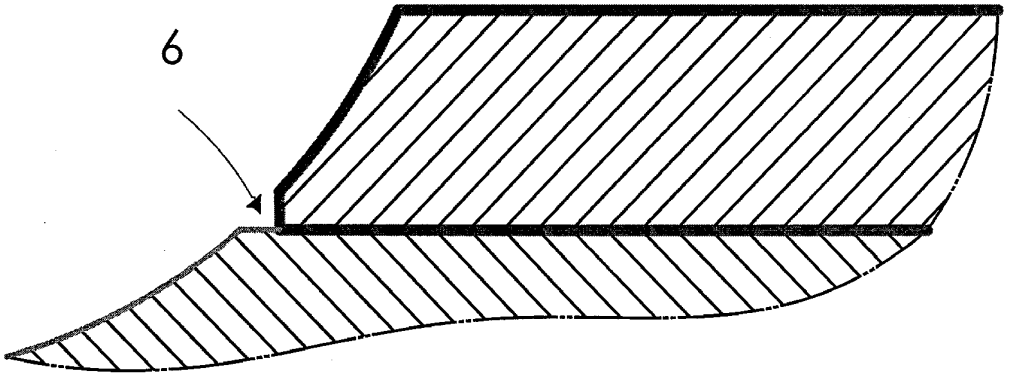


FIG. 4

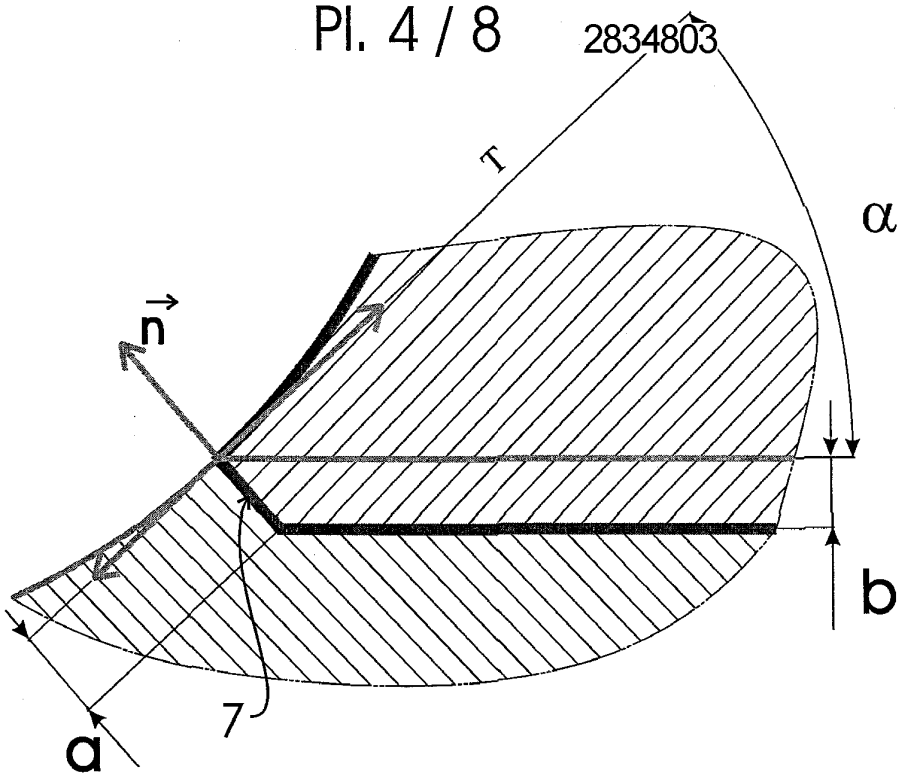


FIG. 5

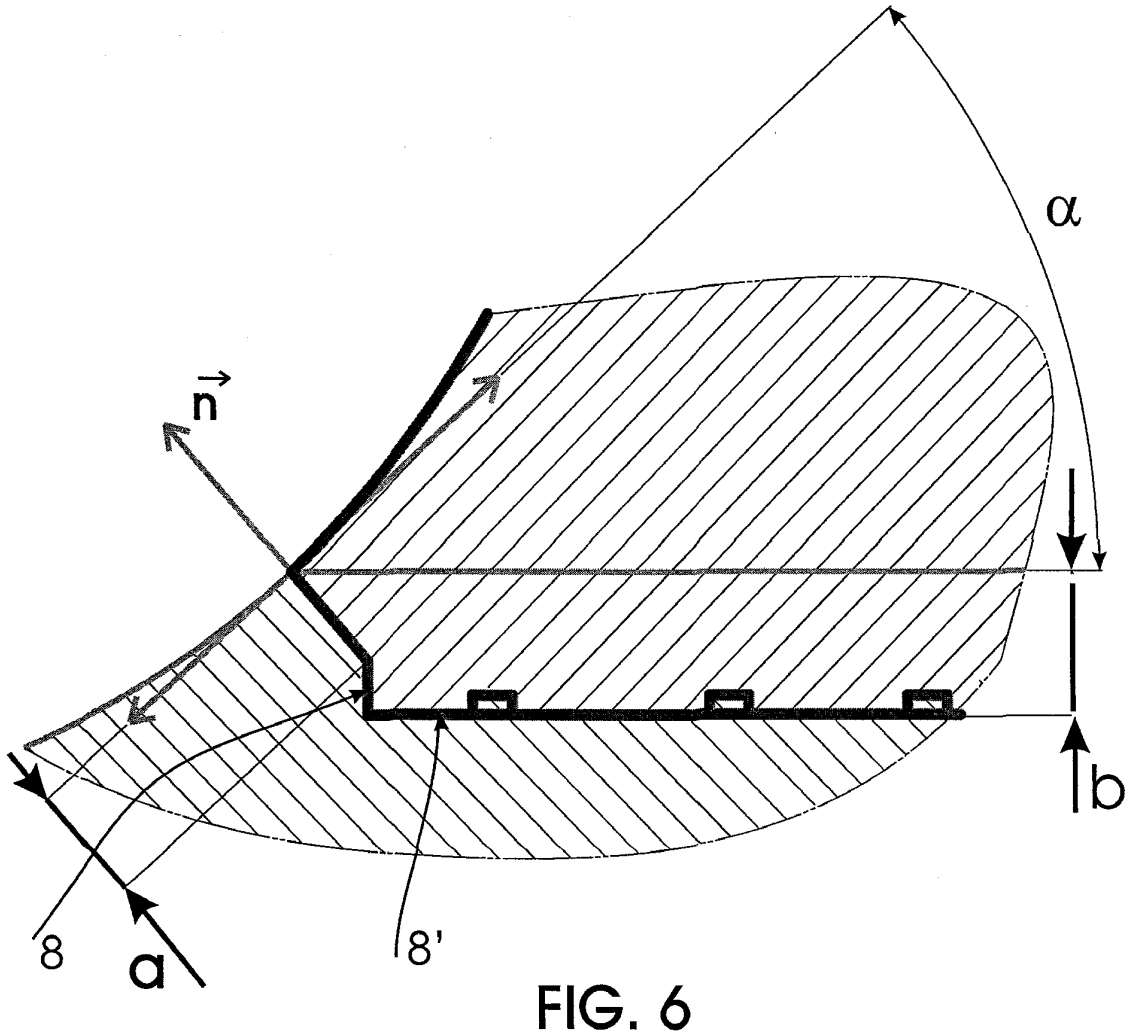


FIG. 6

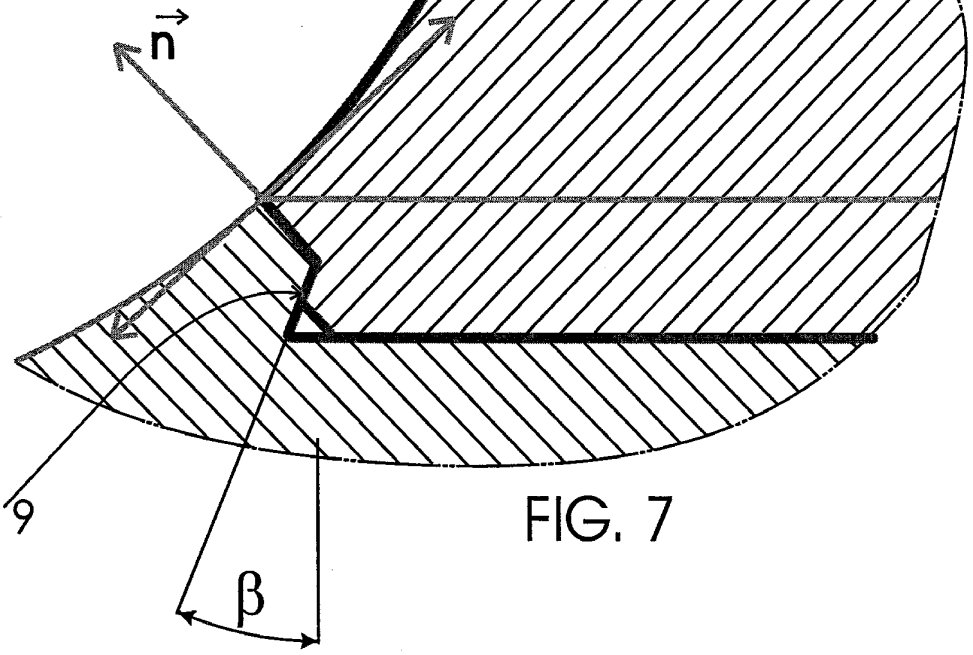


FIG. 7

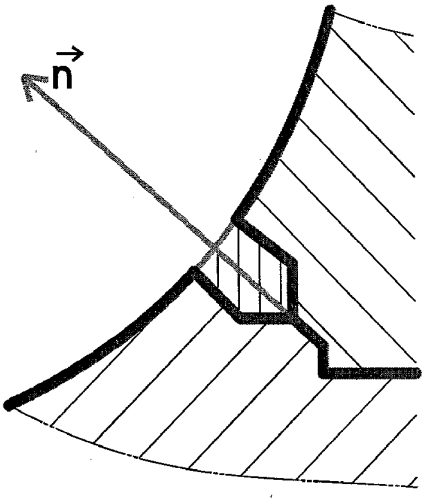


FIG. 8A

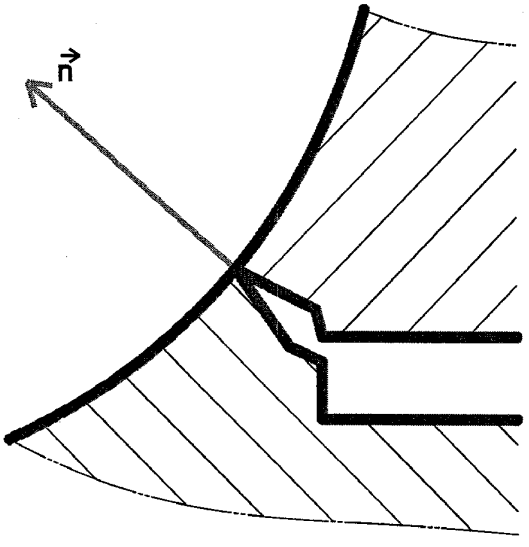


FIG. 8B

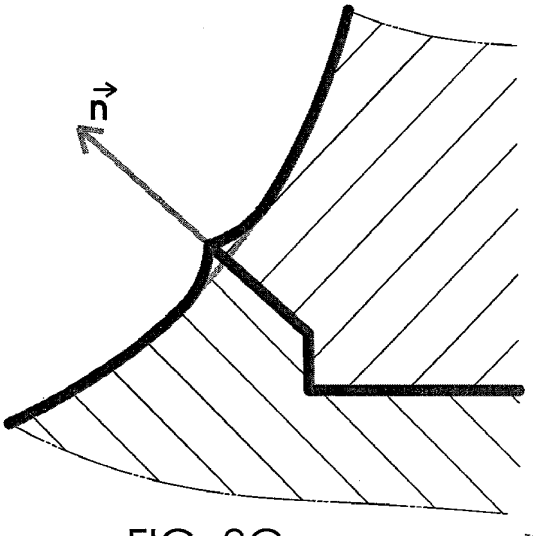


FIG. 8C

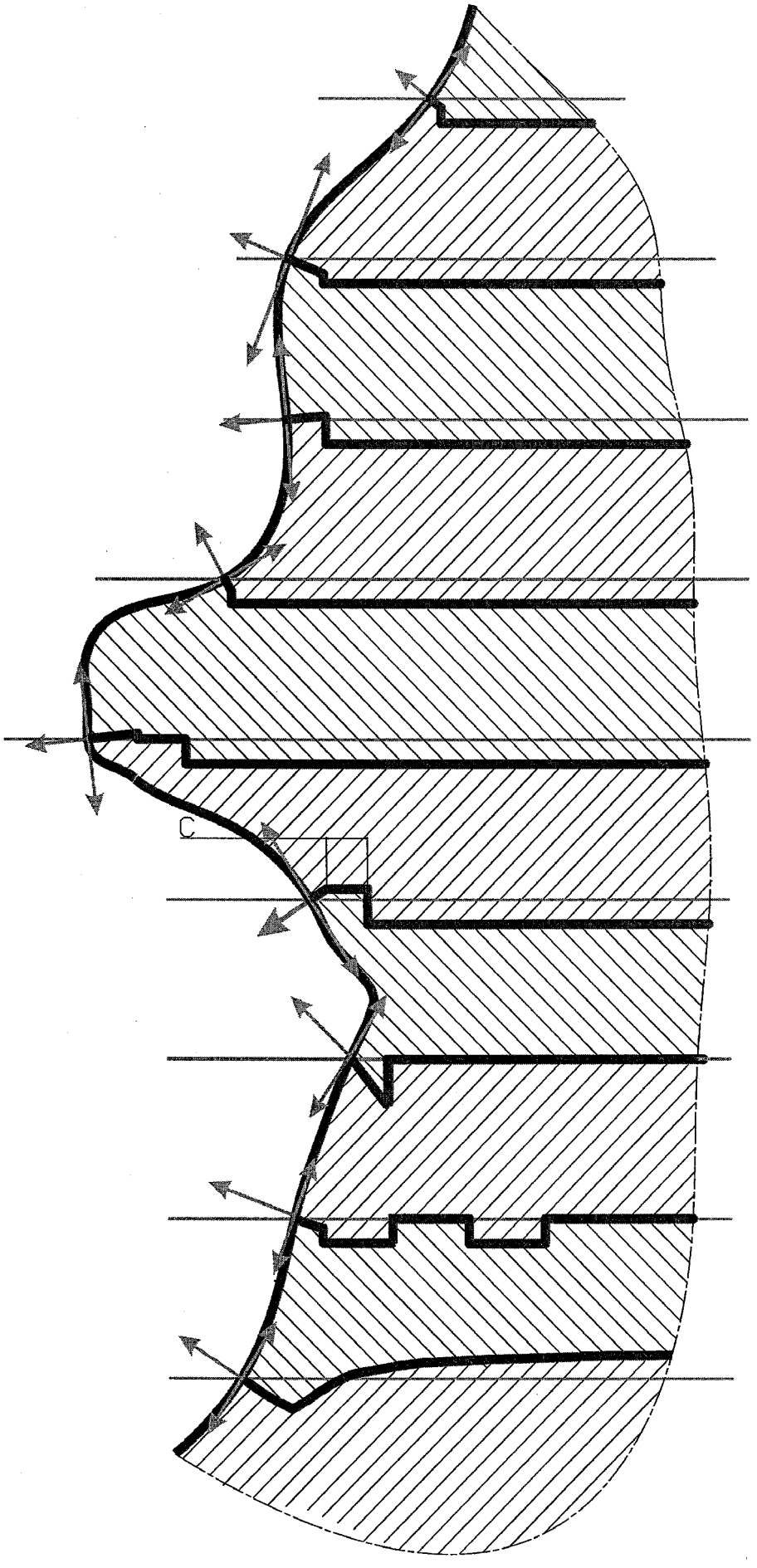


FIG. 9

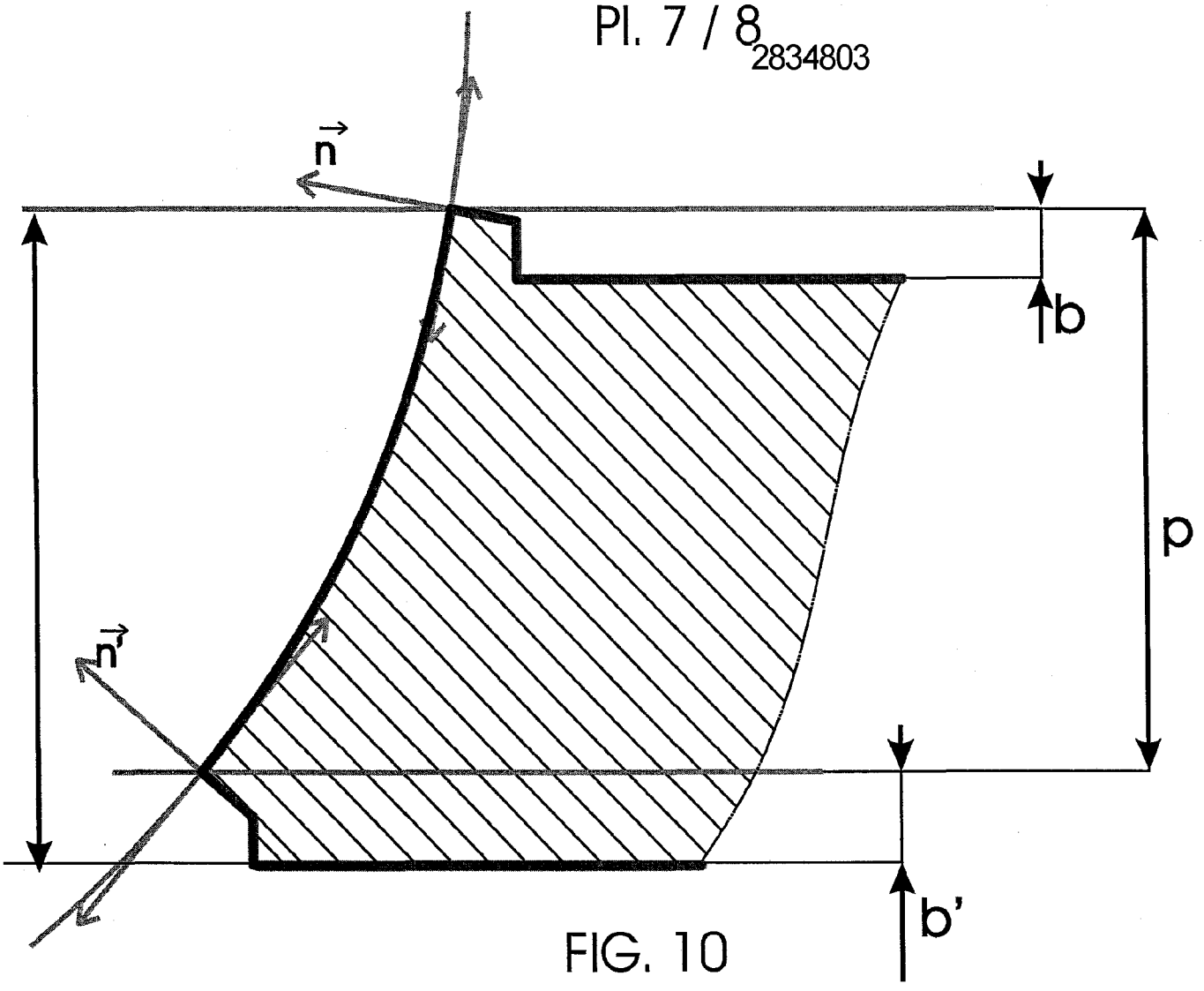


FIG. 10

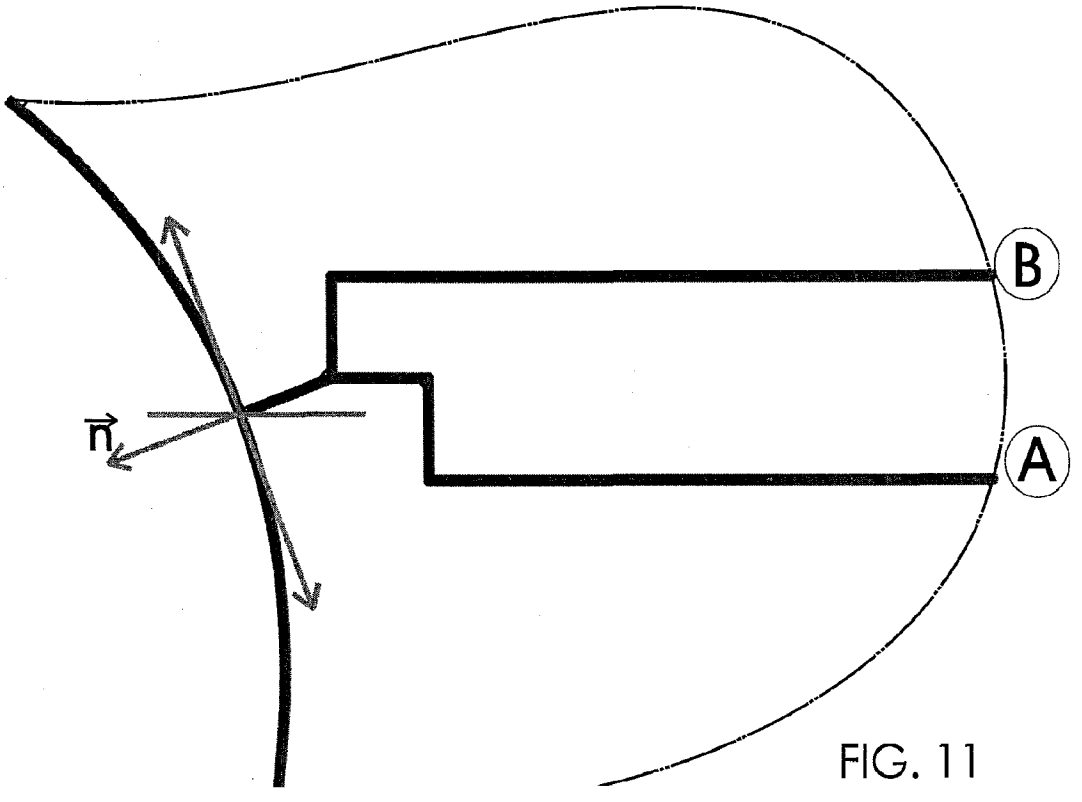


FIG. 11

2834803

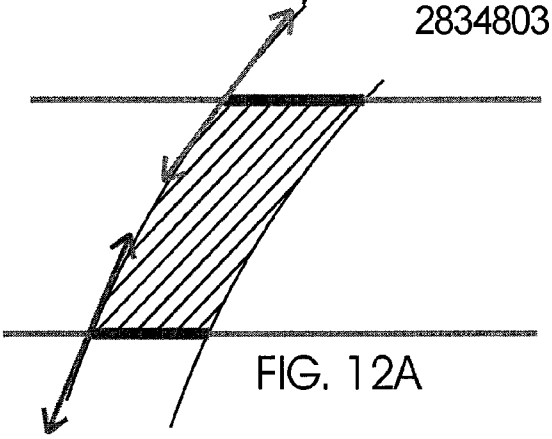


FIG. 12A

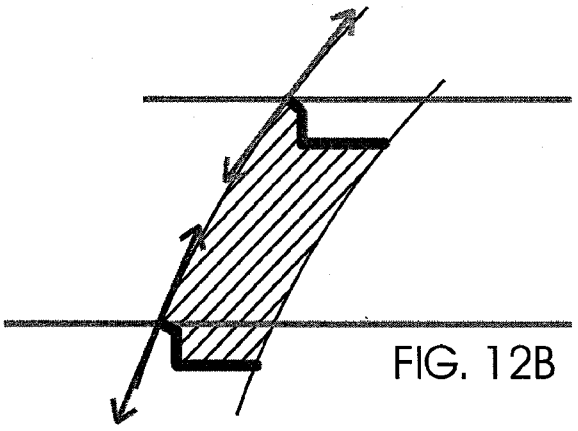


FIG. 12B

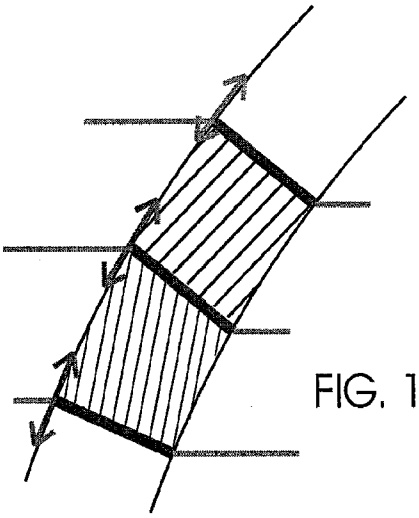


FIG. 12E

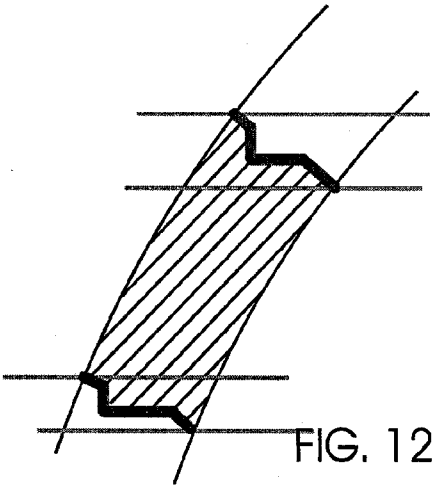


FIG. 12C

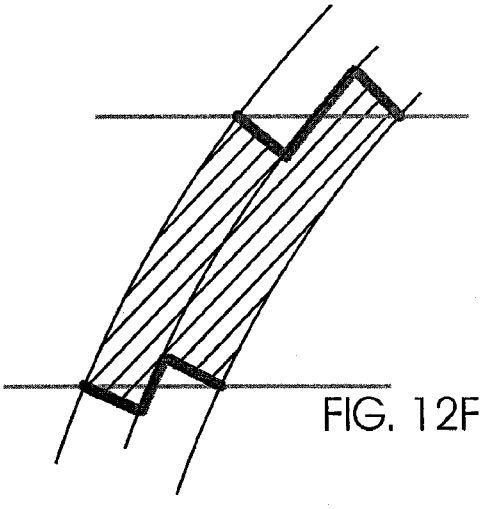


FIG. 12F

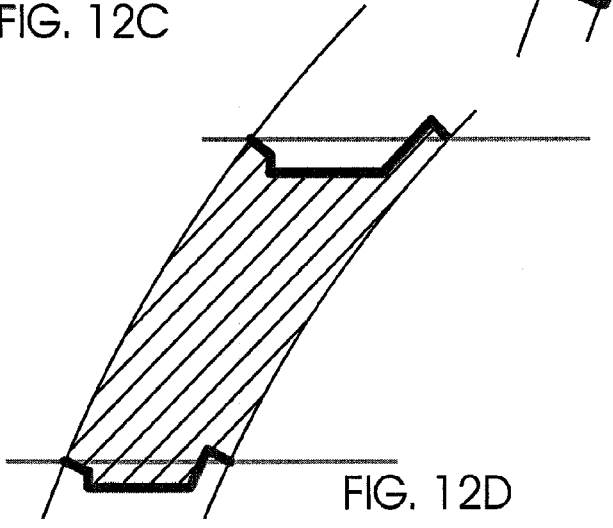


FIG. 12D

La connaissance s'acquiert par l'expérience, tout le reste n'est que de l'information.

A. Einstein

Intégration de fonctions avancées à l'inter-strate de pièces réalisées par le procédé de Stratoconception - Méthodologie et développement des outils associés

Résumé

Nos travaux de recherche s'inscrivent dans le contexte du prototypage rapide, plus particulièrement dans celui du procédé de fabrication par couches solides, la Stratoconception. Ce procédé consiste en la décomposition automatique de l'objet en une série de couches élémentaires appelées strates, dans lesquelles des inserts de positionnement sont placés. Chacune de ces strates est directement mise en panoplie, puis fabriquée par micro-fraisage rapide 2,5 axes ou par découpe 5 axes à partir de matériaux en plaques. Tous ces éléments sont ensuite assemblés afin de reconstituer la pièce finale. Si l'usinage est aujourd'hui entièrement automatisé grâce aux logiciels et aux machines dédiés, l'assemblage est une opération qui demande encore une intervention manuelle de l'utilisateur du procédé.

Un bilan des méthodes actuelles utilisées pour l'assemblage des strates (collage, brasage, assemblage mécanique…) montre les inconvénients et les limitations de ces techniques de fixation. L'étape d'assemblage est essentielle car elle influe sur la qualité géométrique, sur la tenue mécanique et sur le temps de réalisation de la pièce. Les techniques utilisées aujourd'hui ne garantissent pas toujours la répétabilité du système et peuvent entraîner une rupture de la chaîne numérique du procédé.

Notre contribution porte sur une nouvelle méthode d'assemblage, l'emboîtement. Elle permet l'intégration d'entités d'assemblage au sein des couches, elle améliore la fixation de celles-ci et elle réduit le temps de montage et surtout les coûts qu'il engendre. Pour cela, nous avons développé un système de génération automatique des entités dans le processus. Ce système permet de réduire le travail nécessaire pour réaliser l'assemblage des pièces et rend ainsi l'opération d'assemblage systématique, en minimisant les interventions manuelles et les incertitudes dues au choix de l'utilisateur. Les outils et méthodes logicielles permettent d'automatiser cette opération, en définissant les entités d'assemblage, leur forme, leur dimensionnement et surtout leur positionnement au sein des couches. Nous présentons diverses approches de localisation de ces entités au travers d'algorithmes de placement par grilles, par forces de répulsion ou par un algorithme génétique de recherche du k-gon maximum inscrit. Le développement d'un algorithme original de localisation automatique des entités par squelettisation a permis d'optimiser le placement des entités par rapport à la géométrie des couches. Ses résultats sont analysés et comparés à une localisation par grille.

Une seconde approche est proposée : l'emboîtement complet. La génération de l'emboîture à partir des contours de l'inter-strate induit la problématique des formes imbricables, c'est-à-dire la création de formes mâles et femelles complémentaires et réalisables par l'outil d'usinage (problème d'accessibilité de l'outil).

Enfin, nous concluons le mémoire en mettant en évidence les premiers résultats industriels au travers des outils implémentés dans le logiciel du procédé et des pièces réalisées par cette nouvelle méthode.

Mots-Clés: Prototypage et Outillage Rapide, Stratoconception, Assemblage, Emboîtement, Entités d'Assemblage, Inter-Strate