

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA

MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M.Ing.

PAR
MOHSEN BEN-SALAH

UTILISATION DES SURFACES POUR L'ALIGNEMENT ET LE
BALANCEMENT DES PIÈCES

MONTRÉAL, LE 6 SEPTEMBRE 2005

© droits réservés de Mohsen Ben Salah

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Jean-François Châtelain, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Antoine Tahan, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Zhaoheng Liu, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 9 AOÛT 2005

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

UTILISATION DES SURFACES POUR L'ALIGNEMENT ET LE BALANCEMENT DES PIÈCES

Mohsen Ben Salah

SOMMAIRE

Ce travail s'inscrit dans le contexte de l'amélioration des techniques d'alignements de pièces pour des fins d'inspections ou de localisations. La méthode proposée constitue une nouvelle approche qui utilise les surfaces au lieu des points pour aligner une géométrie réelle avec une pièce théorique modélisée avec un logiciel quelconque de CAO.

Les recherches précédentes dans ce domaine se sont basées dans la plupart des cas, sur l'usage d'un nuage de points très dense pour représenter le plus fidèlement possible la géométrie réelle. Par la suite, des algorithmes sont utilisés pour aligner ces points avec une pièce de référence. Toutefois, ces méthodes restent toujours approximatives et très coûteuses en terme de temps de calcul. C'est pour cette raison que nous nous sommes penché sur le développement d'une méthode qui considère la pièce physique comme étant un ensemble de surfaces très proches de la réalité.

Pour développer une telle technique, notre point de départ est appuyé sur des travaux existants concernant le balancement des pièces brutes. Ces travaux proposent des algorithmes qui alignent deux pièces différentes en satisfaisant certaines conditions bien particulières. Cela nous a inspiré pour concevoir une nouvelle méthode d'alignement à partir de morceaux de surfaces.

L'idée consiste à reconstruire les surfaces de la pièce réelle à partir de points relevés sur celle-ci par une méthode appropriée. Par la suite, ces surfaces sont subdivisées en des entités surfaciques distinctes pour être alignées avec une pièce nominale. Cela est rendu possible par l'intégration de l'algorithme dans le logiciel de CAO CATIA V5 qui permet, d'une part l'automatisation des opérations nécessaires pour l'alignement, et d'autre part, l'analyse des résultats obtenus.

Finalement, le test de cette nouvelle technique avec quelques exemples, nous a permis de constater son efficacité lors de l'alignement de surfaces à géométries assez complexes. Cependant, le temps de calcul reste le paramètre qui peut retarder l'adoption de cette technique pour résoudre des problèmes réels.

Mots-clés : alignement, localisation, balancement des pièces, inspection, CATIA V5.

USING SURFACES TO ALIGN AND BALANCE PARTS

Mohsen Ben Salah

ABSTRACT

This project is dealing with the improvement of alignment techniques of parts for inspection and localization purposes. Our method represents a new approach which uses surfaces instead of points to align a physical part with a nominal one designed with CAD software.

The previous works realised to solve the problem of alignment are based on the use of a dense cloud of points to represent the physical geometry. After that, some algorithms are used to align these points with the nominal part. However, these methods are considered as an approximation, and these issues require a long computing time. That is why we developed a new method which is based on the representation of the physical part by surfaces.

Our method is based on reconstructing surfaces of this part by using a suitable method within a CAD software. Thereafter, we subdivide the reconstructed surface into distinct entities to be aligned with the nominal part. The algorithm used for alignment is based on previous works concerning the balancing of blank part for optimal machining. To automate this method, we have implemented this algorithm on CATIA V5 which is a powerful software of design and analysis.

Finally, we conclude after the validation of this method, that the use of surfaces to align parts increase the precision of alignment. However, the execution time stays too large to obtain better results.

Key words: alignment, localization, balancing of parts, inspection, CATIA V5.

TABLE DE MATIÈRE

SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
TABLE DE MATIÈRE.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES.....	ix
INTRODUCTION	1
REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	4
1.1 Domaines d’application de l’alignement.....	4
1.1.1 Inspection géométrique et dimensionnelle.....	4
1.1.2 Localisation des pièces sur machine-outil à commande numérique.....	6
1.1.3 Balancement des pièces brutes.....	8
1.2 Paramètres agissants sur la rapidité des algorithmes de localisation	9
1.2.1 La méthode mathématique utilisée pour développer les algorithmes	9
1.2.2 Nombre de points utilisés.....	10
1.2.3 Caractéristiques géométriques des pièces	11
1.3 Types d’alignement.....	11
CHAPITRE 2 INTRODUCTION AU BALANCEMENT DES PIÈCES BRUTES.....	14
2.1 Problématique.....	14
2.2 Transformation initiale.....	15
2.3 Rapprochement successif du nuage de points avec le modèle nominal sans tenir compte des contraintes.....	15
2.4 Alignement en tenant compte des contraintes et des priorités	19
2.4.1 Résolution du problème d’optimisation.....	23
2.4.2 Calcul des distances euclidiennes orientées.....	25
2.4.3 Correcteur de la distance orientée.....	27
CHAPITRE 3 DÉVELOPPEMENT D’UNE NOUVELLE MÉTHODE D’ALIGNEMENT ET INTÉGRATION DE L’ALGORITHME DE BALANCEMENT DANS CATIA V5.....	29
3.1 Présentation de CATIA V5	29

3.2	Intégration de l'application existante au logiciel CATIA V5	30
3.2.1	Phase manuelle.....	31
3.2.1.1	Traitement du nuage de points	31
3.2.1.2	Première étape : rapprochement manuel.....	33
3.2.2	Phase automatisée	33
3.2.2.1	Deuxième étape : rapprochement successif sans contraintes.....	33
3.2.2.2	Troisième étape : alignement avec prise en compte des contraintes et des pondérations.....	38
3.2.2.3	Génération des résultats	60
CHAPITRE 4 VALIDATION DE LA NOUVELLE MÉTHODE D'ALIGNEMENT .		62
4.1	Méthode adoptée pour l'analyse des résultats	62
4.2	Essais de balancement des pièces.....	63
4.2.1	Première pièce	63
4.2.2	Deuxième pièce	76
4.3	Analyse des résultats	83
4.3.1	Résumé des résultats	83
4.3.2	Discussion	85
CONCLUSION		87
RECOMMANDATIONS.....		89
ANNEXES		
1	: Les propriétés de la fonction Powerfit.....	91
2	: Les fichiers de données de la pièce aube de turbine	96
3	: Exemple de fichier de résultats	102
4	: Interface utilisateur	105
RÉFÉRENCES		110

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I	Répartition des points sur les surfaces	66
Tableau II	Résultats d'alignement non préférentiel	66
Tableau III	Résultats d'alignement préférentiel	67
Tableau IV	Répartition des points sur les surfaces	67
Tableau V	Résultats d'alignement non préférentiel	68
Tableau VI	Résultats d'alignement préférentiel	68
Tableau VII	Répartition des points sur les surfaces	69
Tableau VIII	Résultats d'alignement non préférentiel	69
Tableau IX	Résultats d'alignement préférentiel	70
Tableau X	Répartition de points sur les surfaces.....	70
Tableau XI	Résultats d'alignement non préférentiel	71
Tableau XII	Résultats d'alignement préférentiel	71
Tableau XIII	Répartition des points sur les surfaces	72
Tableau XIV	Résultats d'alignement non préférentiel	72
Tableau XV	Résultats d'alignement préférentiel	73
Tableau XVI	Répartition des points sur les surfaces	73
Tableau XVII	Résultats d'alignement non préférentiel	74
Tableau XVIII	Résultats d'alignement préférentiel	74
Tableau XIX	Répartition de points sur les surfaces.....	77
Tableau XX	Résultats d'alignement non préférentiel	78
Tableau XXI	Résultats d'alignement préférentiel	78

Tableau XXII	Répartition de points sur les surfaces.....	79
Tableau XXIII	Résultats d'alignement non préférentiel.....	79
Tableau XXIV	Résultats d'alignement préférentiel.....	80
Tableau XXV	Répartition des points sur les surfaces	80
Tableau XXVI	Résultats d'alignement non préférentiel.....	81
Tableau XXVII	Résultats d'alignement préférentiel.....	81
Tableau XXVIII	Répartition des points sur les surfaces	82
Tableau XXIX	Résultats d'alignement non préférentiel.....	82
Tableau XXX	Résultats d'alignement préférentiel.....	83

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Alignement de type surface/surface	12
Figure 2	Algorithme de balancement des pièces	16
Figure 3	Exemple de rapprochement de deux points	17
Figure 4	Exemple de balancement de pièces.....	20
Figure 5	Exemple d'une recherche du minimum d'une fonction par la méthode du simplexe	24
Figure 6	Algorithme de la méthode Simplex	26
Figure 7	Approximation pour le test d'appartenance des points à la pièce nominale ..	27
Figure 8	Cas d'erreur possible sans l'utilisation du facteur de correction ξ	28
Figure 9	Organigramme des phases de l'algorithme de balancement	32
Figure 10	Transformation du nuage de points.....	34
Figure 11	Algorithme de l'étape d'alignement non contraint	35
Figure 12	Visualisation des nuages de points avec l'interface de CATIA V5	36
Figure 13	Propriétés de la fonction <i>minimumdistancepoints</i>	37
Figure 14	Algorithme du test d'appartenance des points au modèle nominal.....	40
Figure 15	Représentation d'un cas d'imprécision de l'algorithme de balancement.....	41
Figure 16	Mouvement attribué aux points pour corriger la situation d'imprécision.....	41
Figure 17	Technique de construction des portions surfaciques.....	43
Figure 18	Exemple de transformation d'une surface brute en portions surfaciques	43
Figure 19	Exemple de surface plane transformée en portions circulaires	44
Figure 20	Étapes de calcul des rayons.....	46
Figure 21	Algorithme de calcul des rayons des sphères.....	47

Figure 22	Utilisation de la distance d_{mj}	48
Figure 23	Les différents types de violation de contraintes	49
Figure 24	Propriétés de la méthode <i>distance</i>	56
Figure 25	Correction de l'algorithme des tests d'appartenance	58
Figure 26	Relation entre la surépaisseur minimale et d_{\min}	60
Figure 27	Première pièce : aube de turbine	64
Figure 28	Vue éclatée des surfaces utilisées pour l'alignement	65
Figure 29	Exemple d'un résultat de balancement	75
Figure 30	Deuxième pièce	76
Figure 31	Vue éclatée des surfaces utilisées pour l'alignement	77
Figure 32	Menu général de la fonction <i>powerfit</i>	92
Figure 33	Limitation des points servant à la construction d'une surface	93
Figure 34	Déviations entre la surface reconstruite et la courbe de limitation	93
Figure 35	Tolérance de tangence entre deux surfaces contiguës	94
Figure 36	Effet de la modification de la tension dans une surface reconstruite	94
Figure 37	Élimination des points entourant les courbes	95
Figure 38	Ouverture de la liste des macros	106
Figure 39	Démarrage du programme de balancement	107
Figure 40	Rubrique pour l'entrée des données	107
Figure 41	Rubrique pour les paramètres de convergence	108
Figure 42	Intégration du programme de balancement dans CATIA V5	109

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

c	Cosinus
CAO	Conception assistée par ordinateur
D_{di}	Point projeté orthogonalement sur une surface
d_{dj}	Vecteur déviation
$D_{dj}^{(glob)}$	Point projeté orthogonalement sur une surface à l'itération (glob)
d_{ei}	Distance euclidienne
d_{eoj}	Distance euclidienne orientée
d_{mj}	Distance minimale entre le point j et la surface
d_s	Distance minimale entre surface brute et surface nominale
F	Fonction objective
glob	Nombre de l'itération globale
it	Itération du Simplex
it_{max}	Nombre d'itérations maximal
M_{di}	Point de mesure
$M_{dj}^{(glob)}$	Point de mesure à l'itération (glob)
MOCN	Machine-outil à commande numérique
n_j	Vecteur normal à la surface au point D_j
np	Le nombre de point de mesure
P_j	Contrainte au point (j)
P'_j	Deuxième contrainte au point j
R^*	Matrice de transformation rigide globale
$R^{*(n)}$	Matrice de transformation rigide à l'itération (n)
R_c	Matrice de transformation rigide de l'étape d'alignement préférentiel contraint
r_j	Rayon de la sphère j
RMS	Méthode de sommation des moindres carrés

R_u	Matrice de transformation rigide de l'étape de rapprochement successif sans contraintes
s	Sinus
T_x	Paramètre de translation selon l'axe des x
T_y	Paramètre de translation selon l'axe des y
T_z	Paramètre de translation selon l'axe des z
U	Fonction objective composée
U_{art}	Fonction artificielle
U'_{art}	Deuxième fonction artificielle
$U_{art(glob)}$	Fonction artificielle globale
$U_{art(si)}$	Fonction artificielle des points appartenant à une zone de priorité (si)
$U_{réel}$	Fonction réelle
X	Vecteur des paramètres ($\psi, \theta, \varphi, T_x, T_y, T_z$)
X^0	Le centroïde du Simplex
X^h	La plus grande valeur objective
X^j	Sommet quelconque du Simplex
X^l	La plus faible valeur objective
X^s	La deuxième plus faible valeur objective
ΔX_{max}	Critère de convergence du Simplex
δ	L'épaisseur minimal
λ_j	Distance de correction géométrique
μ_j	Vecteur directeur unitaire
ξ_j	Facteur de correction
ψ, θ, φ	Les trois angles d'Euler
ω	Facteur de pondération

INTRODUCTION

Dans le cadre de l'amélioration de la productivité dans le domaine de la fabrication mécanique, le temps d'usinage constitue un facteur très important dans le prix de revient d'un produit. La réduction de ce temps par la minimisation de la matière à enlever de la pièce brute, peut donc conduire à une baisse considérable des coûts de la production. Cela est plus perceptible dans le cas où les pièces sont de grandes dimensions et le coût de la matière brute constitue une proportion importante dans les coûts de la production. Dans cette optique, il est plus profitable d'utiliser des pièces brutes de formes très proches des pièces finies, et ayant de faibles surépaisseurs d'usinage.

Cependant, la précision des procédés de fabrication du brut reste limité, ce qui pourra créer de nombreux problèmes pendant l'usinage, et rendre la tâche de positionnement des pièces sur la machine-outil à commande numérique (MOCN) très délicate vu les faibles surépaisseurs d'usinage. Par conséquent, les risques de déviation de la pièce brute de son positionnement prévu sur la MOCN augmentent. Cela pourrait conduire à l'apparition de lacunes sur la pièce finie, ou à des surépaisseurs d'usinage plus importantes de ce qui a été prévu par le programme d'usinage; Dans les deux cas, la qualité de la pièce finie sera affectée, et la possibilité de la mettre au rebut se présente, ce qui constitue un coût élevé pour la production.

Il est donc nécessaire de trouver une méthode qui peut assurer un enveloppement de la pièce finie par la pièce brute sans recours à l'interruption de l'usinage, et de prévoir si la pièce brute est susceptible de donner un produit de qualité.

Dans ce contexte, un travail a été fait pour résoudre ce problème par la recherche d'un positionnement optimal de la pièce brute dans le référentiel de la MOCN. Cela se fait en se basant sur le modèle CAO de la pièce finie ainsi que sur un nuage de points représentant la pièce brute. La solution proposée consiste à aligner ce nuage avec le modèle nominal pour équilibrer les surépaisseurs d'usinage sur toutes les surfaces qui

vont être usinées. De plus, si l'obtention de zones de sous-épaisseur est inévitable, il est permis dans ce cas de les orienter vers des régions souhaitées, là où il sera plus facile et moins coûteux d'y ajouter de la matière par un procédé adéquat.

Cette méthode a prouvé sa robustesse lors d'un traitement de cas réels de pièces de grandes dimensions; ce qui nous a motivé à intégrer cette technique, appelée balancement des pièces brutes, à un logiciel de CAO/FAO qui pourrait la mettre en valeur et la rendre plus facile à exploiter.

En effet, nous avons intégré l'algorithme de balancement des pièces brutes au logiciel CATIA V5 qui constitue un puissant outil de conception et d'analyse de produits. D'autre part, nous avons essayé durant ce travail, de profiter des différentes fonctions de ce logiciel pour améliorer la précision de cette technique en substituant quelques approximations conservatrices par des calculs exacts pouvant être accomplis directement par CATIA V5.

D'un autre côté, nous avons proposé une nouvelle méthode d'alignement de la pièce brute avec la pièce nominale, et qui se base à la fois sur l'alignement de type point/surface et surface/surface. Cela a pour but de réduire les imperfections de la méthode point/surface qui ne prend pas en compte la géométrie réelle de la pièce brute, et n'utilise qu'une représentation approximative de celle-ci. Cette nouvelle méthode consiste à aligner des éléments surfaciques élémentaires avec les surfaces de la pièce nominale en utilisant une approche appropriée. Ce qui pourra réduire le nombre de points nécessaires pour avoir une bonne précision.

Ce mémoire comprend quatre chapitres. Le premier donne un aperçu des travaux de recherches effectués dans le domaine de l'alignement et de la localisation des pièces, et présente les difficultés rencontrées par les chercheurs, ainsi que le type de solutions proposées.

Le deuxième chapitre traite le problème de balancement des pièces brutes d'une façon détaillée, et met l'accent sur la méthode mathématique utilisée pour réaliser l'algorithme de balancement. Cela constitue notre point de départ pour développer la nouvelle méthode d'alignement.

Nous commençons le chapitre 3 par une explication de la méthode envisagée pour l'intégration de l'algorithme de balancement dans CATIA V5, tout en citant les avantages de ce logiciel pour notre application. Par la suite, nous mettons en évidence la nécessité d'utiliser une méthode d'alignement basée sur les surfaces, et nous introduisons la nouvelle technique ainsi que la manière choisie pour son intégration dans CATIA V5.

Le dernier chapitre est consacré aux essais effectués afin de tester l'efficacité de l'alignement par le biais d'éléments de surfaces.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Le balancement des pièces brutes pour un enveloppement optimal se base essentiellement sur l'étape d'alignement des pièces. Cette opération fut l'objet de nombreuses publications qui ont touché plusieurs domaines d'application de l'alignement. Parmi ces travaux, nous avons recueilli ceux qui sont d'avantage liés à notre sujet, du point de vue application et solutions proposées pour améliorer la rapidité et la robustesse de cette technique.

1.1 Domaines d'application de l'alignement

1.1.1 Inspection géométrique et dimensionnelle

Les techniques conventionnelles d'inspection se sont montrées limitées vis-à-vis l'inspection des pièces à géométrie complexe, et c'est pour cette raison que plusieurs publications scientifiques avaient traité le problème d'inspection de ce type de pièce en utilisant l'informatique. Cela se base sur la comparaison de ces pièces avec leurs modèles nominaux représentés par la CAO. Mais avant d'arriver à cette étape, il faut d'abord aligner les deux modèles pour localiser chaque surface à inspecter, par rapport à sont équivalente sur le modèle nominal.

L'un des travaux qui ont traité le problème de localisation a été publié en 1996 par B. Samuel E. Ebenstein et al. [1], et qui ont appelé cette technique : NGSV, ou vérification des formes de la prochaine génération.

La méthode se base sur l'utilisation d'un nuage dense de points, relevé sur la pièce inspectée, ainsi que le modèle nominal donné par la CAO. Dans le cas où celui-ci n'existe pas, l'inspection est faite par rapport à une pièce réelle supposée parfaite; elle

est appelée pièce maîtresse. Cette pièce est aussi numérisée pour être représentée par un nuage de points. Le nombre de points qui sont traités est très élevé. À titre d'exemple, il est de 500000 points pour un réflecteur de phare. Après avoir obtenu ces données, un algorithme d'alignement entre en jeu pour aligner les surfaces de références entre elles. Mais dans le cas où ces surfaces n'existent pas, l'opérateur doit créer sur chaque pièce un plan de coupe et fait l'alignement manuellement. Finalement, un deuxième algorithme calcule les distances entre les deux pièces et visualise les résultats sur écran pour juger la qualité de la pièce et surtout localiser l'imperfection s'il y en a une.

Pour réduire l'intervention humaine dans le processus d'alignement, X. Huang et P. Gu [2] ont développé un algorithme pseudo inverse pour localiser le modèle CAO de la pièce par rapport à un nuage de points représentant la pièce réelle. Dans le cas où les cotations sont faites par rapport à des surfaces de références, l'algorithme aligne ces surfaces l'une après l'autre sans utiliser le reste des surfaces. Finalement, l'inspection peut se faire par une méthode statistique vérifiée à l'aide de quelques exemples.

Il faut noter que, jusqu'ici, l'inspection se fait en comparant les positions de points par rapport à des surfaces ou par rapport à un autre nuage de points, ce qui ne reflète pas la réalité des choses, vu qu'une pièce réelle est constituée de surfaces continues et non d'entités discrètes; c'est ce qui a motivé Mihailo Ristics et al. [3] dans leurs recherches. Ils ont proposé d'aligner des points avec le modèle nominal par une technique habituelle. Par la suite, une opération de maillage 3D est faite sur ces points qui en constituent les nœuds. Cela a pour but de reconstruire un ensemble de surfaces triangulaires modélisées par des NURBS. Enfin, une dernière opération est faite pour relier ces surfaces entre elles et ainsi éliminer les chevauchements entre les triangles, causés par les points redondants et par le bruit dans des mesures.

De cette façon, l'opération de l'inspection sera plus consistante en comparant des surfaces à d'autres surfaces.

1.1.2 Localisation des pièces sur machine-outil à commande numérique

Durant l'usinage, on est souvent obligé de changer la fixation de la pièce à usiner, à cause de l'inaccessibilité de l'outil à certaines surfaces ou même à cause des limitations sur les axes de la machine-outil. Cela peut causer des erreurs de positionnement vu l'imperfection des surfaces de contact entre la pièce et la table de la machine et également à cause de l'intensité des efforts de serrage. Tous ces phénomènes peuvent mener à un déplacement des tolérances sur la pièce finie malgré la grande précision de la MOCN.

Chung-Yung Wu et al. [4] ont développé une technique pour réduire les aléas qui peuvent intervenir sur la re-fixation des pièces. Leur idée consiste à fixer des objets, appelés points cibles, sur la pièce. Ensuite, un système de repérage par laser fixé sur la broche, fait le tour de la pièce pour repérer les cibles et calculer leurs coordonnées dans un repère lié à la machine. Cette opération est répétée à chaque fois que la pièce est re-fixée; cela va permettre le calcul de la matrice de transformation rigide entre deux fixations successives.

Notons que parmi les avantages de cette technique, c'est qu'elle permet d'éviter l'usinage des surfaces non fonctionnelles qui servent uniquement à la fixation. Elle permet également de réduire l'utilisation des systèmes complexes de fixation qui peuvent coûter très cher. Finalement, étant donné que le système de repérage est monté sur la broche de la machine, la précision de la localisation devrait être comparable à celle de la machine.

Toutefois, et en raison des coûts élevés de cette technologie, cette méthode se restreint à une production de faible série pour une industrie de pointe comme l'aéronautique.

Pour élargir le domaine d'application de cette méthode, les auteurs ont essayé de substituer le système de triangulation par laser, par un système de triangulation par

ultrason [5]. Cette substitution est due au fait que les mesures par laser exigent un environnement très propre et une bonne accessibilité aux points cibles, une chose qui n'est pas toujours possible.

Dans le cas de l'ultrason, les émetteurs sont fixés sur la pièce à usiner, alors que les récepteurs sont placés à des endroits fixes sur la machine; et de la même façon qu'avec le laser, la position des émetteurs est recalculée après chaque re-fixation.

Bien que cette méthode offre plusieurs avantages par rapport à celle qui utilise le laser, elle a montré sa faiblesse du point de vue précision. Cela s'explique par le principe même de la technique de l'ultrason, qui se base sur la mesure de temps mis par le son pour atteindre les récepteurs. La distance est calculée en multipliant ce temps par la vitesse du son dans le milieu de mesure. Mais comme il est connu, la vitesse du son varie beaucoup avec la nature et la température de l'environnement dans lequel se propage. Étant donnée l'hétérogénéité de l'environnement d'usinage et sa variation de température, il est par conséquent très difficile de déterminer cette vitesse avec précision.

Une autre technique a été proposée, dans ce même champ d'application, par B. Kang et al[6] pour localiser une pièce, partiellement usinée, sur la MOCN. Pour cela, ils ont relevé un nuage de points sur les surfaces usinées après chaque re-fixation. Ainsi, la position de la pièce devient bien définie.

Les points sont relevés par le biais d'un palpeur ayant des trajectoires générées à partir du modèle CAO de la pièce nominale, pour garantir que l'axe du palpeur soit toujours normal à la surface palpée pour réduire les erreurs de mesure. Cependant, et dans le cas d'absence du modèle CAO, il ne sera pas évident d'arriver à des résultats précis puisque la correction des coordonnées de points par la compensation du rayon du palpeur ne sera pas faite correctement.

Une solution pour ce problème a été proposée par C. Menq et F. L. Chen[7]. Leur stratégie consiste à faire des itérations pour le palpé jusqu'à la convergence vers un état satisfaisant. La première itération est faite avec une inclinaison constante du palpeur; les points générés serviront à construire des courbes de Bézier avec les polynômes de Bernstein. Ces courbes seront utilisées à leur tour pour construire les surfaces de la pièce à l'aide d'un logiciel CAO. Ainsi, des nouvelles trajectoires pourront être générées pour l'itération suivante. De cette façon, la précision s'améliore d'une itération à une autre. D'ailleurs, les auteurs ont constaté, après des essais, que la méthode converge après seulement quelques itérations. Néanmoins, cette méthode est restreinte à des pièces ayant des surfaces lisses et continues, et ne peut pas être généralisée à d'autres types de surface.

Dans le même contexte, Y. X Chu et al [8], ont étudié le cas des usinages interrompus; leur but était de s'assurer qu' après la reprise d'usinage, la pièce nominale reste enveloppée par la pièce semi-finie et cela après alignement des surfaces usinées avec celles de la pièce nominale. On parle alors de problème hybride localisation/enveloppement.

Dans ce cas, l'algorithme se compose de deux étapes, la première a pour rôle l'alignement des surfaces usinées avec leur équivalentes du modèle CAO. Si le résultat de cette étape laisse des degrés de liberté entre les deux pièces, la deuxième étape intervient pour faire bouger l'une d'elles suivant ces degrés de liberté permis, afin de garder une distance positive minimale entre elles. La distance positive minimale signifie que la surface nominale doit être à l'intérieur de la pièce semi-finie, et qu'une surépaisseur minimale est assurée pour permettre l'usinage restant.

1.1.3 Balancement des pièces brutes

La dernière application de l'alignement, et qui fait l'objet de ce projet, est le balancement des pièces brutes pour enveloppement optimal. Cette technique a été

introduite par J. F. Châtelain [9], et qui a visé, non seulement l'enveloppement optimal de la pièce nominale par la pièce brute, mais aussi l'orientation des déficits en matériel, si ces derniers sont inévitables, vers des zones moins exigeantes. Ceci va être détaillé plus loin au chapitre 2.

1.2 Paramètres agissants sur la rapidité des algorithmes de localisation

L'un des soucis qui préoccupe un chercheur dans ce domaine est la rapidité des algorithmes utilisés pour la localisation, puisque le temps d'exécution est déterminant pour l'applicabilité et la rentabilité d'une technique dans l'industrie.

Les facteurs agissants sur la rapidité du processus de la localisation sont généralement : la méthode mathématique sur laquelle est basé l'algorithme de localisation, le nombre optimal de points nécessaire pour l'obtention de la précision voulue, et finalement la complexité de la géométrie de la pièce.

1.2.1 La méthode mathématique utilisée pour développer les algorithmes

Dans ce contexte, YX Chu, J.B Go, H. Wu et Z. X. Li[10] ont testé trois algorithmes pour aligner un nuage de points, relevé sur un modèle théorique d'une pale de turbine, avec ce même modèle, de façon à connaître d'avance la solution exacte de l'alignement. Ces trois algorithmes sont : l'algorithme variationnel, l'algorithme de tangente et l'algorithme de Hong-Tan. Les résultats ont montré l'efficacité de tous ces algorithmes, par contre, celui de Hong-Tang s'est avéré le plus rapide.

D'autres résultats pertinents ont été présentés par Thoma M. Tucker et Thoma R. Kurfesse[11]. Leur idée est de reformuler la méthode de Newton, une méthode qui a été écartée dans le passé à cause de sa faiblesse, pour la rendre plus robuste. Comme il est connu, le principe de cette méthode est simple. Il s'agit de chercher le minimum d'une fonction en la développant en séries de Taylor. Il suffit donc de calculer sa dérivée

première et seconde et de chercher le point où la dérivée première s'annule et la dérivée seconde est positive. Mais pour calculer la dérivée seconde, les auteurs proposent quatre méthodes appelées : méthode de Newton, méthode de Gauss-Newton, méthode Quasi-Newton et la méthode de Gauss-Newton augmentée.

Toutes ces méthodes ont été comparées à deux algorithmes couramment utilisés, et qui sont : l'algorithme ICP usuel et ICP accéléré. Les tests ont porté sur la comparaison du temps de calcul, la précision atteinte et la robustesse de chaque méthode (ici le mot robustesse fait allusion à la capacité de convergence vers un minimum global en fonction de la position relative initiale des deux objets à aligner).

Les résultats ont prouvé la prédominance de la méthode de Gauss-Newton sur les autres méthodes en ce qui concerne le temps de calcul et le nombre d'itérations. Les quatre méthodes de Newton se sont avérées plus précises que les deux autres, mais d'un point de vue robustesse, les algorithmes ICP restent les plus efficaces.

1.2.2 Nombre de points utilisés

Un deuxième facteur qui peut influencer le temps d'exécution c'est le nombre de points à traiter lors de l'opération de localisation.

Il est presque évident que la précision de la localisation s'améliore de mieux en mieux si le nombre de points relevé sur l'objet à inspecter augmente jusqu'à un seuil à partir duquel l'amélioration de la précision devient négligeable. Ceci a été prouvé par Chia-Hsiang et al [12], qui ont étudié l'effet du nombre de points ainsi que de leur emplacement, sur la précision de l'alignement d'un ensemble de points avec des surfaces modélisées par la CAO. Leur conclusion stipulait que le choix de l'emplacement des points agit beaucoup sur le nombre de points nécessaires pour l'alignement avec une précision donnée. Cette précision dépend à son tour des tolérances demandées pour l'acceptation de l'objet inspecté. Néanmoins, les critères aidant pour le choix de

l'emplacement des points ne sont pas définis d'une façon explicite, ils sont laissés à l'intuition.

1.2.3 Caractéristiques géométriques des pièces

Un autre élément qui peut intervenir dans la rapidité de ces algorithmes c'est la géométrie des pièces. En effet, l'alignement des pièces symétriques représente un cas spécial, puisque, théoriquement la solution n'est pas unique. L'existence de plusieurs ou d'une infinité de solutions peut engendrer la divergence de certains algorithmes dépendamment de leur base mathématique. D'ailleurs, Zexiang Li et al. [13] ont prouvé que l'algorithme de Hong-Tan n'est pas applicable à ce genre de pièce. Mais en contre partie, l'élaboration d'un algorithme exclusif à des pièces symétriques peut être bénéfique du point de vue temps de calcul.

1.3 Types d'alignement

L'opération d'alignement peut se faire de trois façons : alignement type point/point, alignement type point/ surface et alignement type surface/surface. Les deux premiers types sont les plus utilisés à cause de leur simplicité mathématique. D'ailleurs, presque la totalité des travaux présentés dans ce chapitre utilisent l'alignement de type points/surface.

Malheureusement, peu de travaux se sont basés sur l'alignement surface/surface vue la complexité de ce problème. Cependant, K.H. Ko et al [14] ont proposé une nouvelle méthode pour aligner deux surfaces modélisées par les NURBS. La technique consiste à choisir manuellement trois points sur une première surface, ensuite, et en chaque point, calculer la courbure moyenne et la courbure gaussienne. Les trois points sont choisis de telle sorte qu'ils ne soient pas alignés entre eux et que ce choix pourra assurer une solution unique (figure 1) [14]. D'autre part, la deuxième surface est subdivisée en de

petites entités surfaciques afin de pouvoir calculer les courbures moyennes et gaussiennes au centre de chacune de ces entités. Ainsi, le problème se réduit en une résolution d'un système d'équations pour attribuer à chaque point du triplet choisi précédemment, son équivalent sur la deuxième surface. Avec un bon choix du triplet, la solution est vite obtenue.

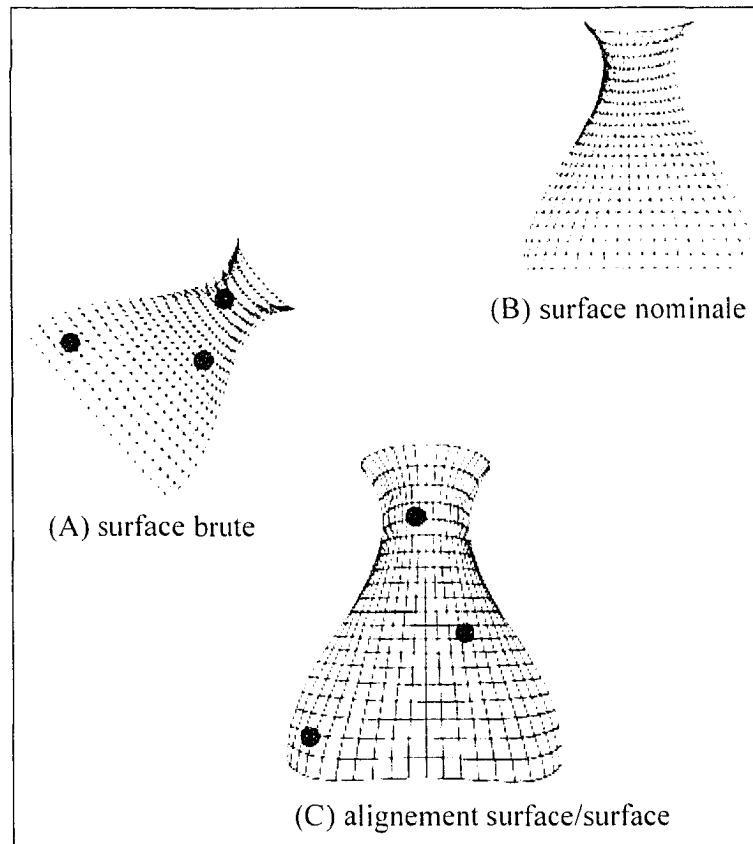


Figure 1 Alignement de type surface/surface

On constate que le principal avantage de cette technique est son indépendance de la position relative des deux surfaces, qui est propice à l'automatisation de l'inspection.

Toutefois, plusieurs inconvénients constituent un handicap majeur pour la généralisation de cette technique, car il ne faut pas oublier que la première surface est reconstruite à

partir d'un nuage de points relevé sur une pièce réelle, alors que la deuxième pièce représente la pièce nominale. Ce qui implique que ces deux surfaces ne possèdent pas nécessairement les mêmes caractéristiques géométriques. D'autre part, les courbures moyennes et gaussiennes sont des grandeurs de deuxième ordre, donc très sensibles aux bruits causés lors de l'opération de numérisation de la pièce à inspecter.

Malgré les inconvénients, on peut considérer cette technique comme une première étape pour rapprocher les deux surfaces et laisser la suite aux algorithmes itératifs connus par leur précision.

CHAPITRE 2

INTRODUCTION AU BALANCEMENT DES PIÈCES BRUTES

Pour introduire le lecteur à ce travail, il est indispensable de consacrer ce chapitre à un résumé détaillé des travaux de J.F. Châtelain [9, 15] sur le balancement des pièces brutes, et qui constituent le point de départ pour élaborer ce projet. Toutefois, et pour alléger le contenu de ce chapitre, les démonstrations mathématiques ainsi que quelques thèmes sur ce sujet ne seront pas abordés.

2.1 Problématique

Le positionnement des pièces sur les MOCN constitue une étape très importante pour la réussite de l'usinage, étant donné qu'avec une pièce mal positionnée, il pourrait y avoir des zones avec déficit de matériel lors de son usinage. Cela implique généralement le rejet de la pièce, donc un coût énorme pour la production si on considère le coût de la matière première et surtout le temps d'usinage perdu pour rien. Ainsi, une étude approfondie sur ce problème sera d'un grand intérêt.

D'autre part, et dans certains cas, il est inévitable d'avoir des déficits sur la pièce, on parle alors d'une solution non réalisable. Dans cette situation, et pour certaines applications, il est permis d'avoir des lacunes mais uniquement dans des zones bien déterminées, là où il sera possible de faire des réparations. Donc, le problème se transforme en un problème de balancement de pièces pour orienter les déficits vers des zones choisies.

Le problème se résume donc à retrouver un positionnement optimal d'une pièce brute sur la MOCN. Il faut d'abord chercher une solution réalisable de telle façon qu'une surépaisseur minimale pour l'usinage soit assurée sur toutes les surfaces à usiner et qu'aucun déficit en matériel ne soit observé. Dans le cas où cela n'est pas possible, il

faut fixer la priorité de chaque surface par rapport aux autres en lui affectant un facteur de pondération ω , pour ensuite balancer la pièce afin de garder les surfaces prioritaires intactes et orienter les lacunes vers les surfaces moins prioritaires.

La solution proposée utilise comme données initiales le modèle CAO de la pièce nominale ainsi que le nuage de points représentant la pièce brute. Le déroulement du balancement va se faire en trois étapes distinctes, comme le montre l'organigramme de la figure 2. Chaque étape retourne une matrice de transformation rigide du nuage de points par rapport au modèle CAO. La solution finale est donnée comme étant une matrice R^* calculée en concaténant ces trois matrices, soit :

$$R^* = R_c \circ R_u \circ R_0 \quad (2.1)$$

2.2 Transformation initiale

Cette étape est facultative, elle a pour but la mise des deux modèles dans le même système référentiel par le calcul d'une transformation quasi-inverse. Cette étape est aussi utile pour faire un premier rapprochement et éviter les convergences locales.

2.3 Rapprochement successif du nuage de points avec le modèle nominal sans tenir compte des contraintes

Cette étape a pour rôle de trouver une position optimale du nuage par rapport au modèle nominal. Cela se traduit par des rapprochements successifs des points à leur position correspondante sur la pièce nominale. La figure 3 illustre un exemple d'alignement de deux points (M_{d1} et M_{d2}) avec une surface nominale, en montrant trois itérations successives pour le rapprochement. À l'itération (glob), la position des points (M_{d1} et M_{d2}) est donnée par l'itération précédente (glob-1), cette position est représentée par les points ($M_{d1}^{(glob)}$ et $M_{d2}^{(glob)}$). La recherche des points correspondants

(D_{d1} et D_{d2}) sur la surface nominale se fait par la projection normale sur celle-ci, des points ($M_{d1}^{(glob)}$ et $M_{d2}^{(glob)}$). Si aucune projection normale n'est possible, le point D_{di} va correspondre au point le plus près sur la surface. L'itération (glob) se termine par l'obtention d'une matrice de transformation rigide optimale $R^{*(glob)}$, qui fait rapprocher les points ($M_{d1}^{(glob)}$ et $M_{d2}^{(glob)}$) aux points ($D_{d1}^{(glob)}$ et $D_{d2}^{(glob)}$), soit donc : $M_{di}^{(glob+1)} = R^{*(glob)} \circ M_{di}^{(glob)}$. Les nouveaux points ($M_{d1}^{(glob+1)}$ et $M_{d2}^{(glob+1)}$) vont servir comme les positions initiales des points de mesure pour l'itération (glob+1).

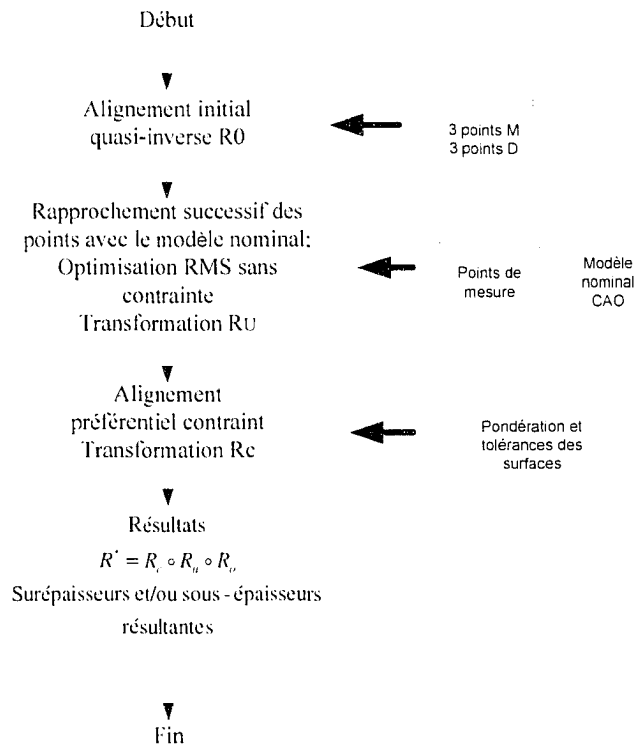


Figure 2 Algorithme de balancement des pièces

L'arrêt des itérations se fait lorsqu'un nombre maximal d'itérations est atteint, ou si les transformations entre deux itérations consécutives deviennent non significatives.

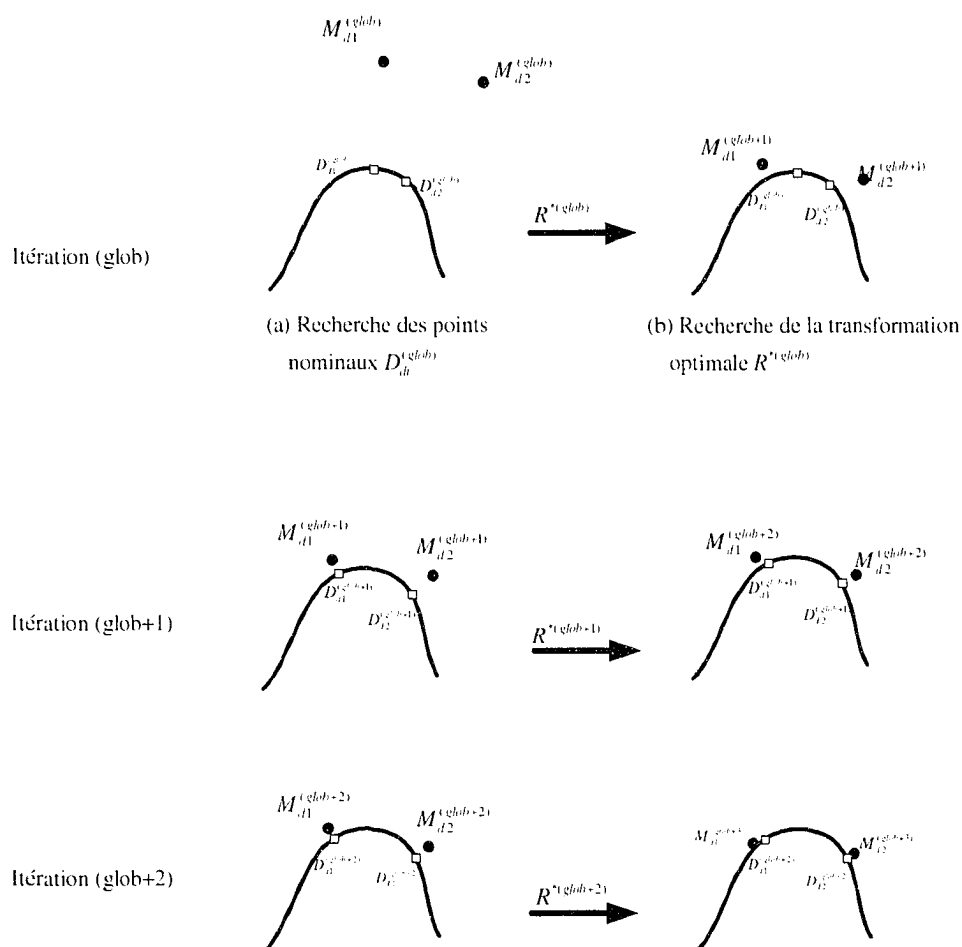


Figure 3 Exemple de rapprochement de deux points

La solution finale résultante R_u^* est obtenue en concaténant les matrices calculées à chaque itération globale. Pour "n" itérations on a :

$$R_u^* = R^{*(n)} \circ R^{*(n-1)} \circ \dots \circ R^{*(1)} \quad (2.2)$$

Les matrices de transformation rigide sont représentées comme suit :

$$R = \begin{bmatrix} c\phi c\theta & (c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi) & (c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi) & T_x \\ s\phi c\theta & (s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi) & (s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi) & T_y \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

où :

$c = \text{cosinus}$ et $s = \text{sinus}$

ψ, θ et ϕ représentent les trois angles d'Euler, T_x, T_y et T_z représentent les trois paramètres de translation dans un repère cartésien.

À chaque itération globale, le calcul de la matrice R^* qui fait le rapprochement des points, se fait en résolvant un problème d'optimisation qui vise à rapprocher le mieux que possible, l'ensemble des points de mesure M_{di} à leur points correspondants D_{di} . Ce problème est posé de la façon suivante :

$$\text{Minimiser la fonction objective } F(X) \text{ telle que : } F(X) = \sum_{i=1}^{np} d_{ei}^2 \quad (2.4)$$

$$\text{Où : } d_{ei} \text{ est la distance euclidienne, } d_{ei} = \|R^* \cdot M_{di} - D_{di}\| \quad (2.5)$$

$$X \text{ représente le vecteur paramètres, } X = (\psi, \theta, \phi, T_x, T_y, T_z) \quad (2.6)$$

np est le nombre de points de mesure.

La fonction objective choisie, correspond en fait, à la méthode RMS (somme des moindres carrés). Elle calcule pour chaque vecteur paramètres X la somme des carrés des distances entre les points de mesure et la pièce nominale. Elle constitue donc un indicateur sur le rapprochement. La minimisation de cette fonction se fait en résolvant

un problème d'optimisation non linéaire et sans contrainte par le biais d'une méthode d'optimisation directe. La méthode utilisée est celle de Newton.

2.4 Alignement en tenant compte des contraintes et des priorités

Le résultat donné par l'étape précédente représente une bonne approximation pour la solution finale, surtout si celle-ci est réalisable. La deuxième étape va continuer le même rapprochement mais avec la différence qu'on va tenir compte du fait que les points de mesure sont à l'intérieur ou non de la pièce nominale. Cela a pour but d'essayer de les garder à l'extérieur, donc d'envelopper le modèle CAO de la pièce nominale par la pièce brute. Ainsi, nous nous retrouvons avec un problème d'optimisation avec contraintes. Ces contraintes vont correspondre à la situation de chaque point. La contrainte P_j appliquée au point de mesure j , est définie comme suit :

$$P_j = d_{eoj} \quad \text{avec } d_{eoj} : \text{ la distance euclidienne orientée}$$

$$d_{eoj} = d_{ej} \quad \text{si le point } j \text{ est à l'extérieur de la pièce nominale}$$

$$d_{eoj} = -d_{ej} \quad \text{si le point } j \text{ est à l'intérieur de la pièce nominale}$$

La violation d'une contrainte P_j signifie que le point y étant associé, se trouve à l'intérieur de la pièce nominale. Cette situation est à éviter puisqu'elle est la source d'une zone de sous épaisseur entourant le point en question.

D'autre part, et dans le cas où il n'existe aucune solution réalisable, cette étape offre la possibilité d'orienter les zones de déficits en matériel, vers des régions de la pièce choisies d'avance. Ceci se concrétise en affectant à chaque région un facteur de pondération ω_i qui indique son niveau de priorité. La pondération ω_i peut prendre des valeurs entières de 0 à 9, le niveau 0 étant le niveau de priorité le plus bas. La figure 4 représente un exemple de balancement d'une pièce où on distingue deux résultats différents dépendant des priorités imposées. Dans les deux cas, la solution retrouvée n'est pas réalisable, donc le déficit en matériel est inévitable. Pour le premier cas, les

zones (1), (2) et (3) sont déficitaires car elles sont les moins prioritaires, alors que la deuxième solution montre un déficit en matériel uniquement dans la zone (4), celle-ci étant, dans ce cas, la moins prioritaire.

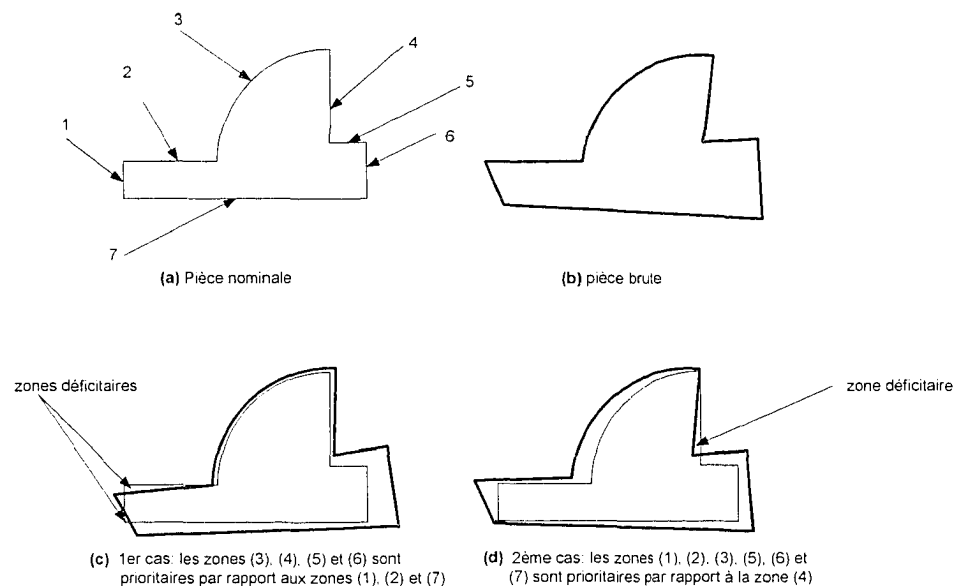


Figure 4 Exemple de balancement de pièces

Il faut mentionner que la procédure responsable pour l'exécution de la présente étape, doit être en mesure d'avoir comme point de départ un état non-réalisable et d'arriver à un état réalisable. Si ce dernier est impossible à atteindre, la solution obtenue doit être optimale du point de vue priorité des régions.

La méthode choisie pour une telle optimisation est une méthode indirecte d'optimisation avec contraintes. C'est une méthode qui transforme le problème contraint en un problème non contraint. Pour cela, la fonction objective U devient composée de deux fonctions :

$$U = U_{réel} + U_{art} \quad (2.7)$$

avec :

$U_{réel}$: fonction réelle

U_{art} : fonction artificielle

La première est appelée fonction réelle. Elle vise à minimiser la surépaisseur maximale sur toutes les surfaces de la pièce. Elle pourrait être de type RMS ou bien de type MINIMAX.

La deuxième est appelée fonction artificielle; elle est active seulement pour les points se trouvant en état de violation de contrainte, et a pour rôle la pénalisation de la fonction objective. Cette pénalisation doit tenir compte du niveau de priorité de la région où se produit la violation des contraintes ainsi que de l'amplitude de cette violation.

La fonction artificielle doit répondre aux exigences suivantes :

une violation d'une seule contrainte dans une région de priorité supérieure ω_x , engendre une pénalisation plus grande que si toutes les contraintes de niveaux inférieurs à ω_x sont violées, donc l'amélioration de cette fonction se traduit par la minimisation des contraintes violées par ordre décroissant de leur niveau de priorité.

La fonction artificielle proposée est la suivante :

$$U_{art} = \sum_{j=1}^{nviol} 1E(c + b\omega_j) \cdot \log_{10} \left(P_j^2 \cdot 1E(v + a\omega_j) \right) \quad (2.8)$$

$nviol$: nombre de points en état de violation de contrainte

$$P_j = d_{voj} \leq -ZERO = -1E(-10) \quad (2.9)$$

Une contrainte P_j est considérée en état de violation de contrainte si la distance d_{voj} est inférieure à une certaine constante négative appelée ZERO. Cette constante est choisie non nulle pour éviter des problèmes relatifs au calcul numérique.

Les paramètres c , b , v et a sont calculés pour répondre aux exigences mentionnées ci-haut, ainsi qu'aux conditions suivantes :

- Le nombre maximal de niveau de priorité est de 10. Le facteur de pondération peut prendre les valeurs suivantes : $\omega_j = 0, \dots, 9$ (2.10)
- Le nombre maximal de contrainte dans chaque niveau est 100
- Les contraintes P_j sont adimensionnelles : $-1 \leq P_j = d_{voj} \leq 1$ (2.11)
- Le nombre maximal de points de mesure est 10000 points
- La valeur maximale de la fonction objective ne doit pas dépasser 1^E (308)

Ainsi, la fonction artificielle devient :

$$U_{art} = \sum_{j=1}^{nviol} (1E(23.\omega_j + 3).(21 + \log_{10}(P_j^2))) \quad (2.12)$$

On remarque que la fonction artificielle fait un saut entre deux niveaux de priorités consécutifs, pour laisser un intervalle entre la valeur maximale d'un niveau inférieur et la valeur minimale du niveau suivant; ce qui permet de remplir les exigences demandées ci-haut [9]. Cela se concrétise par la relation suivante :

$$U_{art(s1)} + U_{art(s2)} + \dots + U_{art(sk-1)} < U_{art(sk)} \quad (2.13)$$

où : $U_{art(si)}$ est la fonction artificielle pénalisant tous les points qui se trouvent en état de violation de contrainte, et appartenant à la zone (si). La zone (sk) possède le niveau de

priorité le plus élevé par rapport à celui des autres zones. Cette relation est vérifiée quel que soit le nombre de points violant les contraintes.

2.4.1 Résolution du problème d'optimisation

La méthode choisie pour résoudre le problème d'optimisation est la méthode du polytope Simplex. Dans notre cas on a besoin d'optimiser le vecteur X qui se compose de six paramètres. La méthode du Simplex sera donc appliquée dans un espace à six dimensions. Cela consiste à construire une géométrie, à $n+1$ sommets dans l'espace à n dimension, appelé simplex. Chaque sommet représente la valeur de la fonction objective pour un vecteur X donné. Pour arriver à un minimum, le Simplex doit faire plusieurs mouvements dans l'espace, ces mouvements sont définies comme suit :

$$\text{la réflexion : } X^r = X^0 + \alpha(X^0 - X^h) \quad (2.14)$$

$$\text{l'accélération : } X^a = X^0 + \gamma(X^r - X^0) \quad , \gamma > 1 \quad (2.15)$$

$$\text{la contraction : } X^c = X^0 + \beta(X^h - X^0) \quad , 0 < \beta < 1 \quad (2.16)$$

$$\text{le rétrécissement : } X^j = (X^j + X^l) / 2 \quad (2.17)$$

Où :

$X^j = (x_0, x_1, \dots, x_n)$, est un sommet quelconque du simplex

$$X^0 \text{ est le centroïde du simplex : } X^0 = 1/n \sum_j X^j \text{ avec } j = 1, \dots, n+1 \text{ et } j \neq h \quad (2.18)$$

X^h a la plus grande valeur objective

X^l a la plus faible valeur objective

X^s a la deuxième plus faible valeur objective

La figure 5 donne l'exemple d'un Simplex dans l'espace à deux dimensions, qui entreprend plusieurs mouvements pour atteindre le minimum d'une fonction. Dans ce cas, le Simplex possède trois sommets. À chaque itération, les sommets X^h , X^l et X^s sont

identifiés et le centroïde X^0 est calculé. On remarque qu'en s'approchant du minimum (point $(x=0, y=0)$), la taille du simplexe diminue graduellement jusqu'à ce qu'il s'arrête.

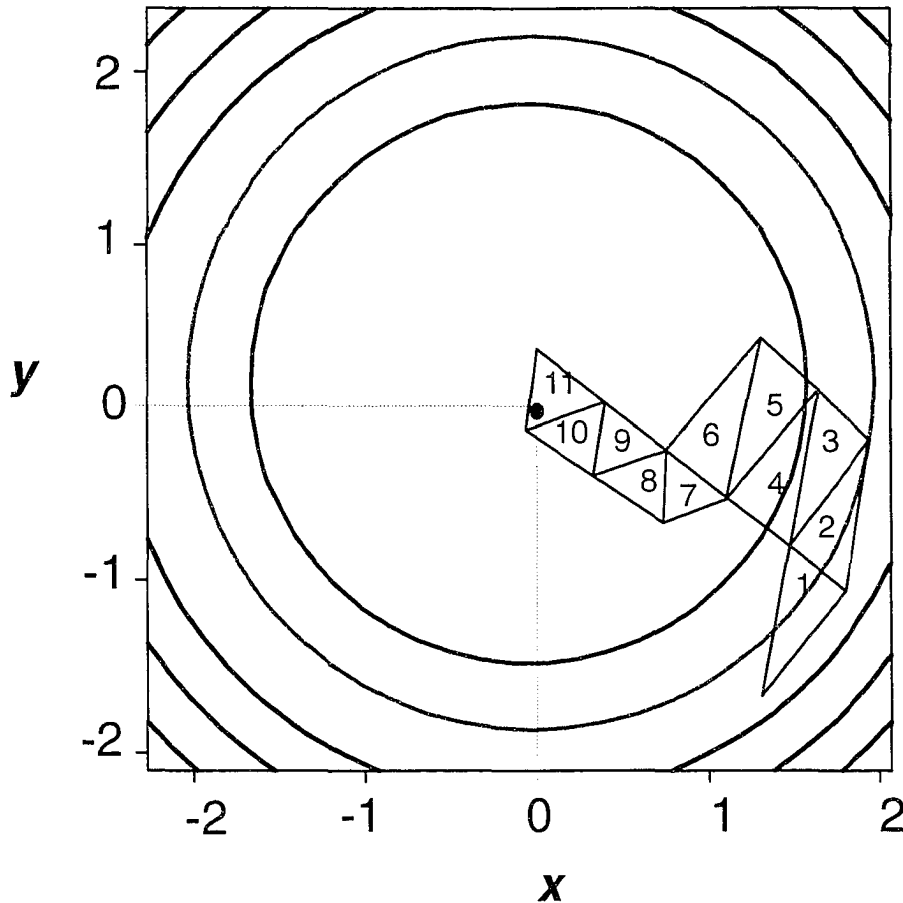


Figure 5 Exemple d'une recherche du minimum d'une fonction par la méthode du simplexe

L'algorithme d'optimisation par le Simplex représente un problème d'alignement point/point, car il essaie durant les itérations du simplexe "*it*" de rapprocher les points $M_{ij}^{(glob)}$ à leurs points nominaux respectifs $D_{ij}^{(glob)}$ en calculant à chaque itération un vecteur paramètre $X^{(it)}$, donc une matrice de transformation rigide $R^{(it)}$ pour faire baisser la valeur de la fonction objective U . la condition de convergence de cet algorithme est le dépassement d'un nombre maximal d'itération (it_{max}), ou lorsque la taille du simplexe

devient très petite et que l'amélioration entre deux itérations consécutives devient peu significative. Cela se traduit par les conditions suivantes :

$$\text{Conditions d'arrêt : } \left\{ \begin{array}{l} it \geq it_{\max} \\ \text{ou} \\ \frac{U_i^{(it-1)} - U_i^{(it)}}{U_i^{(it-1)} + U_i^{(it)}} < \varepsilon_1 \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \sqrt{\sum_{j=1}^n (U_j^{(it)} - U_0^{(it)})} < \varepsilon_2 \quad (2.19)$$

Le résultat est donné sous la forme d'un vecteur paramètre optimal X^* donnant lieu à une nouvelle position pour les points $M_{d_j}^{(glob)}$. Le déroulement de l'algorithme du Simplex est représenté par l'organigramme de la figure 6 [16, 17].

2.4.2 Calcul des distances euclidiennes orientées

L'évaluation de la fonction objective se base en premier lieu sur le calcul des distances euclidiennes d_{ej} qui représentent la distance entre le point $D_{d_j}^{(glob)}$ et le point calculé à chaque itération du simplex, et en second lieu, sur le calcul des distances euclidiennes orientées :

Le test d'appartenance d'un point au modèle nominal se fait par le biais de l'approximation conservatrice suivante :

$$d_{ej} = \text{sign}(n_j \cdot d_{d_j}) \cdot \|d_{d_j}\| \quad (2.20)$$

comme le montre la figure 7.

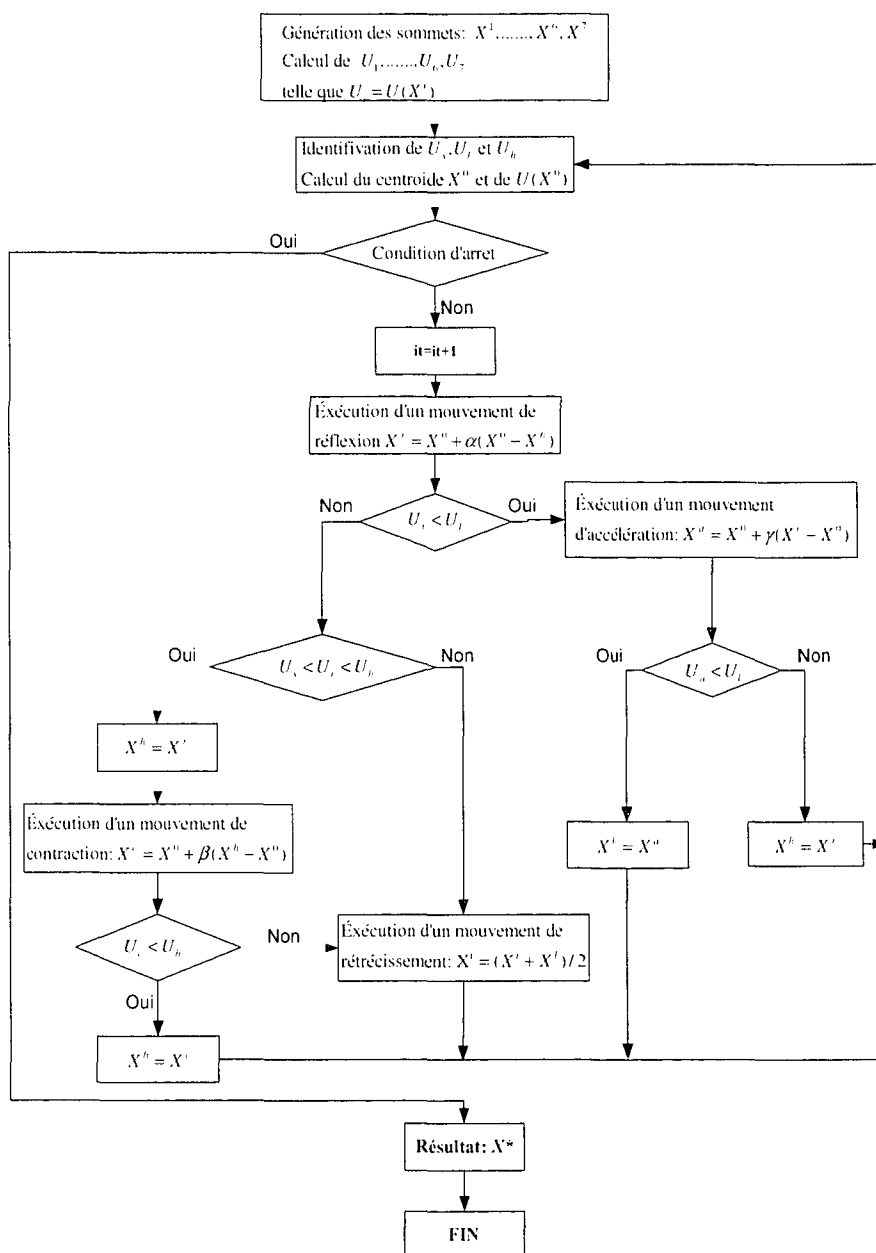


Figure 6 Algorithme de la méthode Simplex

n_j : vecteur normal à la surface au point D_j . Il est orienté vers l'extérieur de la pièce.

d_{dj} : vecteur déviation entre le point M_{dj} et le point D_{dj} .

si $sign(n_j \cdot d_{dj}) = (-)$ \Rightarrow le point est à l'intérieur de la pièce nominale

si $sign(n_j \cdot d_{dj}) = (+)$ \Rightarrow le point est à l'extérieur de la pièce nominale.

Pour calculer $(n_j \cdot d_{dj})$, le vecteur d_{dj} est corrigé selon le type de surface à traiter (surface plane, concave, convexe, sphérique...), soit :

$$d_{dj} = R^{(it)} \cdot M_{dj} - D_{dj} - \xi_j \quad (2.21)$$

ξ_j étant le facteur de correction au point j .

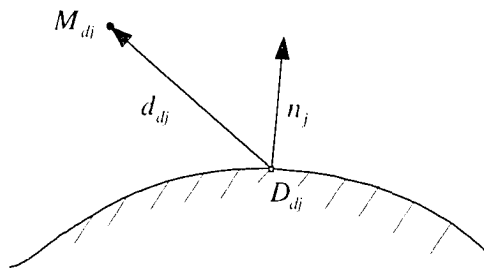


Figure 7 Approximation pour le test d'appartenance des points à la pièce nominale

2.4.3 Correcteur de la distance orientée

La correction par le facteur ξ vise à corriger l'orientation de la distance euclidienne (le signe) pour tenir compte de la géométrie des surfaces traitées. La figure 8 explique la nécessité d'une telle correction, car le fait d'avoir tous les points de mesure à l'extérieur de la pièce nominale ne garantit pas l'absence de zones déficitaires en matériel.

La correction dans ce cas se fait en calculant une distance λ qui est fonction de la géométrie de la surface brute et de la surface nominale. D'ailleurs, l'auteur propose deux types d'approximation pour le calcul de λ , l'une est une approximation sphérique, l'autre est cylindrique.

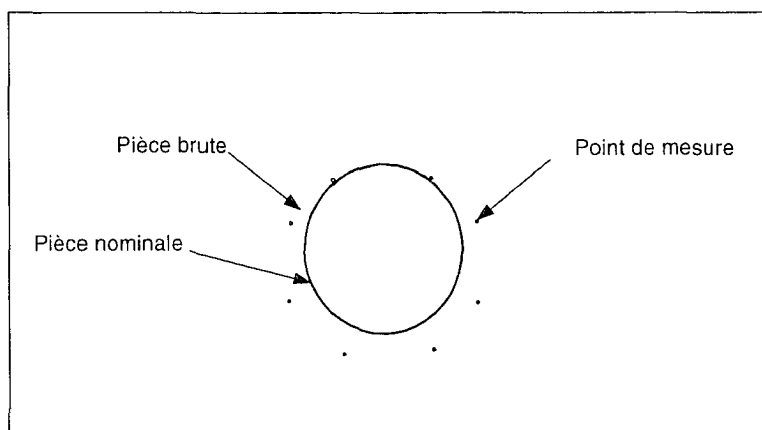


Figure 8 Cas d'erreur possible sans l'utilisation du facteur de correction ξ

De plus, et dans le cas où la mesure des points se fait par un capteur tactile sphérique de rayon connu, λ peut jouer le rôle de compensateur pour ce rayon.

Une autre variable qui peut intervenir dans le calcul de ξ , est l'épaisseur minimal δ de la croûte qui doit être enlevée sur les surfaces brutes lors de l'usinage. Cette épaisseur peut être corrigée à son tour par la compensation liée aux tolérances.

Finalement le correcteur ξ est exprimé comme suit : $\xi_j = (\delta + \lambda_j) \cdot \mu_j$ (2.22)

Avec μ_j étant le vecteur directeur unitaire calculé à partir d'une approximation qui dépend du type de surface à traiter. Dans le cas d'une surface plane, ce vecteur est confondu avec le vecteur normal au point projeté D_{dj} .

CHAPITRE 3

DÉVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE MÉTHODE D'ALIGNEMENT ET INTÉGRATION DE L'ALGORITHME DE BALANCEMENT DANS CATIA V5

Nous proposons dans ce chapitre une nouvelle méthode d'alignement qui se base essentiellement sur l'utilisation des surfaces pour superposer deux pièces, au lieu d'utiliser des points. Ce qui va nous permettre de transformer la méthode d'alignement point/surface en une méthode d'alignement surface/surface, moyennant quelques hypothèses. Cela constitue un aspect innovateur non encore abordé par les chercheurs travaillant dans ce domaine. Cela a pour but l'amélioration de la technique de balancement de pièces brutes introduite au chapitre précédent. D'autre part, et pour rendre cette technique plus facile à utiliser et à appliquer dans l'industrie, nous l'avons intégré dans le logiciel de CAO CATIA V5 qui offre plusieurs outils de conception, d'analyse et de manipulation de modèles et de produits. Ces outils nous ont aidé à améliorer et à simplifier d'une façon considérable l'algorithme de balancement, en substituant quelques approximations par des calculs exacts ou du moins par des simplifications plus justes.

La démarche adoptée consiste à commencer par intégrer l'algorithme existant dans CATIA V5, ensuite justifier la nécessité d'introduire la nouvelle méthode d'alignement surface/surface, et finalement expliquer le principe théorique de cette méthode et la manière de l'intégrer dans le logiciel.

3.1 Présentation de CATIA V5

CATIA V5 est un logiciel de conception qui utilise la notion de maquette numérique pour représenter l'ensemble des données informatiques permettant de manipuler un objet aussi bien ou mieux qu'on ne pourrait le faire avec une maquette réelle ou un prototype. De plus, il fournit une large gamme de solutions intégrées pour convertir tous les aspects

de conception, d'analyse et de fabrication. Ce logiciel est organisé en modules fonctionnels nommés « atelier » pour permettre à chacun de créer ou modifier un type d'objet bien précis par le biais de commandes interactives [18, 19].

D'autre part, CATIA V5 offre aux développeurs la possibilité de programmer des nouvelles fonctionnalités pour automatiser certaines tâches répétitives ou pour développer des fonctions personnalisées. Cela est rendu possible par le module additionnel CAA V5, qui offre entre autre une interface de programmation en VISUAL BASIC (CAAV5-CATIA VB Automation) intégré dans CATIA V5.

Le CAA V5 *Automation* renferme de nombreuses bibliothèques de fonctions qui remplacent les commandes interactives de l'interface CATIA V5. Parmi elles, on distingue la bibliothèque *SPATypelib* (Space Analysis Interfaces Object Library) qui, à partir de la version R10 de CATIA V5, propose les fonctions les plus pertinentes pour notre application. Pour notre cas, nous avons utilisé la version CATIA V5 R13.

3.2 Intégration de l'application existante au logiciel CATIA V5

Pour l'intégrer dans CATIA V5 R13, l'algorithme de balancement des pièces brutes doit subir certaines modifications pour l'adapter aux fonctions disponibles dans la librairie de l'interface VB de CATIA V5. En effet, l'opération de balancement sera constituée de deux phases distinctes; la première va se faire d'une façon manuelle par le biais des fonctions interactives de CATIA. Alors que la deuxième représentera l'ensemble des opérations qui vont être programmées en VISUAL BASIC. L'organigramme de la figure 9 décrit sommairement les deux phases en questions, et qui consistent à entrer les données dans CATIA V5 pour les traiter et les préparer pour la deuxième phase. Celle-ci représente les étapes automatisées des rapprochements non contraints et préférentiels des points. Les résultats sont récupérés sous deux formes, la première est un fichier

contenant les informations utiles pour le positionnement de la pièce brute, la deuxième est une représentation graphique sur l'interface de CATIA V5.

3.2.1 Phase manuelle

Pour commencer, nous devons créer un fichier de type *CATProduct* dans lequel on va assembler deux pièces de type *CATPart*. Ces dernières représentent la pièce brute et le modèle nominal. Dans le cas où celui-ci n'est pas modélisé sous CATIA V5, il doit être transformé en fichier de format compatible tel que les fichiers de type *IGS*.

3.2.1.1 Traitement du nuage de points

Pour avoir un nuage de points représentant le plus fidèlement possible la pièce brute, il faut qu'il soit dense et précis. Mais généralement, la précision de mesure peut fluctuer pour des raisons liées aux instruments ou à l'environnement de mesure. Pour remédier à cet inconvénient, il est préférable de construire une surface moyenne à partir de ce nuage, de telle façon à éliminer les bruits de mesure et ainsi donner un résultat plus représentatif de la surface réelle. Dans ce contexte, CATIA V5 propose une fonction interactive appelée *Powerfit* disponible dans l'atelier *Quick Surface Reconstruction*, qui prend comme données initiales un nuage de points ainsi que les contours de la surface et/ou une surface semblable à la surface brute (surface nominale par exemple). La surface à reconstruire est une surface modélisée de type NURBS. Ce type de surface possède des propriétés mathématiques qui ne lui permettent pas d'avoir des arêtes vives ou des discontinuités. C'est pour cette raison qu'il faut veiller à ce que le nuage de points soit relevé sur une surface lisse, continue et sans arêtes vives. Cela signifie que la numérisation de la pièce brute doit se faire après que celle-ci soit répartie en plusieurs surfaces distinctes. Ce qui permet d'avoir un ensemble de nuages de points, décrivant chacun une seule surface. L'annexe 1 explique en détail les propriétés de la fonction *powerfit*.

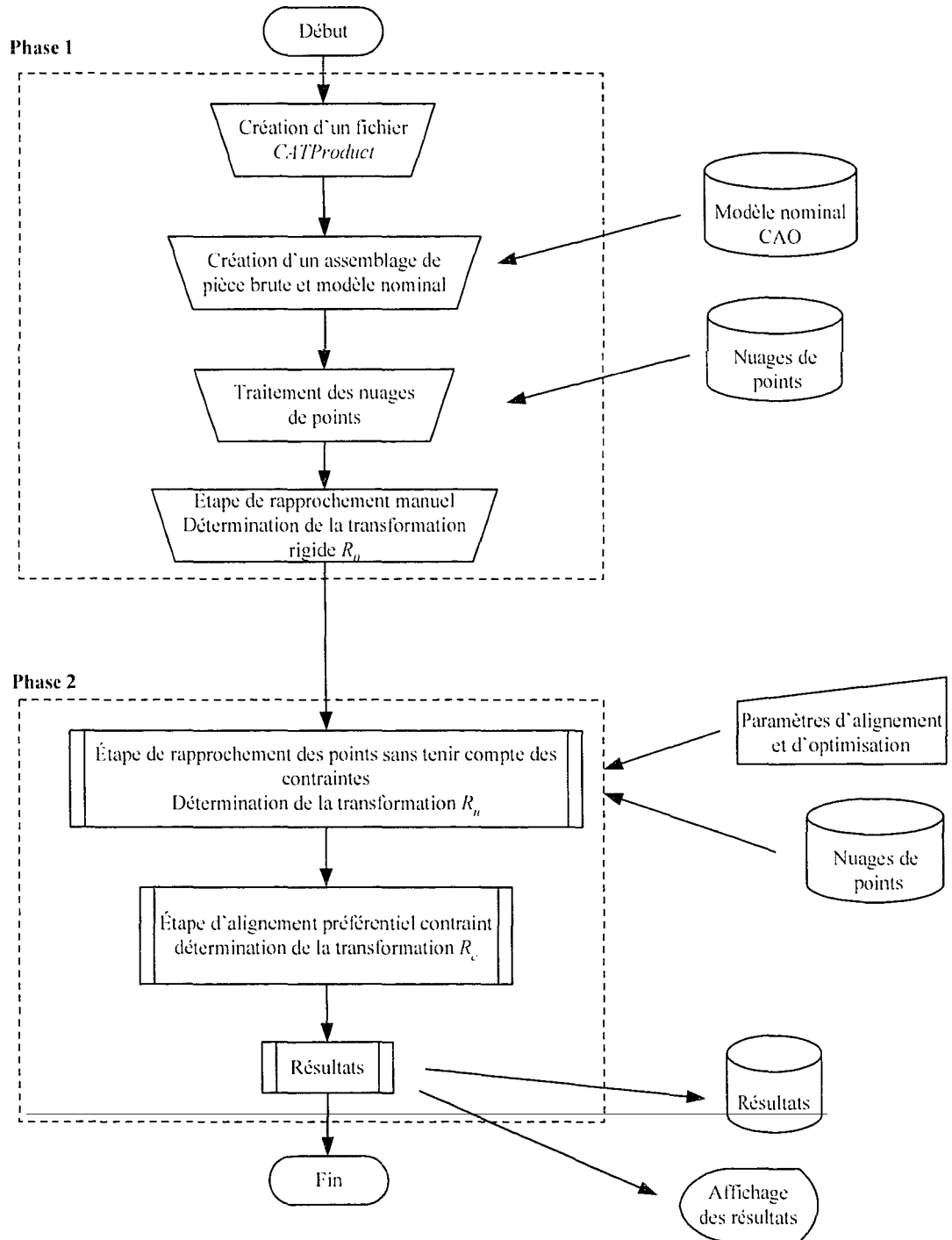


Figure 9 Organigramme des phases de l'algorithme de balancement

De cette manière, on peut obtenir un deuxième ensemble de nuages plus précis en extrayant sur chaque surface reconstruite le nombre de points voulu. Ces nouveaux nuages de points serviront par la suite aux opérations d'alignement et de balancement.

Pour extraire un nouveau nuage de points à l'aide de CATIA V5, au moins deux méthodes sont possibles. La première est une méthode de maillage de surfaces avec l'atelier *Advanced Meshing Tools*, qui donne comme résultat un fichier contenant les coordonnées des nœuds. Ce dernier ensemble va être considéré comme étant le nouveau nuage de points (figure 10). La deuxième méthode consiste à relever des points sur la surface à partir de leurs coordonnées paramétriques.

3.2.1.2 Première étape : rapprochement manuel

Contrairement au chapitre précédent, cette étape est réalisée manuellement pour rapprocher d'une façon approximative les nuages de points à la pièce nominale pour éviter, dans les étapes qui suivent, les risques de convergence locale. Cette opération est possible par l'utilisation d'une fonction simple sur CATIA V5 qui permet de glisser avec la souris, une pièce par rapport à une autre en la faisant translater ou pivoter.

3.2.2 Phase automatisée

3.2.2.1 Deuxième étape : rapprochement successif sans contraintes

Cette étape consiste à faire des rapprochements successifs de la pièce brute avec le modèle nominal, et les visualiser en temps réel sur l'interface de CATIA V5. L'organigramme de la figure 11 décrit sommairement la procédure itérative qui accomplit cette tâche.

Le programme commence par visualiser les nuages de points en les représentant dans l'arbre de spécification de CATIA comme étant des éléments de construction (figure

12). Par la suite, les itérations de rapprochements débutent en calculant à chaque itération *glob* les points nominaux D_{dj}^{glob} par la procédure *ptproche*. Ces points seront utilisés par la procédure d'optimisation *amoeba* qui va chercher la transformation rigide optimale $R^{*(glob)}$ pour ramener les points M_{dj}^{glob} près de leurs points nominaux respectifs. La matrice $R^{*(glob)}$ sera appliquée par la procédure *applytransrigide* pour visualiser la nouvelle position des points. Finalement, les itérations s'arrêtent lorsque le nombre d'itérations *glob* atteint un nombre maximal *nglobmax*, ou si la différence entre deux vecteurs paramètres successifs est inférieure à une valeur ΔX .

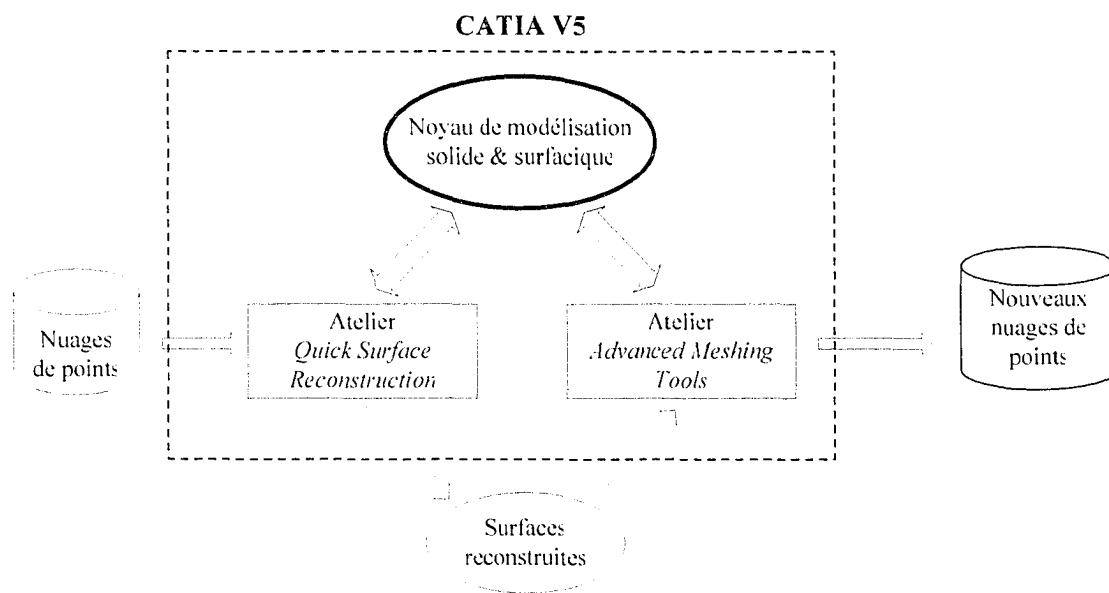


Figure 10 Transformation du nuage de points

3.2.2.1.1 Calcul des points les plus proches

La procédure *ptproche* se base essentiellement sur la fonction *minimumdistancepoints* offerte par le module CAA V5. Cette fonction calcule les coordonnées des deux points les plus proches appartenant à deux éléments qui existent dans le même corps d'une pièce.

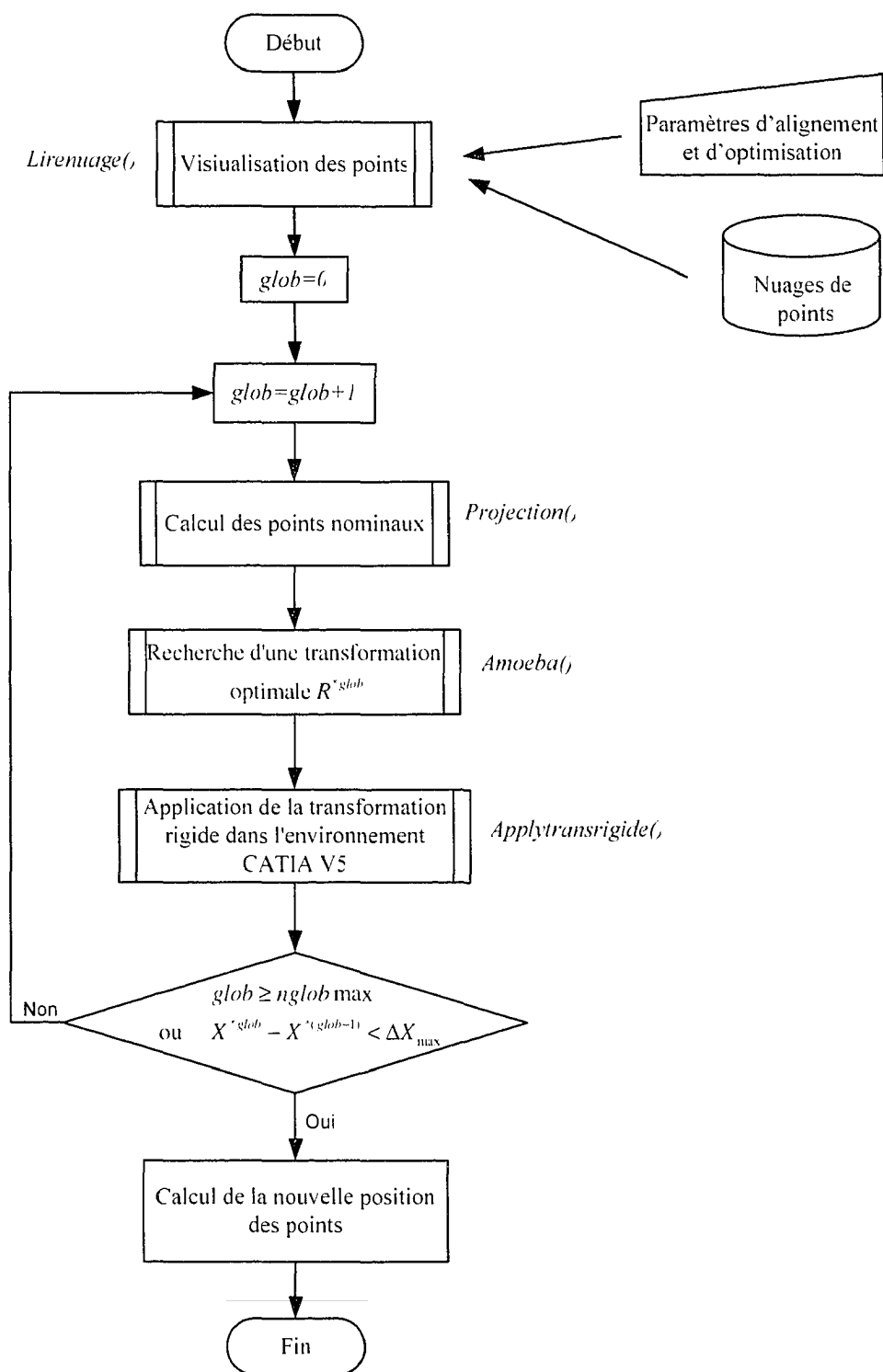


Figure 11 Algorithme de l'étape d'alignement non contraint

Dans notre cas, elle calcule les coordonnées du point le plus proche sur la surface nominale. La figure 13 montre les deux cas que peut traiter cette fonction.

3.2.2.1.2 Problème d'optimisation

Au chapitre 2, l'opération d'optimisation a été faite différemment pour résoudre les problèmes sans contraintes et avec contraintes, en utilisant dans le premier cas la méthode de Newton-Raphson et dans le deuxième cas la méthode du Simplex. Dans ce travail, seule la méthode du polytope Simplex est utilisée pour les deux problèmes, malgré qu'elle ait l'inconvénient d'être très coûteuse en terme de temps de calcul. Mais étant donné que le temps mis pour accomplir cette étape est négligeable devant celui de la troisième étape (alignement en tenant compte des contraintes), le temps total d'exécution du programme ne sera que sensiblement affecté.

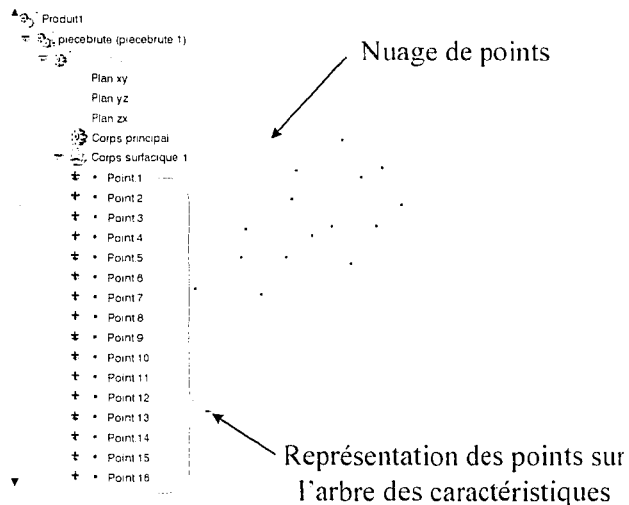


Figure 12 Visualisation des nuages de points avec l'interface de CATIA V5

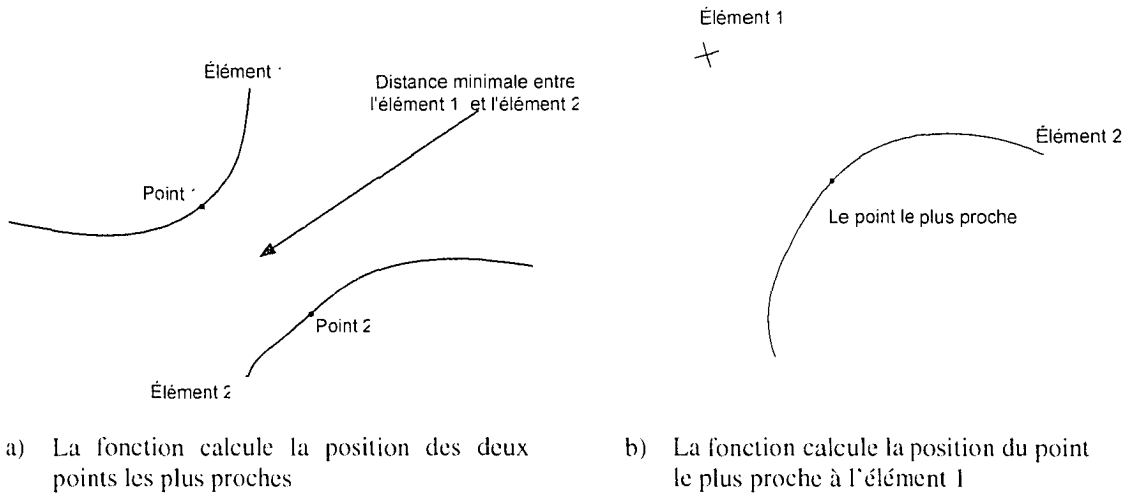


Figure 13 Propriétés de la fonction *minimumdistancepoints*

D'autre part, il est facile de prévoir que la méthode du Simplex pourra résoudre le problème d'optimisation de la présente étape avec succès, étant donné que la fonction objective de la deuxième étape est une partie de celle de la troisième étape. Rappelons que :

Pour la 2^{ème} étape, la fonction objective est définie comme suit :

$$F(X) = \sum_{i=1}^{np} d_{ci}^2 \quad (3.1)$$

Pour la 3^{ème} étape, la fonction objective est définie comme suit :

$$U = U_{réel} + U_{art} \quad (3.2)$$

avec :

$$U_{réel}(X) = F(X) \quad (3.3)$$

Ainsi, il n'est pas nécessaire de programmer, pour chaque étape, une technique d'optimisation différente. On appellera la procédure d'optimisation *amoeba*.

3.2.2.1.3 Application de la transformation rigide

Pour appliquer une transformation rigide à une pièce par rapport à une autre, la procédure *applytransrigide* utilise la méthode *move* proposée par le CAAV5, et qui prend comme paramètres la matrice de transformation ainsi que le nom de la pièce à déplacer.

3.2.2.2 Troisième étape : alignement avec prise en compte des contraintes et des pondérations

Les puissants outils d'analyse offerts par CATIA V5, nous ont permis d'améliorer la précision et l'efficacité de cette étape. Cela va se traduire par des modifications faites sur l'algorithme, ainsi que sur la méthode utilisée pour évaluer la fonction objective. Les paragraphes qui suivent traiteront en détails ces changements.

3.2.2.2.1 Test d'appartenance des points à la pièce nominale

Dans le chapitre 2, le test d'appartenance d'un point à la pièce nominale se fait par une méthode basée sur des approximations géométriques, alors que dans notre cas, CATIA V5 offre la possibilité de le faire d'une façon exacte. En effet, la librairie *SPAnalysis* nous propose la méthode *clash* qui teste la collision entre deux pièces visibles dans l'environnement CATIA. Le résultat que donne cette méthode représente le nombre d'interférences qui existent entre les pièces en questions; donc si ce nombre est nul, cela veut dire qu'il n'y a aucune collision. Cependant, deux problèmes se posent pour employer cette fonction dans notre cas d'application, et qui sont :

- A. Cette fonction ne peut pas détecter l'interférence entre un point et un solide, vu que le point n'est pas considéré comme étant une entité matérielle qui peut avoir des dimensions.
- B. La fonction du test de collision possède les propriétés suivantes :

1. Le test de collision n'est applicable que pour un ensemble de deux pièces ou plus.
2. Les collisions ne sont détectées que pour les objets visibles sur l'interface CATIA (les pièces qui se trouvent dans l'espace *show*).
3. Dans le cas où une pièce est formée de plusieurs éléments non connexes (dans notre cas des points), le test de collision ne peut pas se faire pour détecter l'interférence entre un seul de ces éléments et l'autre pièce.

Cela veut dire qu'on ne pourra pas tester la collision entre un seul point et un solide.

Pour surmonter ces difficultés, nous allons procéder comme suit :

- Modéliser chaque point par une sphère de rayon infinitésimal. Le rayon minimal d'une sphère qui permet la détection de l'interférence, est $4\mu\text{m}$. Cette valeur est obtenue après quelques essais. Par conséquent, on va modéliser les nuages de points par des nuages de sphères de rayons $4\mu\text{m}$.
- Rendre tous les éléments de la pièce brute invisibles en les renvoyant dans l'espace *noshow* de CATIA, sauf pour l'élément dont on désire tester la collision. De cette façon, lors du test de collision des nuages de sphères, on renvoie tous les nuages dans l'espace *noshow*, ensuite on renvoie les sphères une à une dans l'espace *show* pour ensuite effectuer le test de collision. La procédure permettant l'exécution de toutes ces opérations est appelée *testclash*, elle est détaillée dans le diagramme de la figure 14.

3.2.2.2 Correction de la fonction artificielle

La fonction artificielle a le rôle de pénaliser la fonction objective si une zone en déficit de matériel se présente. Cela est détecté par une interférence entre les points et le modèle

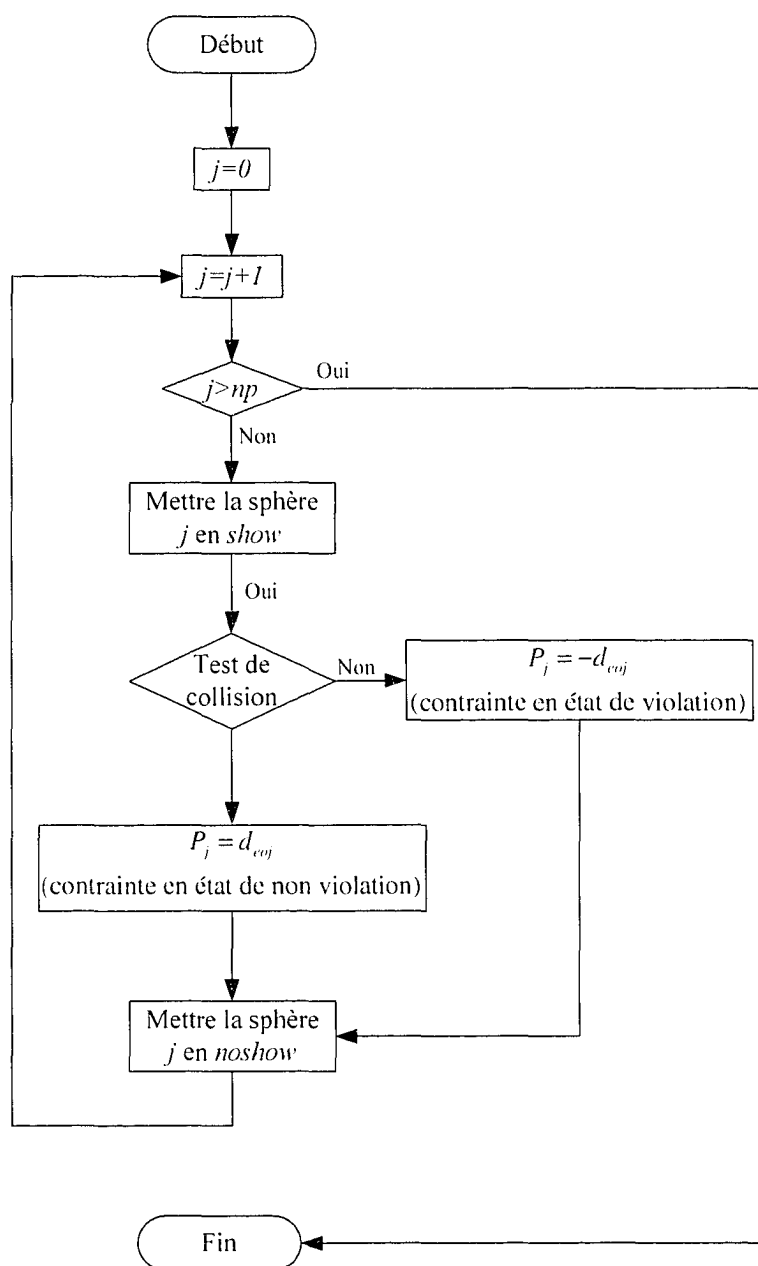


Figure 14 Algorithme du test d'appartenance des points au modèle nominal

nominal. Mais cette approche est insuffisante, étant donné que l'état d'interférence des points ne peut pas donner une idée réelle sur d'éventuelles collisions entre la surface brute et la pièce nominale. La figure 15 montre un cas particulier où les points de mesure sont à l'extérieur de la pièce nominale, alors que la surface brute ne l'est pas. On a alors une zone de sous-épaisseur entre ces deux points.

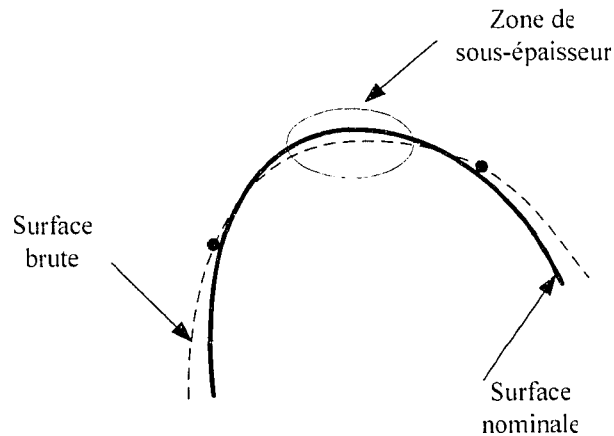


Figure 15 Représentation d'un cas d'imprécision de l'algorithme de balancement

On peut corriger un tel état en agissant sur les deux points, représentés sur la figure 15, pour les déplacer vers l'extérieur de la pièce jusqu'à l'obtention d'un état satisfaisant. La figure 16 illustre cette solution.

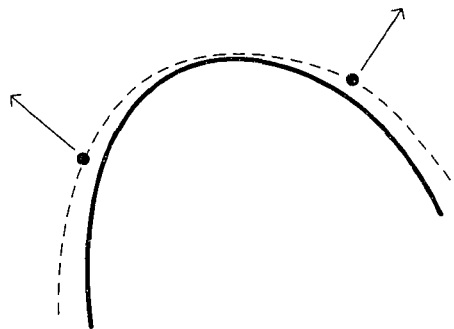


Figure 16 Mouvement attribué aux points pour corriger la situation d'imprécision

Pour arriver à accomplir cette opération d'une façon automatisée, on doit nécessairement se préoccuper de deux choses; la première est d'identifier les points qui doivent être déplacés lorsqu'une zone donnée se trouve en état de sous épaisseur. La seconde, est de traduire cet état particulier de violation de contraintes par la fonction artificielle.

Le problème consiste à connaître la relation entre les points et le reste de la surface. Pour y arriver, nous proposons la solution suivante : on subdivise la surface brute, précédemment reconstruite, en des entités surfaciques distinctes. Chacune de ces entités doit contenir un seul point, pour que celui-ci puisse être déplacé si l'élément surfacique interfère avec la pièce nominale. On a donc, autant d'entités surfaciques que de points.

La subdivision d'une surface complexe dans CATIA V5 est une opération assez délicate surtout si on doit le faire d'une façon automatisée qui respecte la condition que chaque élément surfacique ne doit contenir qu'un seul point. Ceci nous a amené à proposer une méthode basée sur la construction d'éléments surfaciques de forme circulaire. L'idée consiste à extraire de la surface brute une portion qui peut être décrite dans une sphère ayant comme centre un point appartenant à cette même surface. La figure 17 schématise l'opération de construction de ces portions par intersection entre une sphère et une surface. Cette opération est répétée pour tous les points constituant les nuages. De ce fait, nous avons transformé les surfaces brutes en un ensemble de portions qui pourraient couvrir la majorité de l'aire surfacique d'origine. De plus, cette opération est parfaitement automatisable avec le module CAA V5. La figure 18 représente un exemple de transformation de surface en un ensemble de portions surfaciques.

Il faut noter qu'après être transformée en portions, la surface brute n'est pas perdue. Elle est plutôt conservée dans l'espace *noshw* pour qu'elle puisse être utilisée par la suite comme un moyen d'analyse de résultats.

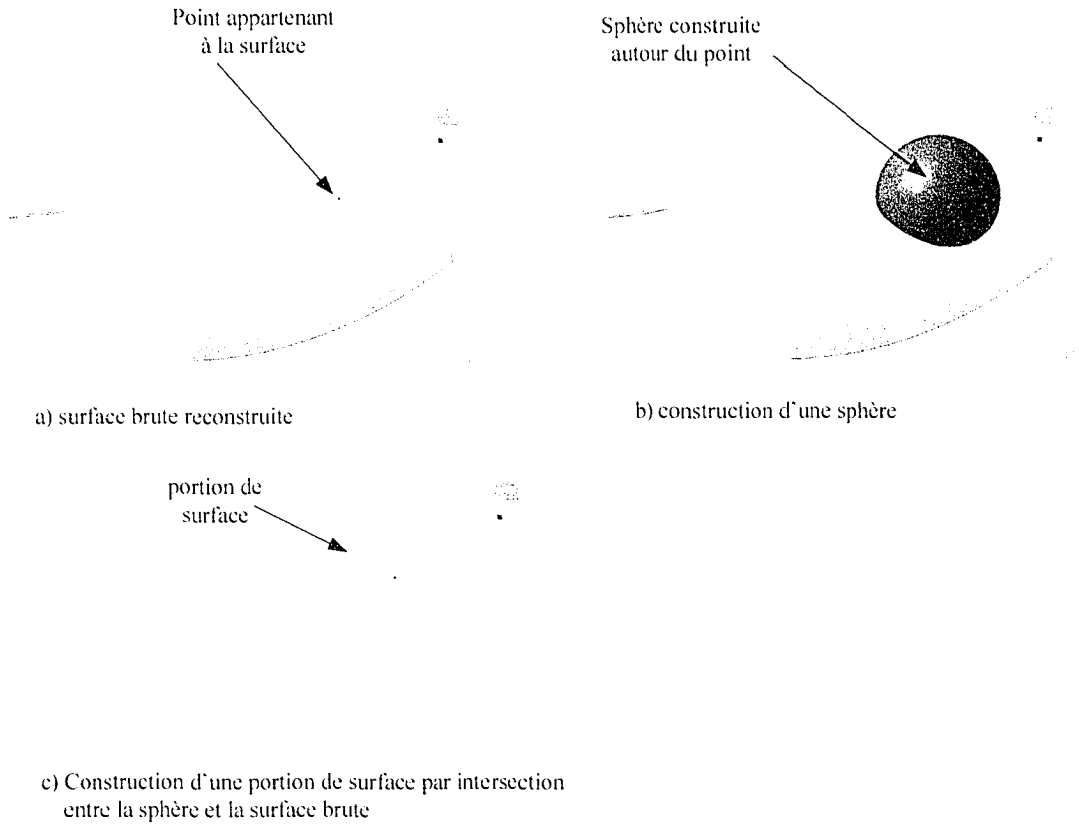


Figure 17 Technique de construction des portions surfaciques

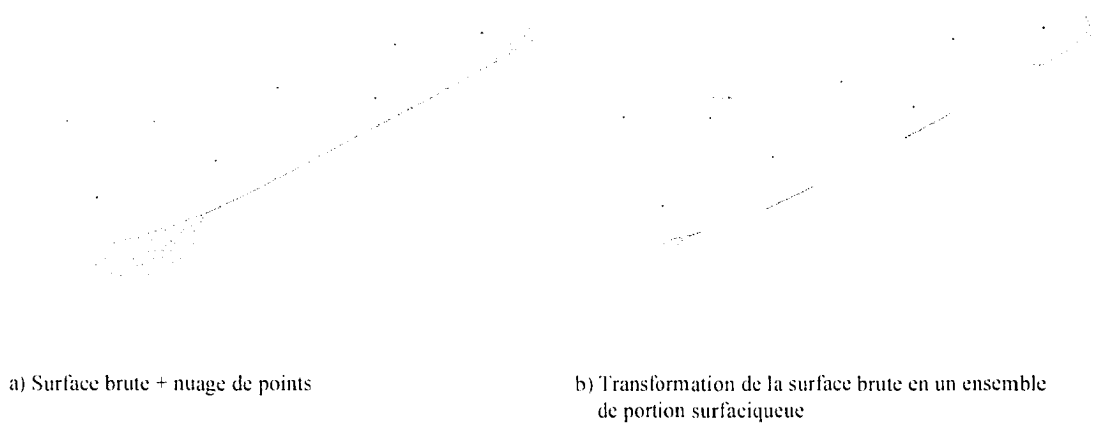


Figure 18 Exemple de transformation d'une surface brute en portions surfaciques

Pour que cette méthode soit efficace, on doit s'assurer que les portions surfaciques recouvrent le maximum possible de la surface brute, étant donné que celle-ci est désormais représentée par ces derniers. Cette condition dépend essentiellement de la répartition des points sur la surface brute, ainsi que du rayon des sphères servant à la construction des portions. Par exemple, pour une surface plane modélisée par un réseau de portions surfaciques de forme circulaire comme le montre la figure 19, nous avons obtenu les résultats suivants :

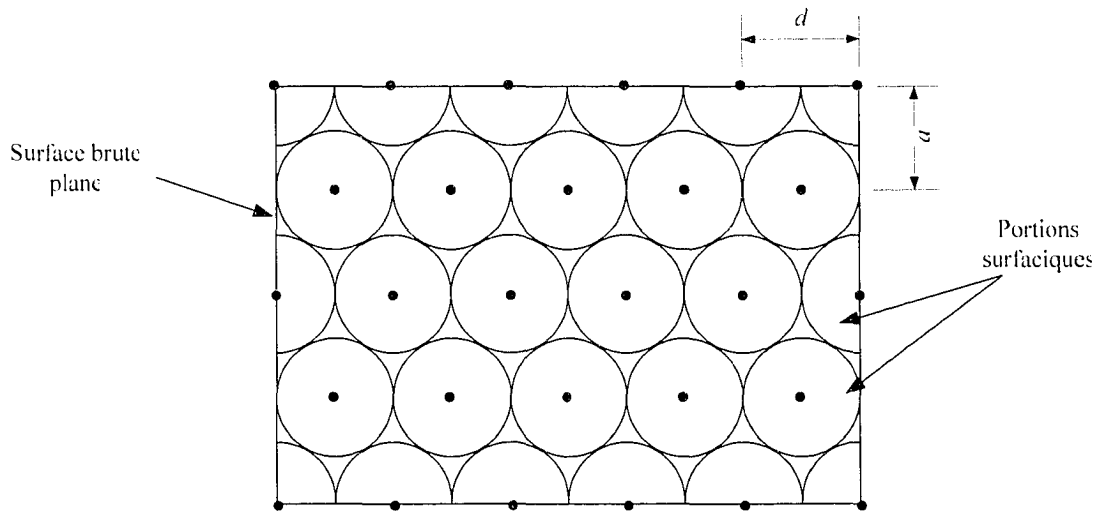


Figure 19 Exemple de surface plane transformée en portions circulaires

Soit "A" l'aire de la surface plane, "a" la distance entre deux rangées horizontales de points et "d" le diamètre d'une portion circulaire :

$$A = 5d \times 4a = 20ab = 20 \cdot \sqrt{\frac{3}{4}} \cdot d^2 \quad (3.4)$$

Soit "s" la surface d'une seule portion :

$$s = \pi \frac{d^2}{4} \quad (3.5)$$

$$\text{Le nombre total de portions surfaciques est : } n = 14 + 10 \frac{1}{2} + 4 \frac{1}{4} = 20 \quad (3.6)$$

$$\text{L'aire total des portions est : } n \cdot s = 5 \cdot \pi d^2 \quad (3.7)$$

$$\text{Le pourcentage de recouvrement des patches est : } \frac{n \cdot s}{A} = \frac{5 \cdot \pi d^2}{20 \cdot \sqrt{\frac{3}{4}} \cdot d^2} = 90\% \quad (3.8)$$

Ce pourcentage représente la proportion maximale de la surface qui peut être recouverte par des portions circulaires identiques, et avec des points uniformément répartis. Ceci est valable aussi pour une surface cylindrique. Néanmoins, un résultat optimal de ce genre est difficile à obtenir pour une surface complexe vu qu'il n'est pas évident de déterminer, dans ce cas, une répartition idéale des points. C'est pourquoi nous allons nous contenter de la répartition faite par la fonction de maillage de CATIA V5. Par contre, nous devons calculer les rayons des sphères utilisées pour construire les portions de surface.

3.2.2.2.3 Calcul des rayons des sphères

Le but de ce calcul est d'avoir des portions très proches l'une de l'autre, voire tangentes, quel que soit la répartition des points et la complexité de la surface.

La méthode proposée pour résoudre ce problème ne donnera pas, à priori, la solution optimale, mais elle constituera une approche fonctionnelle pour cette application. En effet, l'algorithme de calcul comporte deux phases, la première consiste à chercher pour chaque point M_{dj} , son point le plus proche M_{di} appartenant au même nuage, et mesurer la distance d_j qui les sépare ($d_j = M_{dj} - M_{di}$). Cette distance représente le diamètre de la sphère (de rayon r_j) qui serait construite au point M_{dj} . La seconde phase a la tâche d'agrandir chaque sphère jusqu'à ce qu'elle devienne tangente à l'une des autres.

La figure 20 schématise un exemple de construction de sphères pour un nuage de quatre points. En premier lieu, le calcul des rayons se fait en se basant sur la recherche du point le plus proche. Par la suite, ces rayons sont modifiés pour que chaque sphère devienne tangente à sa sphère voisine la plus proche (dans ce cas, la sphère C_3 est agrandie pour qu'elle devienne tangente à C_4).

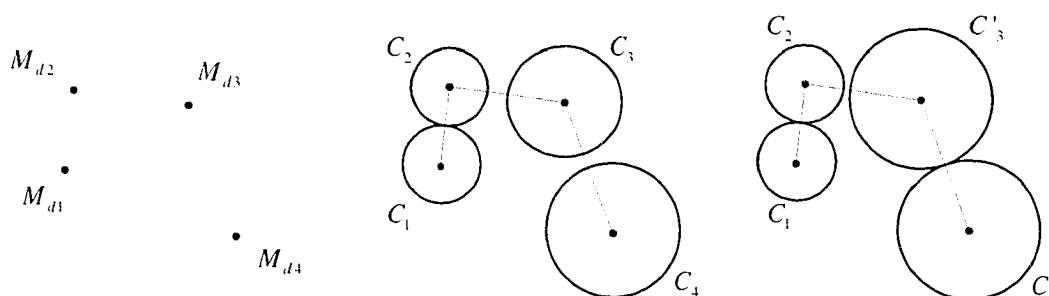


Figure 20 Étapes de calcul des rayons

Il faut noter que dans cet exemple il y avait deux possibilités, la première est d'agrandir la sphère C_3 et la deuxième est d'agrandir la sphère C_4 . Ce choix est pris d'une façon aléatoire selon la numérotation des points. Donc dans ce cas, le changement va être porté à la sphère C_3 . L'organigramme de la figure 21 décrit la procédure *raysphere* qui élabore ces calculs.

3.2.2.2.4 Formulation de la fonction artificielle

La transformation du problème d'alignement point/surface en un problème d'alignement portion surfacique/surface nous incite à changer la fonction artificielle proposée au chapitre 2, et d'en choisir une autre qui doit mettre en évidence deux types de violation de contraintes.

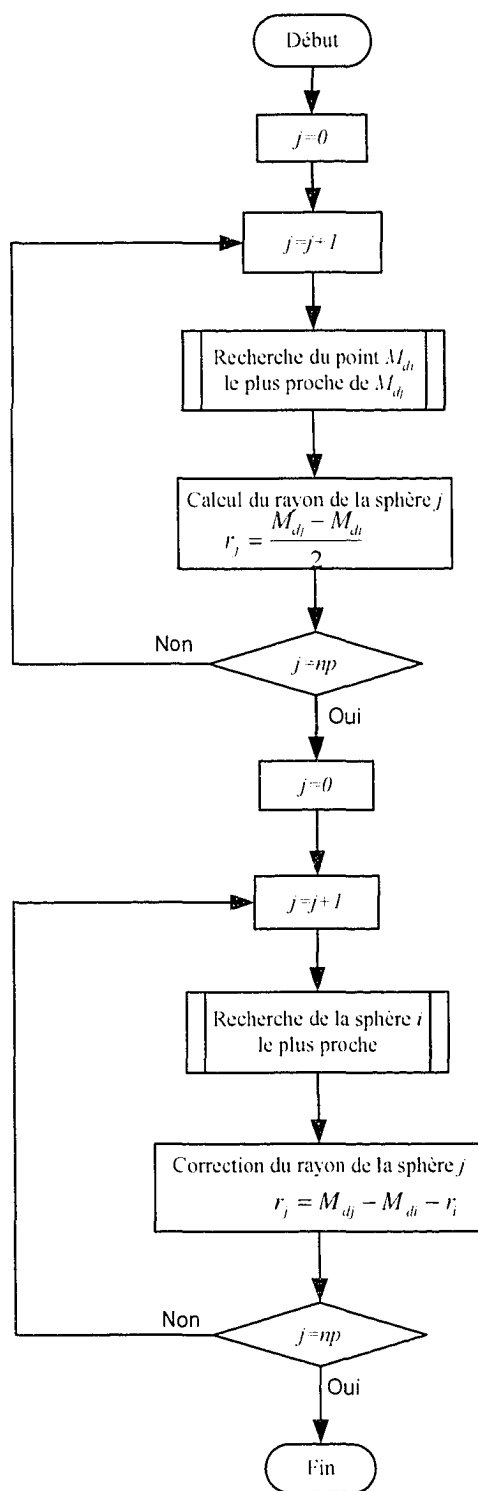


Figure 21 Algorithme de calcul des rayons des sphères

Soit P_j , la contrainte associée au point j , telle que définie à la section 2.4. Posons P'_j comme étant la contrainte également associée au point j , mais définie comme suit :

Soit d_{mj} : la distance minimale entre le point M_{dj} et la surface nominale. (figure 3.14)

$P'_j = d_{mj}$ si la portion de surface associée au point M_{dj} est complètement à l'extérieur de la pièce nominale

$P'_j = -d_{mj}$ si la portion de la surface associée au point M_{dj} interfère avec la pièce nominale

L'évaluation de la contrainte P'_j dépend donc de la distance minimale entre le point M_{dj} et la surface nominale, et non pas de la distance d_{eoj} , car celle-ci ne peut pas donner une estimation de la distance qui sépare la portion surfacique de la surface nominale. Donc en augmentant d_{eoj} , la portion de surface ne va pas nécessairement s'éloigner de la surface nominale.

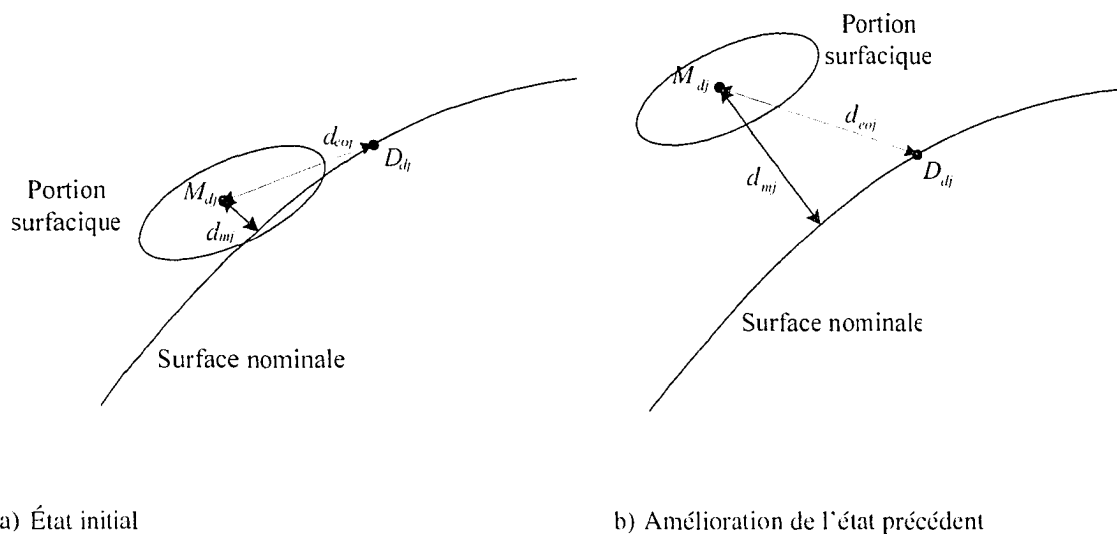


Figure 22 Utilisation de la distance d_{mj}

On définit la violation de la contrainte P_j par la constatation de l'état suivant : le point j ne doit pas être en état de violation de contrainte P_j , par contre, la portion de surface associée à ce point est en état d'interférence avec la pièce nominale. La figure 23 met en évidence la différence entre ces deux contraintes.

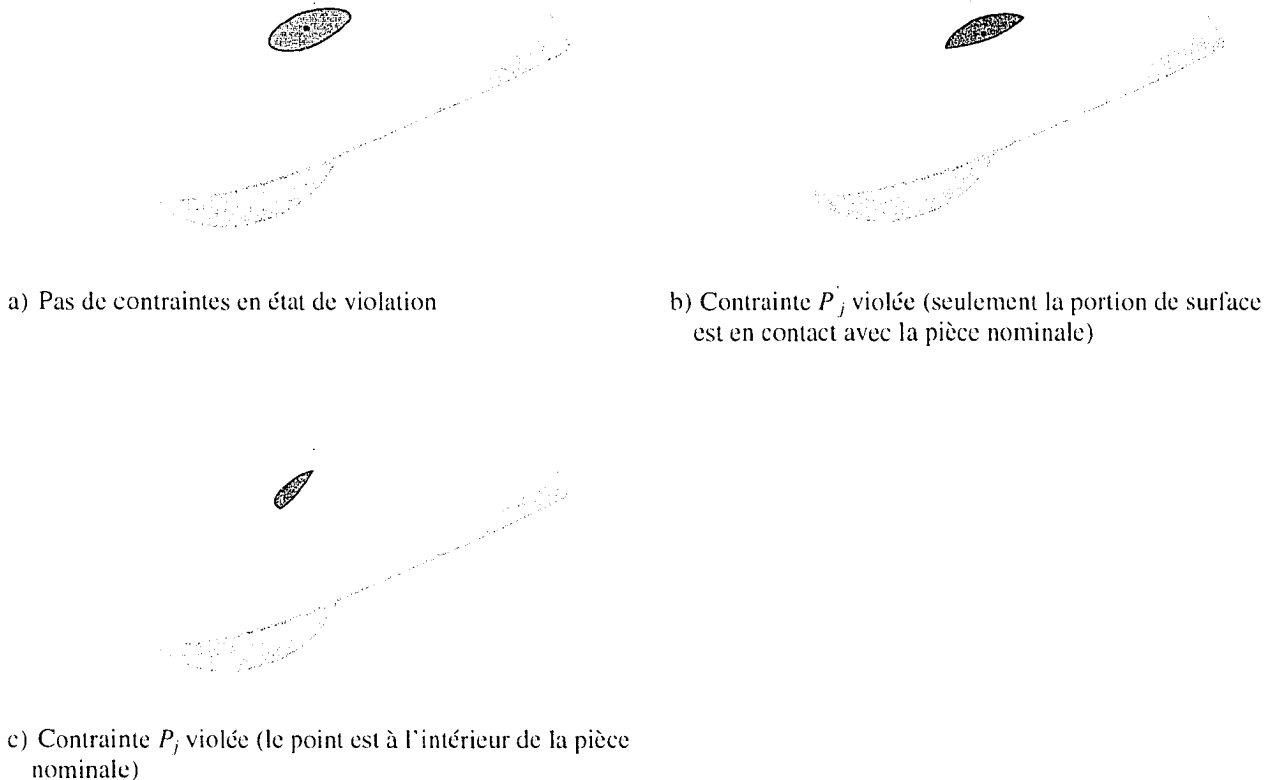


Figure 23 Les différents types de violation de contraintes

Pour résumer le rôle de la fonction artificielle, on pourra dire que si une contrainte P_j est violée, il faut alors essayer de déplacer le point j , en diminuant la distance qui le sépare de son point projeté D_{dj} , jusqu'à ce que cette contrainte soit en état de non violation. Par la suite, si la contrainte P_j se trouve en état de violation, on doit alors déplacer ce même point vers l'extérieur du modèle nominal, en augmentant la distance qui le sépare de la

surface nominale, jusqu'à l'état de non violation. Ce qui signifie que la valeur de la fonction artificielle doit augmenter si $(P_j)^2$ augmente, ou si $(P_j)^2$ diminue, et inversement.

Pour satisfaire les conditions mentionnées plus haut, on définit la fonction artificielle comme étant la somme de deux fonctions :

$$U_{art(glob)} = U_{art} + U'_{art} \quad (3.9)$$

avec :

$U_{art(glob)}$: Fonction artificielle globale

et

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si la contrainte } P_j \text{ est en état} \\ \text{de violation, alors :} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} U_{art} = \sum_{j=1}^{nviol} (1E(23 \cdot \omega_j + 3) \cdot (21 + \log_{10}(P_j^2))) \\ U'_{art} = 0 \end{array} \right. \quad (3.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si la contrainte } P'_j \text{ est en état} \\ \text{de violation, alors :} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} U_{art} = 0 \\ U'_{art} = f(P'_j, \omega_j) \end{array} \right.$$

avec :

$$-1 \leq P_j = d_{coj} \leq -ZERO = -1E(-10) \quad (3.11)$$

$nviol$: le nombre de contraintes P_j en état de violation.

En ce qui concerne le premier cas de violation de contraintes, nous avons gardé la même fonction artificielle proposée au chapitre 2, puisqu'elle remplit bien les conditions désirées. Par contre, pour le second cas, nous avons proposé une deuxième fonction en s'inspirant de la première et en faisant un changement de variable. Elle est basée sur le fait qu'elle doit être régressive en fonction de $(P'_j)^2$, d'où le choix suivant :

$$U_{art} = \sum_{j=1}^{nviol'} \left(1E(23 \cdot \omega_j + 3) \cdot (a \cdot \log_{10}(\frac{1}{P_j^2}) + b) \right) \quad (3.12)$$

où : $nviol'$ est le nombre de contraintes P_j' violées

et

a et b sont deux constantes

$$-1 \leq P_j' = d_{mj} \leq -ZERO = -1E(-10) \quad (3.13)$$

Similairement aux contraintes P_j , nous avons considéré qu'une contrainte P_j' est en état de violation que si elle est inférieure à une constante négative ZERO. Cela est pour éviter les problèmes de calcul numérique.

Pour déterminer les paramètres a et b , on doit remplir les exigences suivantes :

- A. Pour deux contraintes P_j et P_j' associées à deux points ayant le même facteur de pondération $\omega = k$, la violation de la première engendre une pénalisation plus importante que celle de la deuxième. Autrement dit, il vaut mieux avoir une portion surfacique interférant avec la pièce nominale que d'avoir un point à l'intérieur d'elle.
- B. Dans un niveau de priorité donné, la pénalisation d'une seule contrainte P_j violée, est plus importante que la pénalisation de toutes les contraintes P_j' violées appartenant à ce même niveau de priorité.
- C. La pénalisation d'une contrainte P_j ou P_j' violée, est plus importante que si toutes les contraintes sont violées dans toutes les zones de priorité inférieure.

D'autre part, les hypothèses prises au chapitre 2 resteront valables :

- Le nombre maximal de niveau de priorité est de 10. Le facteur de pondération peut prendre les valeurs suivantes : $\omega_j = 0, \dots, 9$ (3.14)

- Le nombre maximal de contrainte dans chaque niveau est 100

- Les contraintes P_j sont adimensionnelles : $-1 \leq P_j = d_{voj} \leq 1$ (3.15)

- Les contraintes P'_j sont adimensionnelles : $-1 \leq P'_j = d_{mj} \leq 1$ (3.16)

- Le nombre maximal de points de mesure est 10000 points

- La valeur maximale de la fonction objective ne doit pas dépasser 1^E (308)

Ainsi, on pourra déterminer les valeurs des constantes a et b en appliquant ces hypothèses de la manière suivante :

$$\text{Soit : } U'_{art} = \sum_{j=1}^{n_{viol}} \left(1E(23 \cdot \omega_j + 3) \cdot (a \cdot \log_{10}(\frac{1}{P_j^2}) + b) \right) \quad (3.17)$$

a) Détermination du signe de a et b

$$\text{On doit avoir } U'_{art} > 0 \text{ donc } (a \cdot \log_{10}(\frac{1}{P_j^2}) + b) > 0 \quad (3.18)$$

De plus, U'_{art} doit avoir une dérivée négative car elle est régressive en fonction

$$\text{de } (P'_j)^2, \Rightarrow -a \frac{2}{(P'_j)^2} < 0 \Rightarrow a > 0 \quad (3.19)$$

d'où $b > 0$ (en considérant le cas où $P'_j = 1$)

b) Application de la condition (B)

Pour un niveau de priorité ayant un facteur de pondération $\omega = k$, la valeur maximale que peut prendre U'_{art} quand un seul point se trouve en état de violation de contrainte P_j , c'est lorsque 99 points se trouvent en état de violation de contrainte P_j (puisque dans un niveau de priorité donné, le nombre maximal de contrainte est 100), et que $(P_j)^2 = ZERO$. Par contre, la valeur minimale que peut prendre U_{art} dans ce cas est lorsque $(P_j)^2 = ZERO$.

$$\Rightarrow \begin{cases} (U'_{art})_{\max} = 99 \cdot 1E(23 \cdot k + 3) \cdot (a \cdot \log_{10}(\frac{1}{ZERO^2}) + b) = 99 \cdot 1E(23 \cdot k + 3) \cdot (a \cdot 20 + b) \\ \text{et} \\ (U_{art})_{\min} = 1E(23 \cdot k + 3) \cdot (21 + \log_{10}(ZERO^2)) = 1E(23 \cdot k + 3) \end{cases} \quad (3.20)$$

$$\text{La condition (B) stipule que dans ce cas } (U'_{art})_{\max} < (U_{art})_{\min} \quad (3.21)$$

$$\Rightarrow 99 \cdot 1E(23 \cdot k + 3) \cdot (a \cdot 20 + b) < 1E(23 \cdot k + 3) \quad (3.22)$$

$$\Rightarrow 0 < a < \frac{1}{20} \left(\frac{1}{99} - b \right) \quad (3.23)$$

Ce qui signifie aussi que :

$$\Rightarrow \frac{1}{99} - b > 0 \Rightarrow b < \frac{1}{99} \quad (3.24)$$

c) Application de la condition (C)

La valeur minimale que peut prendre U'_{art} quand un seul point est en état de violation de contrainte P'_j est lorsque $(P'_j)^2 = 1$,

$$\Rightarrow (U'_{art})_{\min} = 1E(23k + 3) \cdot b \quad (3.25)$$

k étant le facteur de pondération associé à ce point.

Si toutes les contraintes P_j associées aux points appartenant aux zones de priorité inférieure à $\omega = k$ ($\omega = 0, 1, \dots, k-1$), la valeur maximale que peut prendre U_{art} , est lorsque $(P_j)^2 = 1$

$$\begin{aligned} \Rightarrow (U_{art})_{\max} &= \sum_{\omega=0}^{k-1} 100 \cdot 1E(23\omega + 3) \cdot 21 = 21 \cdot 1E(5) \sum_{\omega=0}^{k-1} 1E(23\omega) \\ &= 21 \cdot 1E(5) \cdot \frac{1E(23k) - 1}{1E(23) - 1} \approx 21 \cdot 1E(23 \cdot (k-1) + 5) \end{aligned} \quad (3.26)$$

La condition (C) stipule que dans ce cas $(U_{art})_{\max} < (U'_{art})_{\min}$ (3.27)

$$\Leftrightarrow 21 \cdot 1E(23 \cdot (k-1) + 5) < 1E(23 \cdot k + 3) \cdot b \quad (3.28)$$

$$\Rightarrow b > 21 \cdot 1E(-21)$$

Donc, pour récapituler, on doit résoudre le système d'inéquations suivant :

$$\begin{cases} 0 < a < \frac{1}{20} \left(\frac{1}{99} - b \right) \\ 21 \cdot 1E(-21) < b < \frac{1}{99} \end{cases} \quad (3.29)$$

$$(3.30)$$

La solution dans ce cas n'est pas unique, on pourra alors faire le choix suivant :

Pour $b=0.01$

$$\Rightarrow 0 < a < \frac{1}{20} \left(\frac{1}{99} - 0.01 \right) \cdot 5.05 \cdot 1E(-6) \quad (3.31)$$

Choisissons $a=1.E(-6)$

On peut alors définir l'équation artificielle comme suit :

$$U_{art(glob)} = U_{art} + U'_{art} \text{ avec}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si la contrainte } P_j \text{ est en état de violation,} \\ \text{alors } \begin{cases} U_{art} = \sum_{j=1}^{nviol} \left(1E(23 \cdot \omega_j + 3) \cdot (21 + \log_{10}(P_j^2)) \right) \\ U'_{art} = 0 \end{cases} \\ \text{Si la contrainte } P'_j \text{ est en état de violation,} \\ \text{alors } \begin{cases} U_{art} = 0 \\ U'_{art} = \sum_{j=1}^{nviol'} \left(1E(23 \cdot \omega_j + 3) \cdot (1E(-6) \cdot \log_{10}(\frac{1}{P_j^2}) + 0.01) \right) \end{cases} \end{array} \right. \quad (3.32)$$

et

$$-1 \leq P_j = d_{voj} \leq -ZERO = -1E(-10) \quad (3.33)$$

$$-1 \leq P_j' = d_{mj} \leq -\text{ZERO} = -1E(-10) \quad (3.34)$$

3.2.2.2.5 Modification des tests de collision

L'introduction d'une deuxième contrainte nécessite l'élaboration d'un deuxième test d'interférence qui va être fait cette fois entre chaque portion de surface et le modèle nominal. La méthode *clash* introduite dans le paragraphe (3.2.2.2.1) pourra bien être employée dans ce cas, mais une autre fonction se porte candidate pour l'accomplissement de ce travail. Cette fonction utilise la méthode *distance* pour calculer la distance minimale entre deux pièces visibles dans l'environnement CATIA. La valeur de cette distance est nulle si les deux pièces s'interfèrent entre elles. Par contre, si une pièce se trouve complètement à l'intérieur de la deuxième, la distance calculée sera la valeur de la distance minimale entre la pièce enveloppée et les surfaces de la pièce enveloppante. Ce qui veut dire que cette fonction ne pourra pas être utilisée pour détecter toutes les collisions. La figure 24 résume les propriétés de la méthode *distance*.

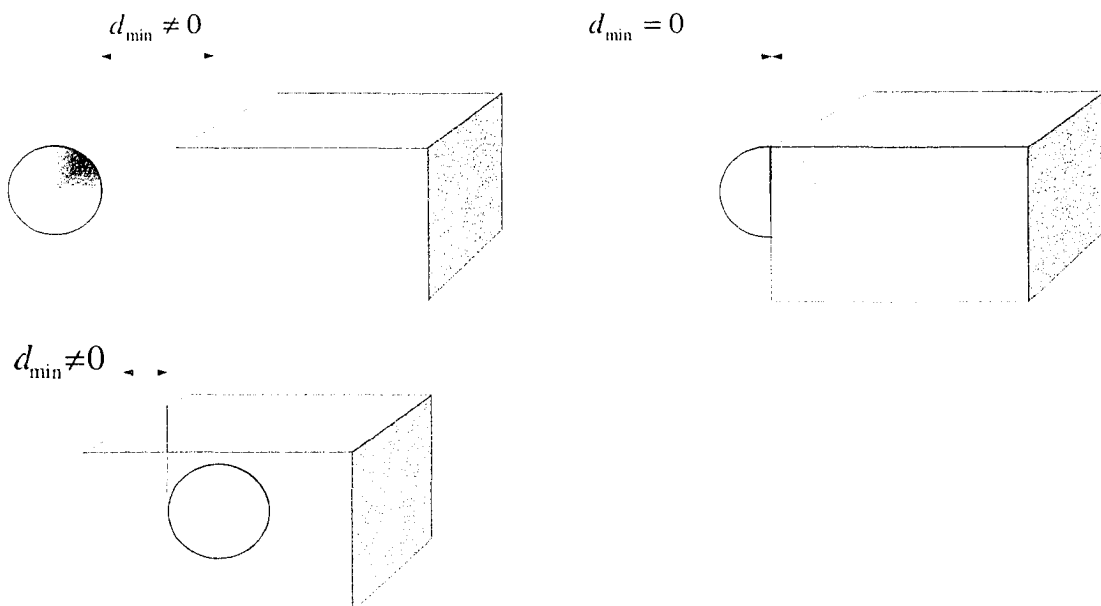


Figure 24 Propriétés de la méthode *distance*

La raison principale pour laquelle la méthode *distance* est utilisée pour faire ce deuxième test, est que cette fonction nécessite beaucoup moins de temps d'exécution que celui de la méthode *clash*. De plus, elle peut détecter toutes les interférences entre portions surfaciques et pièce nominale, étant donné que ce test se fait seulement lorsque le point associé à une portion donnée se trouve à l'extérieur du modèle nominal.

La méthode *distance* admet le même inconvénient que celui de la méthode *clash*, à savoir : on ne peut pas calculer la distance minimale entre un seul élément d'une pièce et une autre pièce. C'est pour cette raison qu'on adopte la même technique employée pour détecter les collisions entre les nuages de sphères et la pièce nominale. On doit donc mettre toutes les portions dans l'espace *noshow*, et ensuite remettre dans l'espace *show*, seulement la portion de surface pour laquelle on désire tester son interférence.

La réalisation d'un deuxième test de collision pour les portions surfaciques fait en sorte que la procédure *testclash*, introduite au paragraphe 2.2.2.1, doit tenir compte de ce test. L'organigramme de la figure 25 explique la démarche à suivre pour effectuer les tests de collision nécessaires pour l'évaluation de la fonction artificielle.

Pour un nuage constitué de np sphères, l'opération de test consiste à mettre la sphère j dans l'espace *show* et faire un test de collision. Si le résultat de ce test montre que cette sphère est à l'intérieur du modèle nominal, la contrainte P_j est alors considérée en état de violation. Par la suite, la sphère j est remise dans l'espace *noshow*, et l'algorithme passe au test de la sphère suivante. Cependant, si le test montre que cette sphère est à l'extérieur du modèle, la portion de surface j est renvoyée vers l'espace *show*, afin de mesurer la distance minimale qui le sépare de la pièce nominale (d_{\min}). Si la valeur de cette distance est nulle, la contrainte P_j est considérée comme étant violée, sinon on conclura que cette portion se trouve complètement à l'extérieur du modèle nominal et qu'aucune contrainte n'est violée.

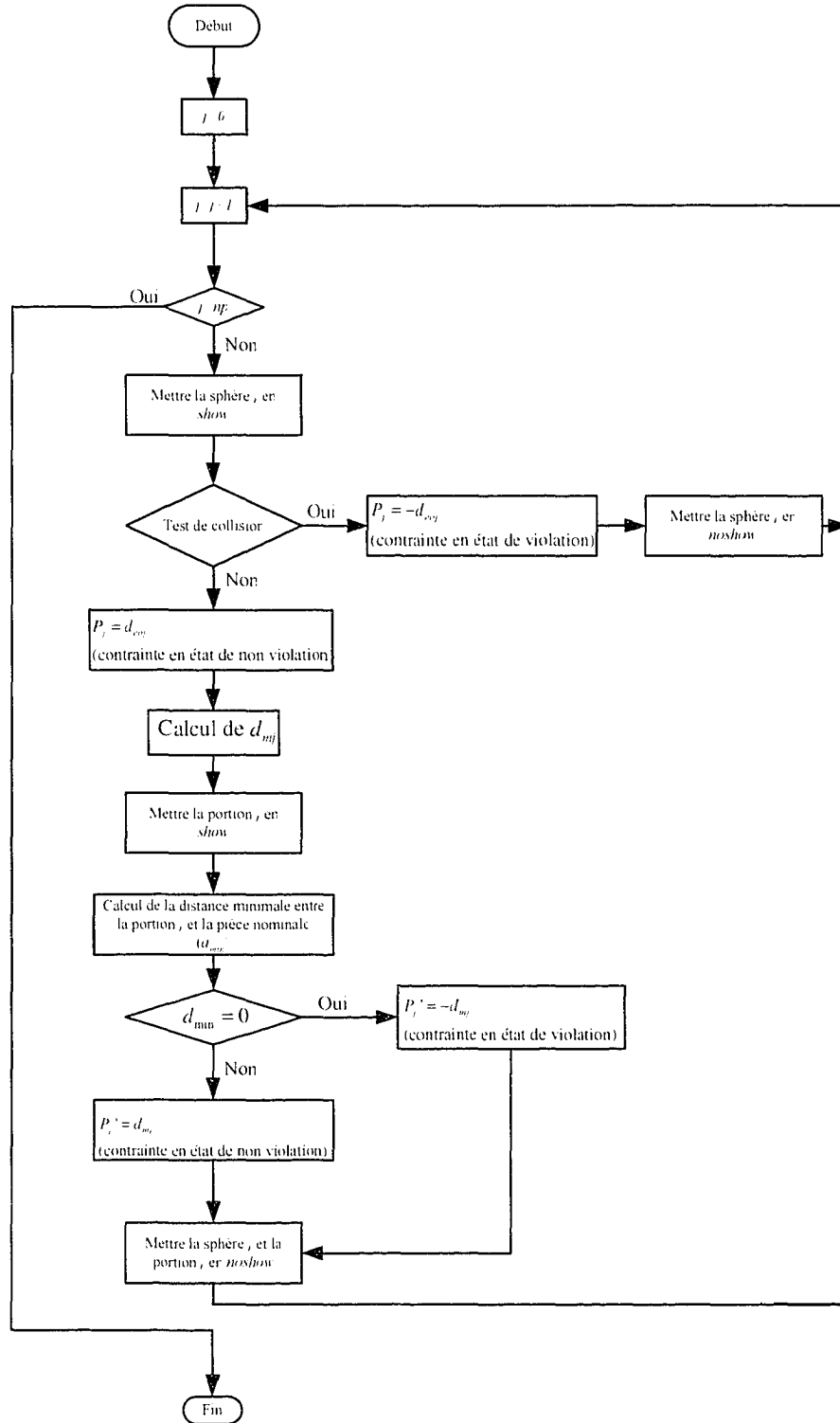


Figure 25 Correction de l'algorithme des tests d'appartenance

3.2.2.2.6 Compensation de la surépaisseur minimale d'usinage

Dans la cas où on est dans l'obligation d'enlever la croûte superficielle de la pièce brute, l'opération du balancement des pièces brutes doit tenir compte de cette éventualité, et doit donc garantir une surépaisseur δ minimale pour qu'elle puisse être usinée. En effet, deux méthodes sont susceptibles d'accomplir cette opération d'une façon exacte :

a. Méthode manuelle

La première est une méthode manuelle qui s'effectue avant d'exécuter le programme de balancement. Elle consiste à ajouter la surépaisseur minimale au modèle nominal par le biais de la fonction interactive de CATIA V5 : *surépaisseur*. De cette façon, le balancement va se faire avec une pièce surdimensionnée pour garantir l'enlèvement de matière lors de l'usinage.

b. Méthode programmable

La deuxième méthode est intégrée dans le programme informatique, et se fait donc d'une façon automatique. Pour cela, la valeur de la surépaisseur est entrée comme étant un paramètre du programme.

Ce paramètre est pris en compte lors des tests de collision des patchs, étant donné que ces tests se basent sur le calcul de la distance minimale entre chaque patch et le modèle nominal. On peut donc considérer que si cette distance est inférieure à la valeur de la surépaisseur désirée, alors il y a interférence entre l'élément testé et la pièce. La figure 26 illustre ce cas.

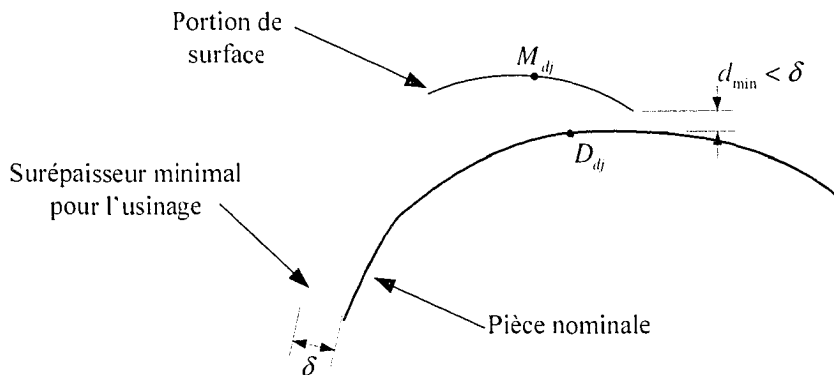


Figure 26 Relation entre la surépaisseur minimale et d_{\min}

Si $d_{\min} - \delta \leq 0 \Rightarrow$ la portion est considérée en interférence avec la pièce, donc P_j est en état de violation.

Si $d_{\min} - \delta > 0 \Rightarrow$ la portion est considérée à l'extérieur de la pièce, donc aucune contrainte n'est violée.

Étant donné que le modèle nominal représente les dimensions nominales de la pièce, la valeur de la surépaisseur δ peut également être corrigée pour tenir compte des tolérances permises. Ce qui nous pousse à définir pour chaque point de mesure M_{dj} , une valeur de surépaisseur δ_j propre à celui-ci.

3.2.2.3 Génération des résultats

Les résultats sont générés sous deux formes : la première est un fichier de type *CATProduct* qui représente graphiquement la position de la pièce brute par rapport au modèle nominal. Ce fichier permet aussi de visualiser les régions où il y a des déficits en matériel par le biais de la fonction interactive *collision*. Cette fonction est disponible dans l'atelier *SPAnalysis*, et peut représenter les régions d'interférence par la

visualisation de leurs contours. La deuxième forme de résultats est un fichier texte qui donne les informations les plus pertinentes de l'aboutissement du programme, comme le vecteur paramètre (matrice de transformation rigide globale), le nombre et le type de contraintes en état de violation, etc. L'annexe 3 explique en détail ces résultats.

CHAPITRE 4

VALIDATION DE LA NOUVELLE MÉTHODE D'ALIGNEMENT

Pour mettre en évidence les changements apportés dans l'algorithme du balancement des pièces brutes, nous l'avons testé sur deux pièces ayant des surfaces de formes complexes. Les pièces brutes sont obtenues artificiellement en introduisant des modifications sur les pièces nominales, en y ajoutant ou en y retranchant de la matière. De cette façon, on a pu générer par la suite des nuages de points pour les utiliser dans les opérations d'alignement et de balancement.

4.1 Méthode adoptée pour l'analyse des résultats

Une fois terminée, l'opération de balancement donne lieu à une position optimale de la pièce brute par rapport au modèle nominal. Cela se traduit par un vecteur paramètre qui englobe toutes les transformations rigides appliquées à la pièce brute. D'autre part, on obtient une représentation graphique dans l'environnement CATIA, de la position relative des deux pièces. À partir de celle-ci, il est possible d'analyser le résultat avec les fonctions déjà disponibles dans le logiciel.

En fait, les informations les plus pertinentes qu'on peut tirer du modèle CATIA V5 contenant les deux pièces alignées sont les suivantes :

- L'état de violation de chaque contrainte (P_j et P'_j).
- Les distances minimales séparant les points de leur surface nominale (d_{mj}), ce qui permet de connaître la distance de pénétration de chaque point dans la pièce nominale, ou dans le cas contraire, d'évaluer la surépaisseur de matière à enlever en ce même point.

- Les distances minimales entre les portions de surface et la pièce (d_{min}). Cela est valide pour les portions de surface se trouvant complètement à l'extérieur du modèle nominal. Cette information nous aide à avoir une idée sur la répartition de la matière à enlever de la pièce brute lors de l'usinage.
- Les coordonnées des points se trouvant en état de violation de contraintes.
- La distance minimale qui sépare chaque surface brute de la pièce nominale (d_{si}). Ceci permet de s'assurer que la surface brute n'entre pas en collision avec la pièce nominale quand toutes les portions ne le sont pas.

Ces informations sont collectées une première fois à la fin de l'étape d'alignement sans contraintes, et une deuxième fois à la fin du programme global. Cela permet de souligner le rôle de l'alignement préférentiel avec contraintes, ainsi que les avantages de l'utilisation des portions surfaciques. L'annexe 2 donne un exemple de fichiers de données et de résultats.

Il faut noter que pour mieux analyser les résultats obtenus, il est préférable d'utiliser un nuage de points plus dense que celui utilisé durant les opérations d'alignement et de balancement. De cette manière, on peut avoir une idée plus précise de la répartition de la matière à enlever, et dans le cas échéant, de la localisation avec précision des zones de sous épaisseurs.

4.2 Essais de balancement des pièces

4.2.1 Première pièce

La première pièce utilisée pour valider le programme de balancement est une pièce ayant la forme d'une aube de turbine, et qui a comme grande dimension 1 m (figure 27). Les surfaces choisies pour l'alignement sont représentées à la figure 28. Elles sont constituées d'une seule surface plane et de quatre surfaces de forme complexe.



Figure 27 Première pièce : aube de turbine

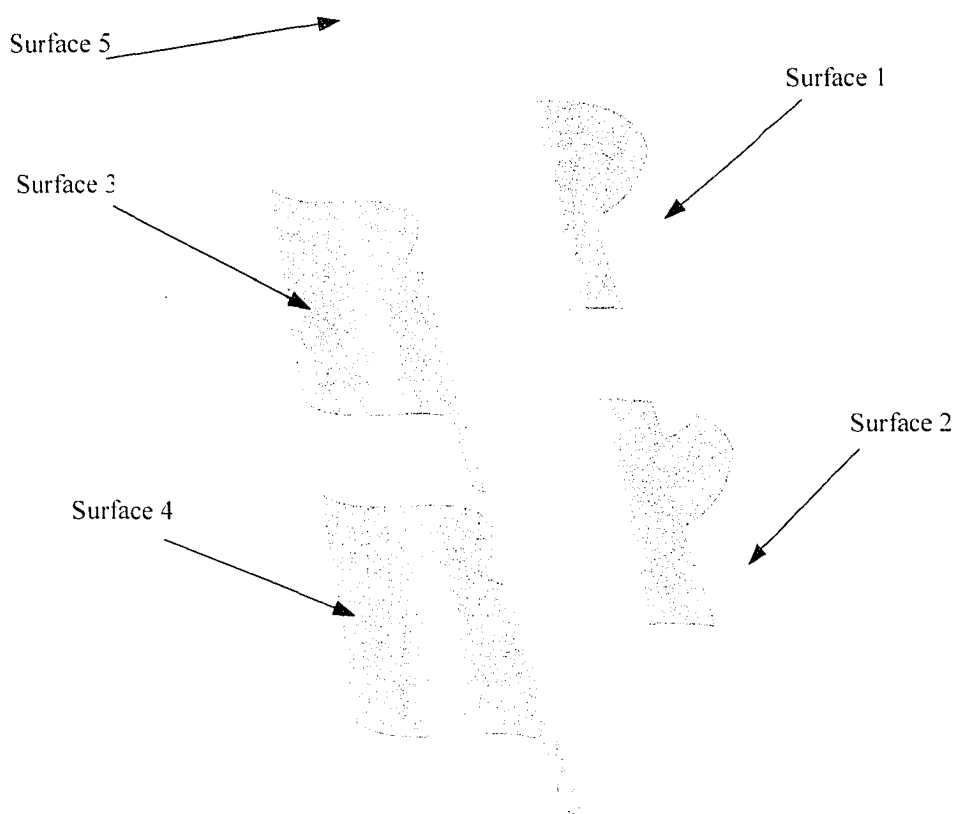


Figure 28 Vue éclatée des surfaces utilisées pour l'alignement

La pièce brute tirée du modèle nominal est choisie de telle façon à ne pas avoir une solution réalisable, et plus précisément en faisant de sorte que la surface 1 et 3 ne peuvent pas être toutes les deux à l'extérieur du modèle nominal. Ainsi, on va tester la capacité du programme à satisfaire les préférences demandées en changeant pour chaque essai les pondérations des différentes surfaces ainsi que le nombre de points utilisés.

1^{er} cas : la surface N° 3 est prioritaire

a) Le nombre total de points est 80

Tableau I

Répartition des points sur les surfaces

	Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Facteur de pondération ω_j	1	0	3	0	2
Nombre de points	20	19	19	19	3

Tableau II

Résultats d'alignement non préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		5	0	17	0	3
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		4	1	1	1	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	0,01	-	0,012	-	4,479
	$(d_{mj})_{\max}$	0,29	-	0,746	-	5,47
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	0,5	1,41	0,4	1,427	-
	$(d_{mj})_{\max}$	1,4	4,156	0,709	3,523	-
$(d_{\min})_{\min}$		0	0	0	0	-
$(d_{\min})_{\max}$		1,129	3,628	0,294	3,23	-
d_s		0	0	0	0	0

Tableau III

Résultats d'alignement préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		10	15	0	0	0
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		4	1	0	0	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	16,551	1,151	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	57,787	36,127	-	-	-
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	0,443	3,906	14,921	7,848	7,226
	$(d_{mj})_{\max}$	47,121	32,164	71,956	46,234	32,681
$(d_{\min})_{\min}$		0	0	5,445	5,915	0,639
$(d_{\min})_{\max}$		29,437	14,877	68,183	44,749	26,531
d_s		0	0	4,675	5,627	0,639

b) Le nombre total de points est 63

Tableau IV

Répartition des points sur les surfaces

	Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Facteur de pondération ω_j	1	0	3	0	2
Nombre de points	15	15	15	15	3

Tableau V

Résultats d'alignement non préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		5	0	10	0	3
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		3	1	1	1	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	0,03	-	0,074	-	5,368
	$(d_{mj})_{\max}$	0,165	-	1,075	-	6,313
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	0,473	1,652	0,294	1,08	-
	$(d_{mj})_{\max}$	1,086	4,134	0,812	3,478	-
$(d_{mn})_{\min}$		0	0	0	0	-
$(d_{mn})_{\max}$		0,651	3,6	0,188	3,22	-
d_s		0	0	0	0	0

Tableau VI

Résultats d'alignement préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		7	10	0	0	0
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		3	2	0	0	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	8,725	0,293	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	51,175	33,629	-	-	-
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	0,5	5,105	0,947	4,831	7,166
	$(d_{mj})_{\max}$	51,017	30,843	64,754	41,014	30,323
$(d_{mn})_{\min}$		0	0	0,589	2,594	0,448
$(d_{mn})_{\max}$		33,866	17,351	61,127	39,025	26,223
d_s		0	0	0,589	2,579	0,448

c) Le nombre total de points est 54

Tableau VII

Répartition des points sur les surfaces

	Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Facteur de pondération ω_j	1	0	3	0	2
Nombre de points	13	13	12	13	3

Tableau VIII

Résultats d'alignement non préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		5	0	7	0	3
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		2	0	2	0	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	0,2	-	3,15	-	3,407
	$(d_{mj})_{\max}$	0,48	-	0,6	-	3,833
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	0,547	2,531	1,2	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	1,232	4,052	0,795	3,228	-
$(d_{\min})_{\min}$		0	1,775	0	1,269	0
$(d_{\min})_{\max}$		0,781	3,31	0,5	2,448	-
d_s		0	1,16	0	0,065	0

Tableau IX

Résultats d'alignement préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		5	8	0	0	0
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		4	1	0	1	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	11,594	0,8	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	58,427	55,492	-	-	-
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	0,849	11,73	31,7	2,833	14,875
	$(d_{mj})_{\max}$	81,825	41,133	91,7	58,663	66,964
$(d_{\min})_{\min}$		0	0	2,712	0	7,384
$(d_{\min})_{\max}$		42,53	28,754	86,8	43,944	47,05
d_s		0	0	0	0	7,38

d) Le nombre total de points est 47

Tableau X

Répartition de points sur les surfaces

	Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Facteur de pondération α_j	1	0	3	0	2
Nombre de points	11	11	11	11	3

Tableau XI

Résultats d'alignement non préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		2	0	8	0	3
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		4	0	1	1	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	0,192	-	0,118	-	2,822
	$(d_{mj})_{\max}$	0,416	-	0,7	-	3,471
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	0,4	2,436	0,7	1,23	-
	$(d_{mj})_{\max}$	1,224	4,45	1	3,02	-
$(d_{\min})_{\min}$		0	0,7	0	0	-
$(d_{\min})_{\max}$		1	3,721	0,32	2,118	-
d_s		0	0,7	0	0	0

Tableau XII

Résultats d'alignement préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		5	8	0	0	0
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		3	0	0	0	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	24,72	0,784	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	40,87	26,284	-	-	-
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	0,66	6,07	6,5	6,063	6,063
	$(d_{mj})_{\max}$	37,6	16,54	48,123	31,836	20,35
$(d_{\min})_{\min}$		0	0	5,726	4,868	0,318
$(d_{\min})_{\max}$		15,27	7,6	39,05	20,77	19,209
d_s		0	0	5,726	4,868	0,318

d) Le nombre total de points est 37

Tableau XIII

Répartition des points sur les surfaces

	Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Facteur de pondération ω_j	1	0	3	0	2
Nombre de points	9	8	9	8	3

Tableau XIV

Résultats d'alignement non préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		5	0	7	0	3
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		0	0	1	0	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	0	-	0,06	-	0,147
	$(d_{mj})_{\max}$	0,048	-	0,9	-	1,39
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	0,412	2,558	0,463	2,5	-
	$(d_{mj})_{\max}$	1,691	3,517	0,56	3,847	-
$(d_{\min})_{\min}$		0	1,686	0	1,218	-
$(d_{\min})_{\max}$		1,039	3,26	0,014	3,5	-
d_s		0	0,445	0	0,473	0

Tableau XV

Résultats d'alignement préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_i en état de violation		8	4	0	0	0
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		1	3	0	0	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	7,152	3,618	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	26,132	9,477	-	-	-
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	7,737	0,5	3,212	5,031	6,34
	$(d_{mj})_{\max}$	7,737	7,6	25,88	16,54	18,5
$(d_{\min})_{\min}$		0	0	0,295	1,455	1,42
$(d_{\min})_{\max}$		0	0,352	18,9	12,043	16,326
d_s		0	0	0,3	1,04	1,4

2^{ème} cas : La surface N° 1 est prioritaire (essai avec 63 points)

Tableau XVI

Répartition des points sur les surfaces

	Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Facteur de pondération ω_j	3	2	1	0	2
Nombre de points	15	15	15	15	3

Tableau XVII

Résultats d'alignement non préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		5	0	10	0	3
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		3	1	1	1	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	0,037	-	0,074	-	5,37
	$(d_{mj})_{\max}$	0,165	-	1,075	-	6,313
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	0,473	1,652	0,294	1,08	-
	$(d_{mj})_{\max}$	1,086	4,134	0,812	3,48	-
$(d_{\min})_{\min}$		0	0	0	0	-
$(d_{\min})_{\max}$		0,65	3,6	0,188	3,228	-
d_s		0	0	0	0	0

Tableau XVIII

Résultats d'alignement préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		0	0	2	7	0
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		0	1	2	2	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	46,725	1,68	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	69,055	114,245	-
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	88,62	35	1,467	6,1	137,83
	$(d_{mj})_{\max}$	250	182,54	164,482	114,6	165,4
$(d_{\min})_{\min}$		68,07	0	0	0	67
$(d_{\min})_{\max}$		231	168,7	90	78	126,7
d_s		68,07	0	0	0	67

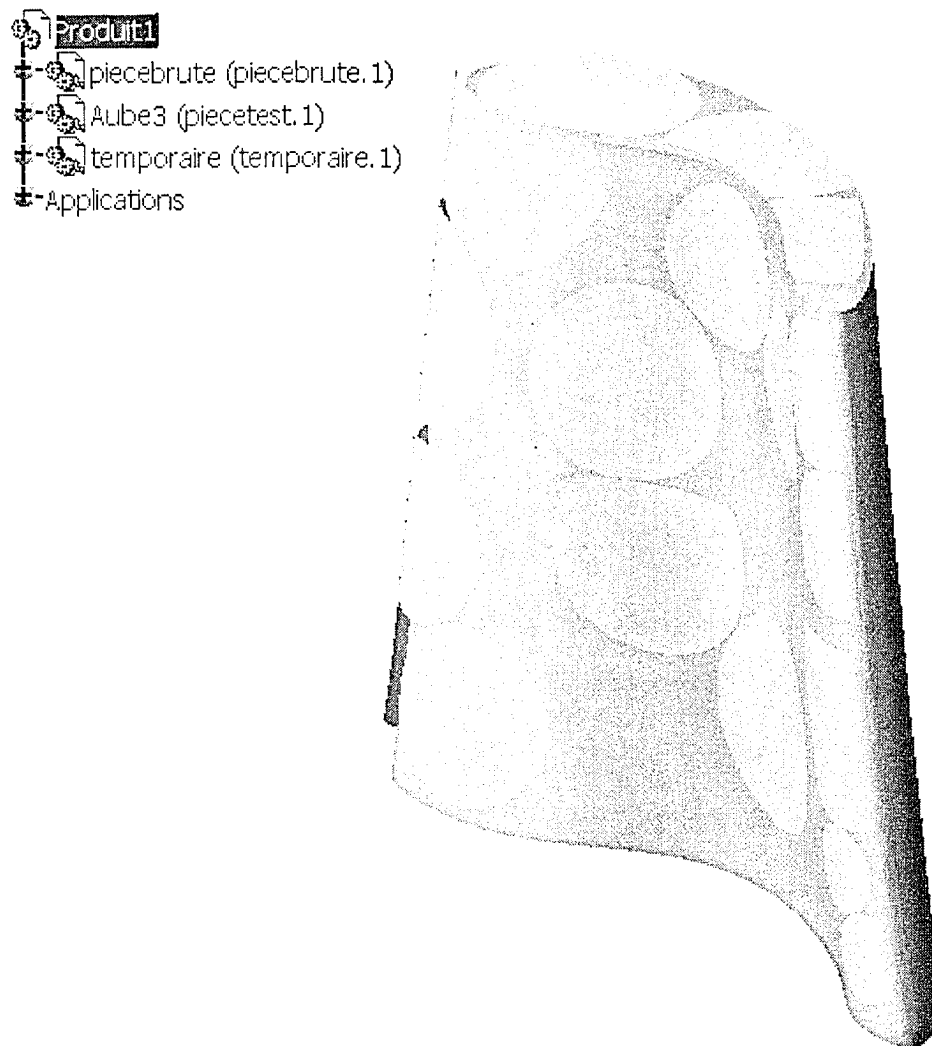


Figure 29 Exemple d'un résultat de balancement

4.2.2 Deuxième pièce

La deuxième pièce qui a permis de tester l'algorithme est représentée à la figure 30. Elle est composée de trois surfaces planes et de deux surfaces complexes. Sa plus grande dimension est de 240mm. La pièce brute est obtenue en ajoutant des surépaisseurs de 1 à 3 mm sur chaque surface nominale pour s'assurer d'obtenir une solution réalisable.

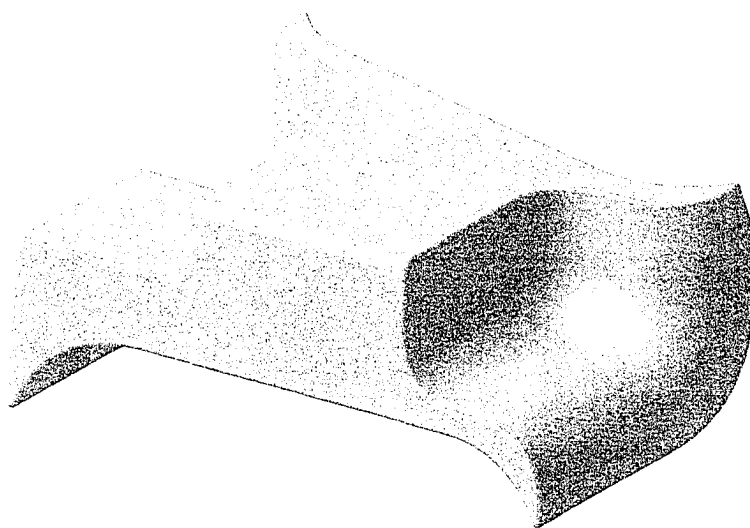


Figure 30 Deuxième pièce

Les essais effectués avec cette pièce ont pour but de prouver l'utilité des portions de surface quand à la minimisation du nombre de points utiles pour le balancement. De ce fait, on a élaboré plusieurs essais, en modifiant à chaque fois le nombre de points constituant les nuages, tout en veillant à ce qu'ils aient une répartition uniforme. D'autre part, étant donné que dans ce cas la solution réalisable existe toujours, nous n'avons pas modifié les facteurs de pondération. La figure 31 montre les surfaces utilisées pour l'alignement.

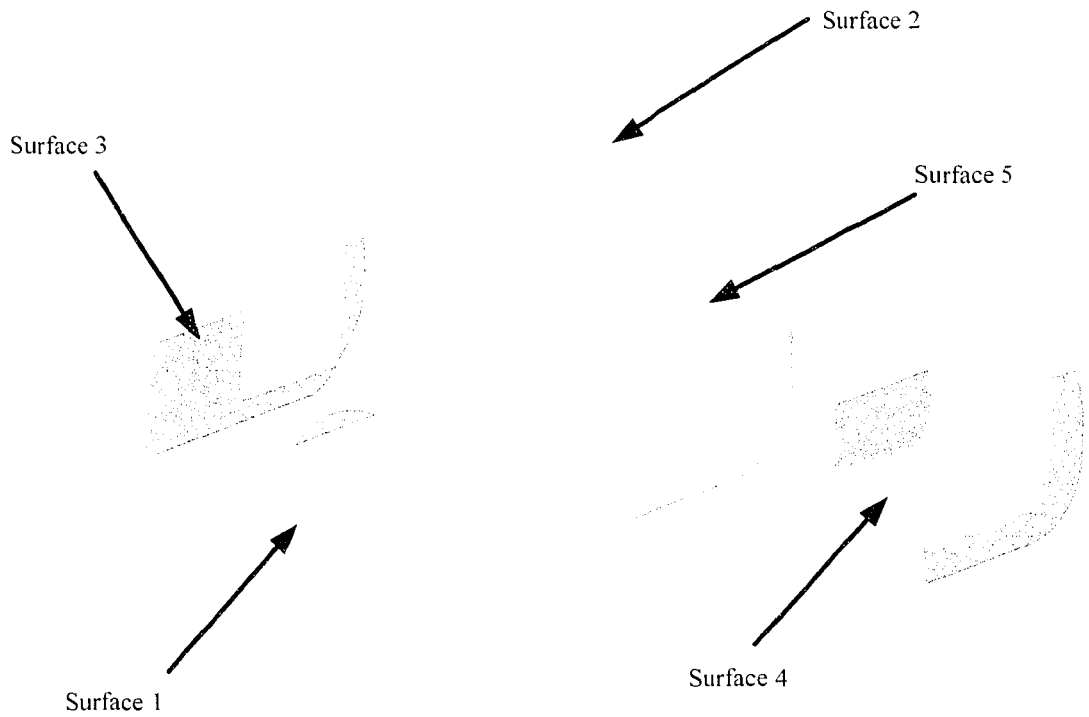


Figure 31 Vue éclatée des surfaces utilisées pour l'alignement

a) Le nombre total de points est 44

Tableau XIX

Répartition de points sur les surfaces

	Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Facteur de pondération ω_j	1	0	0	3	2
Nombre de points	5	5	5	14	15

Tableau XX

Résultats d'alignement non préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_i en état de violation		0	0	0	0	0
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		0	0	0	3	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	-	-	-
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	-	-	-
$(d_{\min})_{\min}$		3,068	1,2	0,68	0	1,54
$(d_{\min})_{\max}$		3,654	2,113	1,437	0,834	3
d_s		3	1,122	0,486	0	1,576

Tableau XXI

Résultats d'alignement préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_i en état de violation		0	0	0	0	0
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		0	0	0	0	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	-	-	-
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	-	-	-
$(d_{\min})_{\min}$		2,542	1,424	0,241	0,292	2
$(d_{\min})_{\max}$		3,03	2,33	0,766	0,85	3,24
d_s		2,542	1,38	0,1	0,277	1,92

b) Le nombre total de points est 40

Tableau XXII

Répartition de points sur les surfaces

	Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Facteur de pondération a_j	1	0	0	3	2
Nombre de points	4	4	4	17	11

Tableau XXIII

Résultats d'alignement non préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		0	0	0	0	0
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		0	0	0	5	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	-	-	-
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	-	-	-
$(d_{\min})_{\min}$		3,28	0,868	0,756	0	1,79
$(d_{\min})_{\max}$		3,48	1,71	1,28	0,78	3,408
d_s		3,278	0,764	0,626	0	1,74

Tableau XXIV

Résultats d'alignement préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		0	0	0	0	0
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		0	0	0	0	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	-	-	-
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	-	-	-
$(d_{\min})_{\min}$		2,574	1,368	0,169	0,312	2,015
$(d_{\min})_{\max}$		2,947	2,204	0,737	0,887	3,228
d_s		2,574	1,282	0	0,28	1,954

c) Le nombre total de points est 35

Tableau XXV

Répartition des points sur les surfaces

	Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Facteur de pondération ω_j	1	0	0	3	2
Nombre de points	4	4	4	14	9

Tableau XXVI

Résultats d'alignement non préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		0	0	0	0	0
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		0	0	0	4	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	-	-	-
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	-	-	-
$(d_{\min})_{\min}$		1,952	1,572	0,733	0	2,373
$(d_{\min})_{\max}$		2,716	2,124	1,352	0,562	3,232
d_s		1,952	1,45	0,733	0	2,292

Tableau XXVII

Résultats d'alignement préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		0	0	0	0	0
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		0	0	0	0	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	-	-	-
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	-	-	-
$(d_{\min})_{\min}$		2,497	2,039	0,687	0,026	2,114
$(d_{\min})_{\max}$		3	2,436	1,04	1,073	2,946
d_s		2,497	1,94	0,688	0,03	2,031

d) Le nombre total de points est 28

Tableau XXVIII

Répartition des points sur les surfaces

	Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Facteur de pondération ω_j	1	0	0	3	2
Nombre de points	4	4	4	9	7

Tableau XXIX

Résultats d'alignement non préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		0	0	0	0	0
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		0	0	0	6	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	-	-	-
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	-	-	-
$(d_{\min})_{\min}$		2,154	0,487	0,422	0	1,533
$(d_{\min})_{\max}$		2,774	2,587	1,364	0,725	3,510
d_s		2,154	0,487	0,202	0	1,446

Tableau XXX

Résultats d'alignement préférentiel

		Surface 1	Surface 2	Surface 3	Surface 4	Surface 5
Nombre de contraintes P_j en état de violation		0	0	0	0	0
Nombre de contraintes P'_j en état de violation		0	0	0	0	0
Points en violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	-	-	-
Points en non violation	$(d_{mj})_{\min}$	-	-	-	-	-
	$(d_{mj})_{\max}$	-	-	-	-	-
$(d_{\min})_{\min}$		2,578	1,115	2,246	0,767	0,864
$(d_{\min})_{\max}$		2,932	2,72	0,734	2,68	2,95
d_s		2,578	1,115	0	0,767	0,304

4.3 Analyse des résultats

4.3.1 Résumé des résultats

Pour récapituler ce qui a été donné par les tableaux précédents, nous avons relevé les constatations suivantes :

a) Première pièce

- Quel que soit le nombre de points utilisé pour l'alignement, le programme de balancement a réussi la mise de tous les points et les portions de surface appartenant à la surface prioritaire, en dehors de la pièce nominale.

- La surface brute prioritaire est mise à l'extérieur de la pièce dans la majorité des essais (sauf pour le cas où le nombre total des points est 54).
- Dans la majorité des cas, les surfaces 3, 4 et 5 n'interfèrent pas avec la pièce nominale.
- À l'exception du cas où le nombre total des points est 54, tous les points et les portions, appartenant aux deux ou aux trois surfaces prioritaires, sont à l'extérieur de la pièce nominale.
- Les distances séparant les points de la surface nominale sont très grandes par rapport aux surépaisseurs de la matière ajoutées à la pièce brute. De plus, les surépaisseurs obtenues sont loin d'être uniformes pour chaque surface. Par exemple, le cas où le nombre de point est 80, la surface 3 a une surépaisseur minimale de 4,6mm et une surépaisseur maximale supérieure à 68mm.
- Les résultats des essais de cette pièce sont obtenus après 3 ou 4 itérations globales de l'étape de rapprochement avec contraintes, mais non après convergence du programme. Par contre, et durant les itérations, la fonction objective présente une tendance de baisse.
- La durée de l'exécution du programme est de plusieurs heures.

b) Deuxième pièce

- Tous les points sont en état de non violation de contrainte même seulement après l'étape d'alignement non contraint, alors que les portions de surface ne le sont pas.
- Après l'alignement contraint et préférentiel, tous les patches sont en état de non violation de contrainte.
- Les surfaces brutes sont totalement à l'extérieur de la pièce nominale, après l'exécution du programme, dans le cas où le nombre de point est 44 et 35.
- Les surépaisseurs de matière obtenues pour chaque surface sont très raisonnables. Elles se situent entre 0,03mm et 3,24mm.

- Dans le cas où on se trouve avec des lacunes de matériel, les sous épaisseurs sont aussi de même grandeur que les surépaisseurs trouvées ailleurs.
- Pour tous les essais, la convergence du programme est atteinte après 3 ou 4 itérations globales de l'étape de rapprochement avec contraintes.
- La durée de l'exécution est entre 2 et 3 heures.

4.3.2 Discussion

Une lecture globale des résultats montre que le programme de balancement est parvenu à orienter les régions déficitaires vers les surfaces les moins prioritaires. De plus, on remarque que l'utilisation des portions de surface dans cette technique a montré son efficacité : d'une part en garantissant l'absence totale de zones de sous-épaisseur dans les régions prioritaires; d'autre part, en assurant l'obtention de ces résultats avec un nombre très faible de points, et cela avec seulement quelques itérations. D'ailleurs on remarque que dans la majorité des cas, quand toutes les portions de surfaces sont à l'extérieur du modèle nominal, toute la surface brute l'est aussi. Cela est plus perceptible pour le cas de la deuxième pièce. Par contre, il faut veiller à ce que la répartition des points soit faite d'une façon étudiée pour minimiser le nombre de points nécessaire à l'obtention d'un résultat satisfaisant.

Toutefois, ces résultats restent incomplets dans le cas où la solution réalisable est impossible à obtenir, étant donnée que la condition d'arrêt du programme n'est pas la convergence, mais plutôt le dépassement d'un nombre maximal d'itérations. Ce qui explique les grandes surépaisseurs et sous-épaisseurs obtenues avec les essais de la première pièce. D'autre part, si on analyse le comportement de la fonction objective, on conclut qu'elle va continuer de baisser durant les prochaines itérations. Par contre, on ne peut pas prévoir son état à la convergence.

Le fait de fixer un nombre d'itérations maximal comme condition d'arrêt du programme, est dû à une limitation du logiciel CATIA V5 qui ne parvient pas à continuer le calcul

jusqu'à la convergence faute de mémoire virtuelle. D'ailleurs nous remarquons que la vitesse de calcul diminue d'une façon exponentielle au fur et à mesure que l'exécution progresse. À titre d'exemple, le temps mis pour calculer la distance minimale entre deux objets est à peu près de 0,1s au début de l'exécution, alors que cette même opération devient d'une durée de plusieurs secondes après une heure de calcul. Cet inconvénient n'a pas de rapport avec les performances de l'ordinateur utilisé, étant donnée qu'avec un ordinateur ayant une vitesse de 2,8 GHz et une mémoire vive de 2 GB, le processeur n'était pas exploité à 100% de sa capacité (uniquement 60%) et à l'arrêt du programme la mémoire vive de l'ordinateur n'était pas utilisée en totalité. Cela nous conduit à la conclusion que le logiciel CATIA V5 R13 présente des limites au niveau de sa vitesse de calcul ainsi qu'à sa mémoire virtuelle.

CONCLUSION

Il sera sans doute pertinent de rappeler ici les principales étapes de notre démarche qui avait pour objectif premier le développement d'une nouvelle méthode d'alignement se basant sur les surfaces au lieu des points.

En premier lieu, nous avons étudié en détail une méthode d'alignement utilisée pour le balancement des pièces brutes qui a pour principe l'utilisation des contraintes pour rapprocher un ensemble de points à une pièce nominale modélisée par la CAO. Cette étude nous a permis d'extrapoler cette technique pour créer la nouvelle méthode d'alignement. Le principe de cette méthode se base sur le remplacement des points qui servent pour le balancement, par des entités surfaciques obtenues à partir d'une représentation de la surface brute avec la CAO. Par la suite, un processus de rapprochement itératif aligne ces entités avec la pièce de référence. Cela est rendu possible par le biais de la méthode d'optimisation Simplex qui minimise une fonction qui reflète la position globale de la surface brute par rapport à la pièce nominale. La formulation de cette fonction constitue la contribution majeure de ce travail, étant donnée qu'elle est le moyen de traduire fidèlement et d'une façon mathématique l'état de rapprochement de chaque morceau de surface.

Pour concrétiser cette méthode, nous l'avons intégré dans le logiciel de CAO CATIA V5 qui nous a aidé à réduire considérablement la taille du programme en offrant des fonctions prédéfinies. D'autre part, ce logiciel nous a permis de vérifier facilement l'efficacité du nouveau programme au moyen de ses multiples fonctions d'analyse dimensionnelles.

Les résultats obtenus à la suite de plusieurs essais ont révélé l'efficacité de la méthode d'alignement quand à la réduction du nombre de points utilisés par l'algorithme, ainsi qu'à la précision de l'alignement. Nous avons donc pu constater que pour des pièces de géométrie assez complexe, l'utilisation d'une trentaine ou une quarantaine de points et

de morceaux de surface peut suffire pour garantir l'enveloppement de toute la pièce nominale par la pièce réelle. D'autre part, on a remarqué que la convergence de l'algorithme est obtenue après un nombre d'itérations globales très réduit, ce qui signifie que l'utilisation de morceaux de surface lors de l'alignement ne provoque pas la divergence du processus même avec un nombre de point très petit.

Par contre, nous nous sommes rendu compte que le temps d'exécution du programme est énorme malgré le faible nombre d'itérations globales. Cela constitue donc une grande limitation pour l'adoption de cette technique pour traiter des cas réels.

RECOMMANDATIONS

Les résultats obtenus par ce travail ont permis de démontrer l'efficacité de la nouvelle méthode d'alignement du point de vue convergence du processus, et cela malgré le faible nombre de points et de morceaux de surface utilisés. Néanmoins, le temps de calcul représente un paramètre sur lequel doit se pencher les travaux futurs.

Il faut se rappeler que les fonctions prédéfinies utilisées pour l'élaboration de l'algorithme, nous ont permis de calculer avec une grande précision les grandeurs nécessaires pour les calculs. Par contre, elles ne constituent pas l'outil optimal pour notre application. À titre d'exemple, la fonction *clash* permettant de tester l'interférence entre deux pièces, calcule aussi et en même temps le nombre de ces interférences, la distance de pénétration de chaque pièce dans l'autre, ainsi que d'autres grandeurs non utiles pour notre programme. Tout cela constitue un coût très élevé de temps de calcul et de mémoire virtuelle. Donc l'élaboration de fonctions personnalisées et optimisées sera de grande utilité, et permettra sans doute une réduction considérable du temps de calcul.

D'autre part, une connaissance plus approfondis du module CAAV5 de CATIA V5 peut aider à améliorer la précision et la rapidité du programme en exploitant d'autre fonctions prédéfinies, et surtout en cherchant à mieux gérer la mémoire virtuelle du logiciel.

Une autre amélioration qui peut être faite au programme est l'automatisation de tout le processus d'alignement et de balancement. En effet, nous avons mentionné au chapitre 3 (figure 9) qu'il y a une phase manuelle qui doit être élaborée pour traiter les données, les rendre compatibles avec le programme et le logiciel CATIA V5. Ces opérations sont facilement automatisables à l'exception de la fonction *Powerfit* permettant la reconstruction des surfaces à partir de nuages de points. Cette restriction est dûe au fait que la version CATIA V5 R13 limite l'utilisation de cette fonction au mode interactif à cause de sa complexité.

L'une des faiblesses que présente la nouvelle méthode d'alignement est l'absence d'optimisation au niveau de l'étape de découpage de la surface brute en morceaux. En effet, la méthode proposée dans ce travail transforme la majorité de la surface brute en morceaux de surface, mais pas la totalité. Donc, une meilleure méthode de découpage pourra augmenter la précision de l'alignement.

Mentionnons finalement que notre nouvelle technique d'alignement n'a été appliquée qu'à un cas très particulier qui est le balancement des pièces brutes, alors qu'elle peut être utilisée dans de nombreux domaines comme la robotique et l'inspection automatisée.

ANNEXE 1

Les propriétés de la fonction *Powerfit*

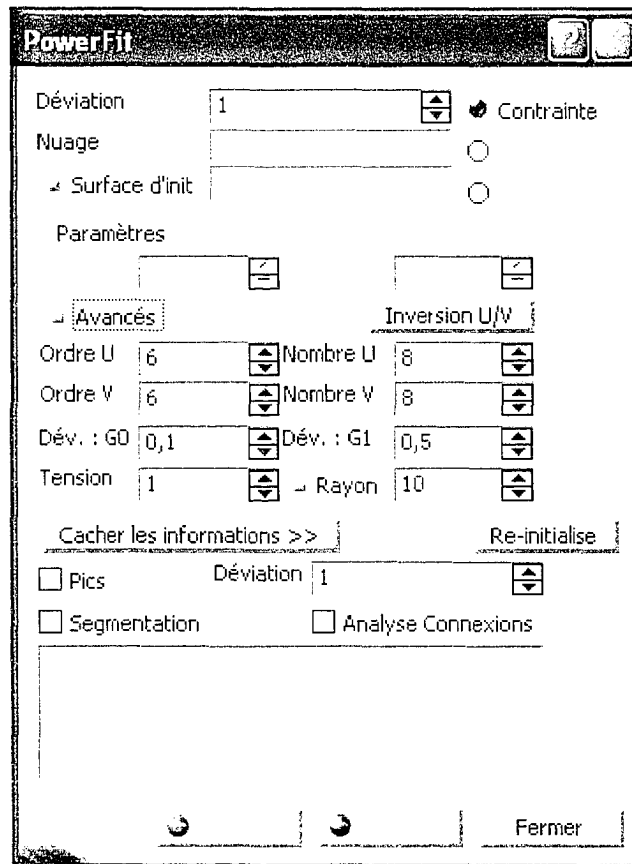


Figure 32 Menu général de la fonction *powerfit*

La fonction *powerfit* permet la construction d'une surface à partir d'un polygone ou d'un nuage de points. Cependant, et pour certaines surfaces de forme trop complexe, l'entrée unique d'un nuage de points ne suffit pas pour obtenir un résultat satisfaisant. Pour cela, il est aussi permis d'entrer les données supplémentaires suivantes :

- Des contraintes : ce sont des points ou des courbes que la surface doit passer par eux.
- Des limites : ce sont des courbes qui définissent les limites de la surface. Elles sont projetés sur la surface reconstruite, et servent à la couper.

- Des limites de sélection : définir des limites à l'intérieur des quelles se trouve uniquement les points qui vont servir à la construction de la surface. Le reste du nuage de points ne sera pas pris en compte lors du calcul.

Figure 33 Limitation des points servant à la construction d'une surface

- Surface d'initialisation : dans le cas où il existe une surface qui a une forme très proche de la surface à reconstruire, elle pourra servir comme un point initial pour le calcul.

D'autre part, le menu de la fonction *powerfit* offre la possibilité de modifier certains paramètres de reconstruction afin de compenser les bruits de mesure des points et d'obtenir une surface non ondulée. De ces paramètres, on distingue :

- Déviation maximale permise entre les points et la surface reconstruite.
- Déviation de type G0, elle définit la déviation entre la surface et les courbes de limitation de la surface.

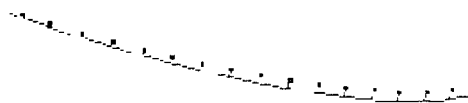


Figure 34 Déviation entre la surface reconstruite et la courbe de limitation

- Déviation de type G1, définie la tolérance de tangence entre deux surfaces contiguës.



Figure 35 Tolérance de tangence entre deux surfaces contiguës

- Tension de valeur entre 0 et 4, permet d'obtenir une surface plus lisse.

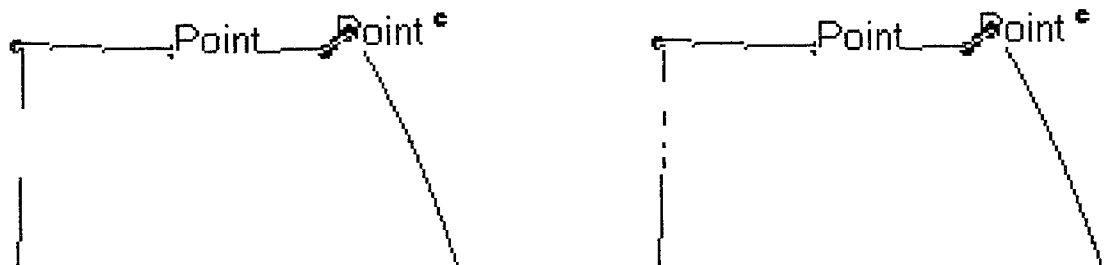


Figure 36 Effet de la modification de la tension dans une surface reconstruite

- Rayon : dans le cas où les bruits dans les points de mesure sont trop intenses, ce paramètre définit le rayon d'un tube ayant comme axe une courbe de limitation ou une courbe utilisée comme contrainte; tous les points qui sont à l'intérieur de ce tube sont éliminés et ne sont pas pris en compte lors du calcul.

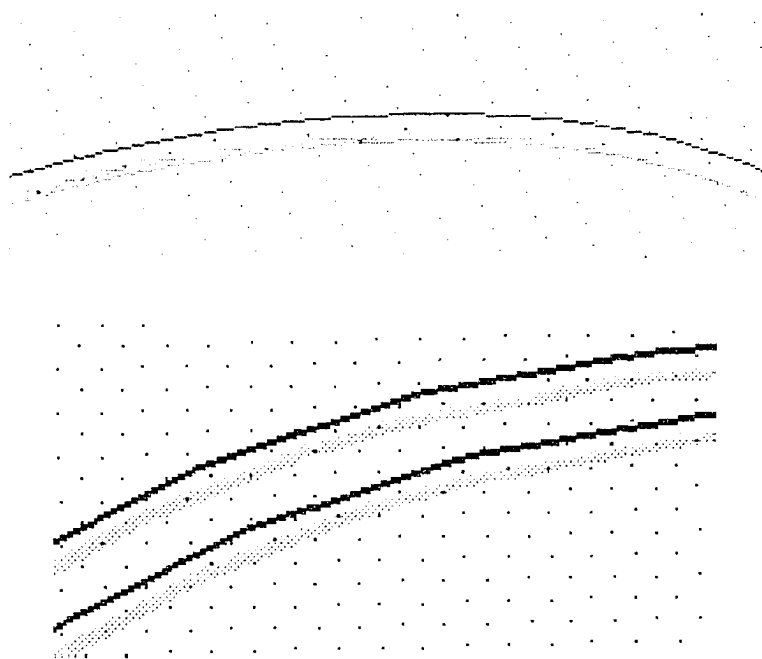


Figure 37 Élimination des points entourant les courbes

En agissant sur tous ces paramètres, on pourrait obtenir une surface très proche de la réalité. Toutefois, il faut être vigilant quand la surface à reconstruire est trop complexe car ça pourrait causer des confusions pour le logiciel. Dans ce cas, la solution est de diviser le nuage de point en deux parties ou plus.

ANNEXE 2

Les fichiers de données de la pièce aube de turbine

Nuage de points pour la surface 1

```
!  
! ASCII generated by Digitized Shape Editor/CATIA  
!  
!   Without Scans  
!   Point Format           ='X %f Y %f Z %f'  
!  
!   Total number of points = 20  
!  
X 481.770203 Y -51.752110 Z 622.311829  
X 456.212280 Y -67.773880 Z 859.807129  
X 855.945923 Y -280.554230 Z 556.722412  
X 833.718079 Y -317.890106 Z 818.711975  
X 688.379822 Y -192.477432 Z 861.854126  
X 682.022705 Y -158.823837 Z 659.220032  
X 839.269836 Y -301.609711 Z 735.571594  
X 857.668762 Y -308.227509 Z 655.210083  
X 793.914917 Y -230.367493 Z 608.539429  
X -117.705528 Y -282.468872 Z 561.559570  
X -95.217430 Y -182.303696 Z 561.559570  
X 811.520081 Y -317.724060 Z 927.337646  
X 178.391830 Y -30.726982 Z 757.705444  
X 78.512306 Y -46.141663 Z 659.183105  
X -80.450157 Y -182.006119 Z 759.495483  
X -111.781807 Y -280.450500 Z 656.512451  
X -97.520409 Y -279.806427 Z 855.972961  
X -63.905079 Y -184.768539 Z 960.156555  
X 31.424488 Y -82.022461 Z 859.805725  
X 292.505341 Y -45.662979 Z 946.470886
```

Nuage de points pour la surface 2

```
!  
! ASCII generated by Digitized Shape Editor/CATIA  
!  
! Without Scans  
! Point Format = 'X %f Y %f Z %f'  
!  
! Total number of points = 19  
!  
X -141.482925 Y -245.032181 Z 49.787464  
X 956.588623 Y -261.031219 Z 20.948282  
X 594.007507 Y -78.059265 Z 445.243408  
X 75.517685 Y -14.086984 Z 147.975998  
X 344.077148 Y 24.957094 Z 29.420134  
X -6.897827 Y -66.745102 Z 372.249786  
X -123.388321 Y -287.378326 Z 476.707397  
X -133.919067 Y -289.249542 Z 258.332642  
X 298.964355 Y 1.083897 Z 372.693115  
X 516.793701 Y -12.042636 Z 147.709198  
X 911.123474 Y -258.729340 Z 205.179459  
X 893.480530 Y -284.621307 Z 371.060547  
X 876.840149 Y -289.418823 Z 481.894714  
X 787.494507 Y -180.509888 Z 365.836487  
X 748.370178 Y -119.022408 Z 144.423920  
X 840.611511 Y -167.357574 Z 87.905739  
X 909.393188 Y -223.518707 Z 87.616745  
X 860.592834 Y -205.210175 Z 199.147125  
X -83.894348 Y -121.241592 Z 145.918045
```

Nuage de points pour la surface 3

```
!  
! ASCII generated by Digitized Shape Editor/CATIA  
!  
! Without Scans  
! Point Format          ='X %f Y %f Z %f'  
!  
! Total number of points = 19  
!  
X 1.760638 Y -370.141479 Z 912.968445  
X 435.293121 Y -189.547287 Z 535.139832  
X 293.359589 Y -218.210052 Z 657.700134  
X 299.522736 Y -220.104767 Z 859.303650  
X 179.705536 Y -316.789886 Z 955.749939  
X 180.782242 Y -314.856628 Z 758.473816  
X 80.518929 Y -367.895752 Z 657.721436  
X 682.509888 Y -331.832855 Z 958.391663  
X 688.186768 Y -299.112305 Z 659.532288  
X 483.750397 Y -225.957932 Z 956.419189  
X 484.332886 Y -211.901108 Z 758.800354  
X 785.883362 Y -338.255585 Z 555.839111  
X 833.941223 Y -346.549835 Z 633.312988  
X 834.650818 Y -344.396149 Z 582.080139  
X 833.243042 Y -348.343109 Z 708.656189  
X 782.905579 Y -354.782684 Z 810.271912  
X 782.246521 Y -357.991089 Z 911.278625  
X -66.205727 Y -367.157928 Z 560.725220  
X -61.578423 Y -361.179749 Z 758.060730
```

Nuage de points pour la surface 4

```
!  
! ASCII generated by Digitized Shape Editor/CATIA  
!  
! Without Scans  
! Point Format          ='X %f Y %f Z %f'  
!  
! Total number of points = 19  
!  
X 280.950226 Y -224.020920 Z 350.835846  
X 199.502151 Y -302.093597 Z 212.406509  
X 144.406830 Y -352.843506 Z 41.903637  
X 342.914581 Y -196.164841 Z 473.621582  
X 635.348999 Y -205.404099 Z 45.246677  
X 585.047729 Y -223.060532 Z 424.358093  
X 909.170593 Y -311.098633 Z 36.976555  
X 905.010498 Y -314.846283 Z 152.783981  
X 763.376038 Y -280.681671 Z 144.936295  
X 739.204956 Y -282.529572 Z 258.750092  
X 746.626404 Y -315.772736 Z 477.145905  
X 849.294922 Y -340.018066 Z 481.495239  
X 855.330872 Y -333.071808 Z 370.146118  
X 409.609192 Y -178.885330 Z 257.855713  
X -74.358437 Y -391.428406 Z 39.636135  
X -34.852783 Y -387.370087 Z 256.666199  
X 184.264938 Y -313.722595 Z 471.407501  
X 72.832016 Y -376.045258 Z 374.337433  
X 884.735779 Y -323.491547 Z 274.895599
```


Nuage de points pour la surface 5

```
!  
! ASCII generated by Digitized Shape Editor/CATIA  
!  
!   Without Scans  
!   Point Format           ='X %f Y %f Z %f'  
!  
!   Total number of points = 3  
!  
X 89.130974 Y -234.615143 Z 1000.022644  
X 368.391541 Y -140.328293 Z 1000.104370  
X 643.570190 Y -239.299622 Z 1000.149780
```

ANNEXE 3

Exemple de fichier de résultats

Pièce nominale : pièceaube.1
 Pièce brute : piècebrute.1
 Nombre de surfaces : 5

Surfaces :

Nom de la surface	Fichier de points	Nb de points	Pondération
Surface1	C:\nuage1	20	1
Surface2	C:\nuage2	19	0
Surface3	C:\nuage3	19	3
Surface4	C:\nuage4	19	0
Surface5	C:\nuage5	3	2

Étape de rapprochement sans contraintes

Statistique sur les points en violation de contrainte :

Surface	nb de points en violation de la contrainte P	nb de point en violation de la contrainte P'
Surface1 :	5	4
Surface2 :	0	1
Surface3 :	17	1
Surface4 :	0	1
Surface5 :	3	0

Surface	Points en violation		points en non violation	
	(dmj)min	(dmj)max	(dmj)min	(dmj)max
Surface1 :	0.01	0.29	0.50	1.40
Surface2 :			1.41	4.156
Surface3 :	0.012	0.746	0.40	0.709
Surface4 :			1.427	3.523
Surface5 :	4.479	5.470		

Surface	(dmin)min	(dmin)max	ds
Surface1 :	0	1.129	0
Surface2 :	0	3.628	0
Surface3 :	0	0.294	0
Surface4 :	0	3.23	0
Surface5 :			0

Étape de rapprochement avec contraintes

Statistique sur les points en violation de contrainte :

Surface	nb de points en violation de la contrainte P	nb de point en violation de la contrainte P'
Surface1 :	10	4
Surface2 :	15	1
Surface3 :	0	0
Surface4 :	0	0
Surface5 :	0	0

Surface	Points en violation		points en non violation	
	(dmj)min	(dmj)max	(dmj)min	(dmj)max
Surface1 :	16.551	57.787	0.443	47.121
Surface2 :	1.151	36.127	3.906	32.164
Surface3 :			14.921	71.956
Surface4 :			7.848	46.234
Surface5 :			7.226	32.681

Surface	(dmin)min	(dmin)max	ds	
Surface1 :	0	29.437	0	
Surface2 :	0	14.877	0	
Surface3 :	5.445	68.183	4.675	
Surface4 :	5.915	44.749	5.627	
Surface5 :	0.639	26.531	0.639	

X= 25.165 ; 14.355 ; -5.689 ; 33.254 ; -10.911 ; 12.035

Nombre d'itération de l'étape sans contraintes : 73

Nombre d'itération de l'étape avec contraintes : 4

Durée : 7.64 heure

ANNEXE 4

Interface utilisateur

4.1 Exécution du programme de balancement

Les étapes suivantes guide l'utilisateur pour entrer les données nécessaires à l'exécution du programme de balancement :

- a) Ouvrir le fichier contenant l'ensemble pièce nominale et pièce brute.
- b) Exécuter le programme en allant au menu : Outil >>Macro (figure 38).

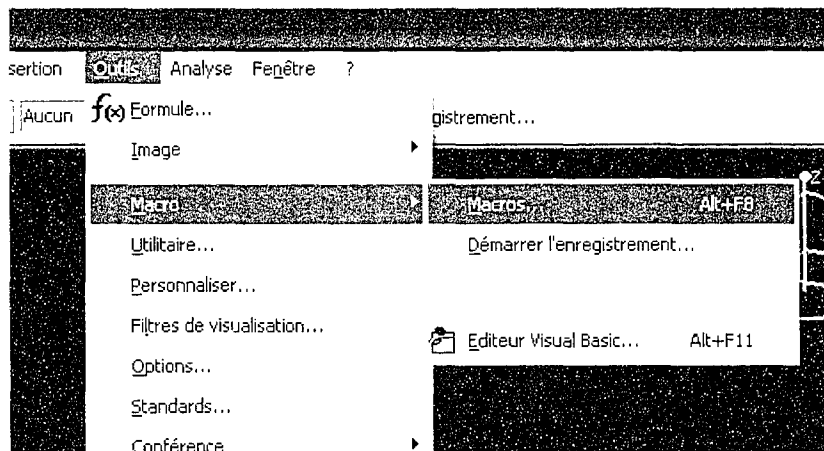


Figure 38 Ouverture de la liste des macros

- c) Sélectionner le macro "Balancer" et cliquer sur Exécuter (figure 39), et L'interface utilisateur apparaît.
- d) L'interface utilisateur est constituée de deux rebriques, la première est utilisée pour entrer les données nécessaires pour le programme comme le nom de la pièce brute et nominale (les noms apparaissant sur l'arbre de spécification), les fichiers contenant les nuages de points ainsi que les pondérations (figure 40).

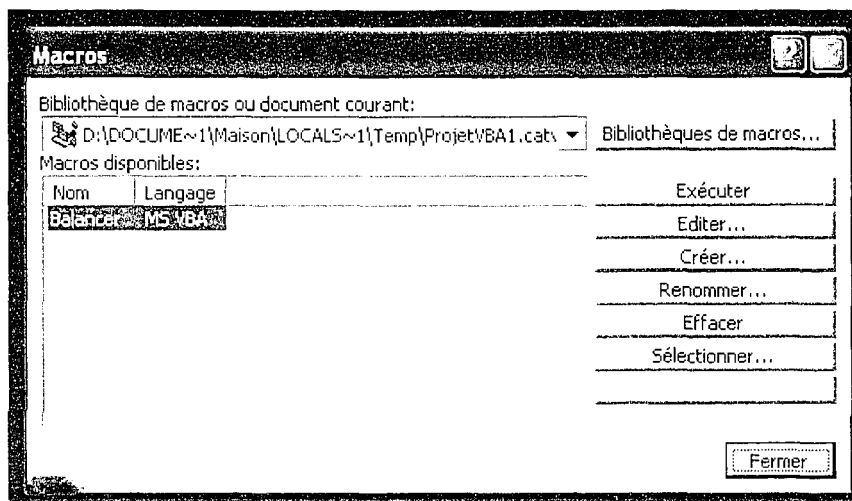


Figure 39 Démarrage du programme de balancement

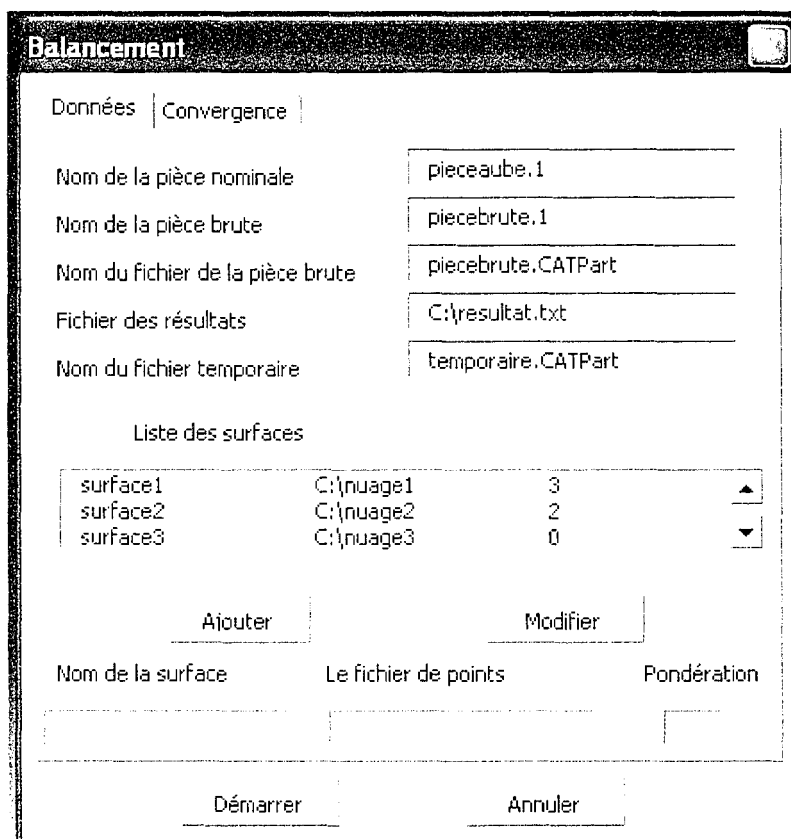


Figure 40 Rubrique pour l'entrée des données

- e) La deuxième rubrique est consacrée à l'entrée des paramètres de convergence et du Simplex (figure 41).

The screenshot shows a dialog box titled "Balancement" with two tabs: "Données" and "Convergence". The "Convergence" tab is active. It contains the following fields:

- Nombre maximal d'itérations pour l'alignement sans contraintes: 99
- Nombre maximal d'itérations pour l'alignement avec contraintes: 5

Below these fields is the section "Paramètres du Simplex :", which is organized into two columns: "Étape d'alignement sans contraintes" and "Étape d'alignement avec contraintes".

	Étape d'alignement sans contraintes	Étape d'alignement avec contraintes
alpha	1	0.5
Béta	0.5	0.7
gamma	2	2.5

At the bottom of the dialog box are two buttons: "Démarrer" and "Annuler".

Figure 41 Rubrique pour les paramètres de convergence

- f) Après avoir entré toute les informations mentionnées ci haut, commencer l'exécution en cliquant sur "Démarrer".

4.2 Intégration du programme de balancement dans CATIA V5

Avant de commencer l'exécution du programme, il faut que celui-ci soit inclus dans la bibliothèque des macros de CATIA V5. Pour cela, il faut ouvrir le menu des macros de

la figure 39 et cliquer sur Bibliothèque de macros. La fenetre de la figure 42 s'ouvre et donne la possibilité d'ajouter une bibliothèque de macros de type ".catvba" (figure 42).

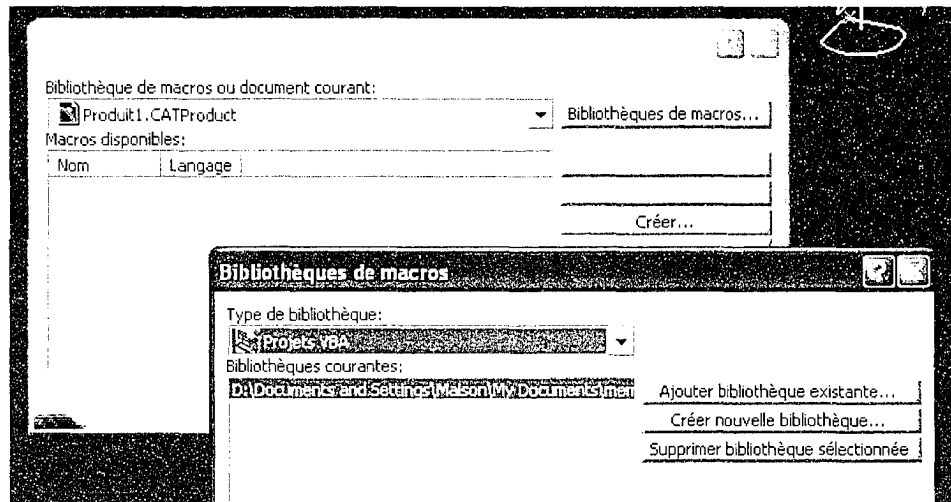


Figure 42 Intégration du programme de balancement dans CATIA V5

RÉFÉRENCES

- [1] Ebenstein, S.E., Kiridena, V.S., Smith, G.H. (1996). Inspection of Functional Free Form Geometry. Materials research laboratory, Ford motor company. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 58, pp. 396-400.
- [2] Huang, X., GU, P. (1998). CAD-Model based Inspection of Sculptured Surfaces with Datums. INT. J. prod. RES., Vol. 36, No. 5, pp. 1351-1367.
- [3] Mihailo, R., Brujic, D., Handayani, S. (2000). CAD-Based Triangulation of Unordered Data Using Trimmed NURBS Models. Journal of Materials Processing Technology, Vol 107, pp. 60-70.
- [4] Wu, C.Y., Neal, G.L., De Meter, E.C., Trethewey, M.W., Rao, S.B. (1999). Global Workpiece Positioning System (GWPS), Part 1: concept and development of laser probe based system. Journal of Manufacturing Systems, Vol. 18, No. 6.
- [5] Wu, C.Y., Neal, G.L., De Meter, E.C., Trethewey, M.W., Rao, S.B. (1999). Global Workpiece Positioning System (GWPS), Part 2: concept and development of laser probe based system. Journal of Manufacturing Systems, Vol. 18, No. 6.
- [6] Kang, B., Chu, Y.X., Gou, J.B., Li, Z.X. (1997). A CAD-Based Probing and Localization Method For Arbitrary Fixed Workpiece. Proceedings of the 1997IEEE, International Conference on Robotics & Automation. Albuquerque, New Mexico.
- [7] Menq, C., Chen, F.L. (1996). Curve and Surface Approximation from CMM Measurement Data. Computers ind. Engng Vol. 30, No. 2, pp. 211-225, Elsevier Science Ltd. 0360-8352 (95) 00165-4.
- [8] Chu, Y.X., Gou, J.B., Wu, H., Li, Z.X. (1998). Localization Algorithms: Performance Evaluation and Reliability Analysis. Proceedings of the 1998IEEE, International Conference on Robotics & Automation Leuven, Belgium.
- [9] Châtelain, J.F., Fortin, C. (2001). A Balancing Technique For Optimal Blank Part Machining. Precision Engineering Journal Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 25, pp. 13-23.
- [10] Chu, Y.X., Gou, J.B., Li, Z.X. (1998). On The Hybrid Workpiece Localization/ Envelopment Problems. Proceedings of the 1998IEEE, International Conference on Robotics & Automation. Leuven, Belgium.

- [11] Tucker, T.M., Kurfess, T.M. (2003). Newton Methods for Parametric Surface Registration, Part I. Theory. *Computer-Aided Design*, Vol. 35, pp. 107-114.
- [12] Menq, C.H., Yau, H.T., Lai, G. (1992). Automated Precision Measurement of Surface Profile in CAD-Directed Inspection. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, VOL. 8, NO. 2.
- [13] Li, Z., Gou, J., Chu, Y. (1998). Geometric Algorithm for Workpiece Localization. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, No.6.
- [14] Ko, K.H, Maekawa, T., Patrikalakis, N.M. (2003). An Algorithm for Optimal Free-Form Object Matching. *Computer-Aided Design*, Vol. 35, pp. 913-923.
- [15] Châtelain, Jean-François (1995). *Système d'Analyse de Données d'Inspection Tridimensionnelles Intégré à un Système CAO/FAO*. Thèse Ph.D., École Polytechnique de Montréal.
- [16] Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Brian P. Flannery, B.P. (1992). *Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing*, second edition.
- [17] Koshel, R. John. Enhancement of the Downhill Simplex Method of Optimization. *International Optical Design Conference Technical Digest*.
- [18] V. Wadeux (2001). *Guide d'utilisation du logiciel CATIA V5*. Université de Liège Faculté des sciences appliquées, pp. 3-20.
- [19] J-L. Giorgetta, *Cours de base CATIA V5*, Laboratoire SOLEIL, Centre national de la recherche scientifique, pp. 3-28.