



HAL
open science

Conception de montages d'usinage modulaire pour le fraisage

Said Zirmi

► **To cite this version:**

Said Zirmi. Conception de montages d'usinage modulaire pour le fraisage. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2010. Français. NNT: . tel-00580857

HAL Id: tel-00580857

<https://theses.hal.science/tel-00580857>

Submitted on 29 Mar 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma mère et à la mémoire de mon père.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier tous ceux qui par leurs conseils, encouragements, critiques ou discussions ont contribué à mon travail de thèse.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à M. Henri PARIS, mon directeur de thèse, pour sa disponibilité, ses nombreux encouragements, sa patience durant ma présence au laboratoire 3S qui est devenu G-SCOP et toute la confiance qu'il m'a accordé durant la thèse. Ces compétences et ces conseils m'ont été d'une aide précieuse pour achever ce travail. Il m'a apporté son soutien pour encadrer cette thèse en me conseillant efficacement tout en me laissant travailler librement.

Je remercie vivement M. Benoît FURET pour m'avoir fait l'honneur d'être président du jury et examinateur en même temps et pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail. Je remercie M. Patrick MARTIN et M. Emmanuel CAILLAUD pour avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse, pour le temps qu'ils ont consacré et les critiques constructives qu'ils ont su me faire.

Je remercie beaucoup M. Daniel BRISSAUD, le premier qui m'a accueillie au laboratoire et qui m'a toujours encouragé.

J'ai trouvé au Laboratoire G-SCOP une ambiance particulièrement favorable pour mener à bien ce travail, et pour cela je remercie Monsieur Yannick FREIN le directeur du laboratoire qui m'a accueilli et tous les permanents sans oublier tous les secrétaires.

Je ne saurais bien sur oublier Monsieur Serge TICHKIEWITCH, Professeur au laboratoire G-SCOP pour ces conseils durant toute ma thèse et pour son cours d'optimisation.

Je tiens à remercier l'ensemble du personnel informatique à savoir Cédric EYRAUD, Jean-Yves ALLARD et Sébastien MARTIN.

J'adresse des chaleureux remerciements à tous les thésards et les stagiaires que j'ai côtoyé au laboratoire le long de ma thèse pour leurs encouragements, leurs soutiens ainsi que la bonne ambiance qu'ils ont entretenue dans le laboratoire et pour la richesse des échanges scientifiques et extra-scientifiques que j'ai pu avoir avec eux.

Enfin un grand merci à ma très chère mère, mon épouse pour son précieux soutien morale et pour sa patience durant mes séjours en France loin d'elle et pour ses encouragements, mes enfants IMADEDINE, AYOUB et MOSEB SOHEIB, mes sœurs, mon frère OMAR, à mes amis de Grenoble Chibane HICHAM, Allag HICHAM, Kedim TAWFIK, Samah RACHID, Fehmi CHEMOU, Arab ZAKARIA et Tamali DJAMEL et enfin à mes amis de Béchar Cheik MEZRAG et Mohamed GOURARI.

Je vais conclure en ayant une pensée pour tous mes proches et ma famille qui m'ont toujours aidé et encouragé tout au long de ce travail. Je leur dédie à tous ce travail.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	3
INTRODUCTION	11
1 MOTIVATION.	11
1.1 Contexte.	12
1.2 Problématique	12
2 PLAN DE LA THESE.	14
CHAPITRE 1 : MONTAGE D'USINAGE	15
1 DEFINITION ET FONCTION D'UN MONTAGE D'USINAGE.	16
1.1 Définition d'un montage d'usinage	16
1.2 Fonctions d'un montage d'usinage	16
1.3 Montage modulaire	17
2. DIFFERENTS TRAVAUX REALISES SUR LES MONTAGES D'USINAGE	19
2.1 Processus de conception du montage d'usage	20
2.2 Analyse pour la conception du montage d'usinage	20
2.3 Méthodologies utilisées dans l'analyse pour la conception du montage d'usinage	26
2.4 Optimisation dans la conception du montage d'usinage	33
2.5 Vérification de la conception du montage d'usinage	42
2.6 Conception du montage assistée par ordinateur	46
CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE DE CONCEPTION	51
1 INTRODUCTION	51
2 INDUSTRIALISATION DES PRODUITS MECANIQUES	52
2.1 Les différentes étapes d'industrialisation des produits mécaniques	52
2.2 Les principales tâches du bureau des méthodes	52
2.3 L'interaction entre les différentes tâches de conception d'une sous-phase d'usinage	59

3	<i>Notre approche vis-à-vis la conception du montage d'usinage</i>	67
3.1	<i>Principe de moindre engagement</i>	67
3.2	<i>Disposer d'informations sur la faisabilité</i>	67
3.3	<i>Les informations disponibles issus de l'architecture de la gamme d'usinage</i>	70
3.4	<i>Découplage du problème à partir des informations disponibles</i>	72
3.5	<i>Stratégie globale de résolution retenue</i>	87
CHAPITRE 3 : DEMARCHE DE CONCEPTION DU MONTAGE D'USINAGE		91
1	INTRODUCTION	91
2	SELECTION DES ELEMENTS TECHNOLOGIQUES EN CONTACT AVEC LA PIECE	91
2.2	<i>Orientation et positionnement de la pièce sur la plaque de base</i>	92
2.3	<i>Choix des éléments d'appui en contact avec la pièce</i>	96
2.4	<i>Choix des éléments technologiques de bridage en contact avec la pièce</i>	105
3	PLACEMENT DES ELEMENTS TECHNOLOGIQUES EN CONTACT AVEC LA PIECE	111
3.1	<i>Hypothèses de travail</i>	111
3.2	<i>Formulation du problème d'optimisation pour le placement des éléments d'appui prépondérant</i>	111
3.3	<i>Cas des pièces déformables</i>	123
3.4	<i>Placement des éléments technologiques en contact avec la pièce pour l'appui secondaire de type appui linéaire rectiligne</i>	124
3.5	<i>Placement des éléments technologiques pour l'appui secondaire type appui linéaire annulaire</i>	127
3.6	<i>Placement des éléments technologiques pour l'appui tertiaire type buté</i>	127
3.7	<i>Ajustement des points d'appui en fonction des trous de la plaque de base</i>	128
3.8	<i>Placement des éléments de bridage en contact avec la pièce</i>	129
4	ÉLEMENTS DE LIAISON	131
4.1	<i>Choix des éléments de liaison pour les éléments d'appui</i>	132
4.2	<i>Choix des éléments de liaison pour le bridage</i>	134
4.3	<i>Construction des tours du montage d'usinage</i>	135
4.4	<i>Stratégie de choix des éléments de liaisons</i>	138
5	ASSEMBLAGE	138
5.1	<i>Positionnement et orientation des tours d'appui sur la plaque de base</i>	139
5.2	<i>Les éléments de soutien</i>	144
5.3	<i>Vérification de la solution finale</i>	145
CHAPITRE 4 : IMPLEMENTATION		147
1	INTRODUCTION	147
2	PRESENTATION DE NOTRE MODULE DE CONCEPTION DU MONTAGE D'USINAGE	147
2.1	<i>Les entrées du module</i>	148
2.2	<i>Les sorties du module</i>	153
2.3	<i>Les limites du module</i>	153
2.4	<i>Le rôle de l'utilisateur</i>	153
2.5	<i>Les informations disponibles après la sélection d'une prise de pièce</i>	153
3	L'INTEGRATION DE NOTRE SYSTEME DANS PROPEL	154
4	LA STRUCTURE DU MODULE RESGAMME_MONTAGEU	155
4.1	<i>Le sous-module de choix des éléments technologiques en contact avec la pièce</i>	156
4.2	<i>Le sous-module placement des éléments technologiques sur la pièce</i>	157
4.3	<i>Le sous-module choix des éléments de liaison avec la plaque de base</i>	159
4.4	<i>Le sous-module d'assemblage</i>	160
5	EXEMPLE D'APPLICATION : (FINITION DE LA BASE)	161
5.1	<i>Présentation de la pièce</i>	161

Terminologie

A_T, B_T, C_T	: Les sommets du triangle de sustentation,
A	: Longueur de la plaque de base (en mm),
a	: Avance par tour (en mm/tr),
a_e	: Largeur de coupe radiale ou largeur usinée (en mm),
a_p	: Profondeur de coupe axiale (en mm),
B	: Largeur de la plaque de base (en mm),
b_i	: Bride indice i,
$\{\tau_{bridage}\}$: Torseur de bridage,
C	: Couple de coupe (en N.m),
Cr	: Course de la machine outil,
C_i	: Contour de la surface d'appui,
C_{nj}	: Contrainte d'optimisation indice j,
Cn_T	: Centre du triangle de sustentation,
$\{\tau_{coupe}\}$: Torseur des efforts de coupe,
$\{\tau_{posage}\}$: Torseur de posage,
Db	: Distance caractérisant la bride (en mm),
d	: Distance entre le contour intérieur et le contour extérieur de la pièce,
$\Delta d = d_f - d_i$: Surépaisseur d'usinage au diamètre (en mm),
d_t	: Diamètre nominal du taraud (en mm),
d_i	: Diamètre de l'avant trou (en mm),
d_f	: Diamètre du foret = diamètre du trou après perçage (en mm),
D	: Diamètre de la touche d'appui (en mm),
D_1	: Diamètre du trou taraudé de la plaque de base (en mm),
D_u	: Direction d'usinage,
D_{fr}	: Diamètre de la fraise (en mm),
D_{max}	: Distance maximale (en mm),
Disc	: Distance entre deux cercle de la zone admissible sur la plaque de base,
DL	: Diamètre du lamage du trou des la plaque de base,
e	: Distance de décalage (en mm),
\vec{e}_i	: Erreur de position,
ex	: excentration de la fraise (en mm),
E	: Etendue de l'appui secondaire de type linéaire rectiligne (en mm),
E_{Young}	: Module de Young (en daN/mm),
E_b	: Epaisseur de la plaque de base (en mm),
f_z	: Avance par dent (en mm/dent),

f_{Obj}	: La fonction objective,
F	: L'effort résultant retenu (en N),
FB_i	: Effort de bridage indice i (en N),
F_p	: Effort de pénétration ou effort de poussé (en N),
F_c	: Effort de coupe pour une denture de fraise (en N),
F_t	: Effort tangentiel de coupe (en N),
F_r	: Effort radial de coupe (en N),
F_v	: Effort vertical de coupe = effort axial de coupe (en N),
FT_i	: Facteur de tolérance indice i,
G_p	: Centre de gravité de la pièce,
g	: Profondeur du lamage du trou de la plaque de base,
H	: Hauteur entre la plaque de base et la surface d'appui de l'appui prépondérant (en mm),
h	: Epaisseur du copeau (en mm),
hpi	: Distance entre le point le plus bas de la pièce et la surface d'appui de l'appui prépondérant (en mm),
hmax	: Valeur limite d'utilisation des empilage,
hsi	: Distance entre le contour de la pièce et la surface d'appui de l'appui secondaire,
hbi	: Distance entre la plaque de base et le point d'application de la bride
h3	: la hauteur entre la plaque de base et le point d'appui de l'appui secondaire,
k	: Coefficient d'influence de l'affûtage,
K_F	: Grandeur utilisée par CETIM (en N/mm^2),
K_M	: Grandeur utilisée par CETIM (en N/mm^3),
k_s	: Pression spécifique de coupe (en N/mm^2),
l	: Largeur de la bride (en mm),
L_i	: Lieux potentiels de placement,
M_p	: Matrice de passage,
M_a	: Mouvement d'avance,
M_R	: Matrice de rotation,
M_T	: Matrice de translation,
n	: Vitesse de broche (en tr/min),
N_b	: Nombre de bride,
N	: Nez de bride,
P	: Direction de posage de l'appui prépondérant,
p	: Profondeur de passe (en mm),
p	: Pas du taraud (en mm),
PdP	: Prise de pièce,
P_{max}	: Pression maximale en (N/mm^2),
P_{adm}	: Pression admissible par le matériau en (N/mm^2),
q	: Distance entre l'axe du support et le point d'appui de l'appui secondaire ou tertiaire,

R_a	: Rugosité,
R_B	: Résultante des efforts de bridage (en N),
R_C	: Résultante des efforts de coupe (en N),
R_i	: Réaction d'appui indice i ,
R_T	: Rayon du cercle inscrit dans le triangle de sustentation (mm),
R	: Rayon de la touche d'appui (en mm),
$R1$: L'axe de rotation du plateau,
r	: Rayon du cercle de l'empreinte (en mm),
S_{tr}	: La surface du triangle de sustentation ($en\ mm^2$),
T	: Intervalle entre les trous de la trame de la plaque de base (mm),
Tol	: Tolérance,
t_x	: Déplacement du repère local suivant l'axe X,
t_y	: Déplacement du repère local suivant l'axe Y,
t_z	: Déplacement du repère local suivant l'axe Z,
U	: Pas d'une fraise,
u	: Translation de la pièce suivant x,
V_c	: Vitesse de coupe (en m/min),
v	: Translation de la pièce suivant y,
w	: Translation de la pièce suivant z,
(xb_i, yb_i, zb_i)	: Coordonnées de la bride i ,
$X_b OY_b$: Repère lié à la plaque de base,
$X_p OY_p$: Repère lié à la pièce,
$(x_1, y_1), (x_2, y_2) et (x_3, y_3)$: Les coordonnées des sommets du triangle de sustentation,
x_T, y_T	: Les coordonnées du centre du triangle de sustentation Cn_T ,
x_C, y_C	: Les coordonnées de la résultante des efforts de coupe R_C ,
x_B, y_B	: Les coordonnées de la résultante des efforts de bridage R_B ,
x_{Gp}, y_{Gp}	: Les coordonnées du centre de gravité G_p de la pièce,
Z	: Direction d'usinage,
z	: Nombre d'arrêtes de l'outil ou nombre de dents d'une fraise,
ξ	: Constante exposant du taraudage,
ε	: Défaut d'orientation,
$\bar{\theta}$: Rotation du référentiel de la pièce dans le référentiel de la machine outil,
α	: Rotation de la pièce autour de l'axe Z,
β	: Défaut d'orientation,
ω	: Rotation de la pièce autour de l'axe Y,
γ	: Rotation de la pièce autour de l'axe X,
ψ	: Angle d'hélice de la denture de la fraise (en degré °),
δ	: Défaut de positionnement,
λ	: Valeur expert,
ς	: Constante,
ρ	: Constante,
ν	: Coefficient de Poisson,
ϕ	: L'angle d'orientation de la résultante de coupe (en degré °).

INTRODUCTION

1 *Motivation.*

Ce troisième millénaire a connu d'énormes progrès en matière de développement technologique dans tous les secteurs. Cependant, on peut voir que le secteur de production de pièces mécaniques a progressé de manière notable grâce à l'outil informatique en élaborant des logiciels allant de la conception à la fabrication. Ceci mène les entreprises concernées à intégrer ces outils de plus en plus pour faire face à la compétitivité qui s'acharne de jour en jour.

Les entreprises de production de produits mécaniques sont plus que jamais concernées par la réduction du cycle de développement de leurs produits. Cette réduction passe forcément par la diminution des délais de conception et de fabrication. Toutefois, l'amélioration permanente de la qualité des produits, de leurs coûts et de la gestion des connaissances de l'entreprise restent aussi des impératifs pour une meilleure compétitivité.

Cette réduction des délais de fabrication repose sur une exploitation efficace des méthodes modernes de production, à travers notamment l'automatisation de tâches, et la formalisation des connaissances. Ces dernières décennies ont vu le développement poussé de logiciels informatiques pour la modélisation géométrique de produits (modeleurs CAO / CAD) et d'outils pour l'assistance à la fabrication (logiciels de FAO / CAM). Au fur et à mesure de développement des besoins des industriels, des modules métiers se sont greffés à ces logiciels (module de dimensionnement, module spécialisé pour les géométries de pièces forgées...).

Actuellement et face à la complexité et la variété de produits à réaliser, les entreprises de mécanique modernes tendent vers le concept de Production Intégrée par Ordinateur (PIO, ou *CIM Computer Integrated Manufacturing*). On veut ainsi matérialiser le couplage Conception/Fabrication (renforcé par les approches récentes de conception intégrée) par le développement d'une chaîne ininterrompue de traitements de l'information sur le produit, de la conception dans le bureau d'études jusqu'à la fabrication dans l'atelier.

Or jusqu'à présent, on peut dire que l'évolution des systèmes de CAO et de FAO s'est faite de manière divergente, que ce soit au niveau de la nature des données manipulées ou au niveau du traitement de ces données. Même si les logiciels de CFAO, permettent de gérer une base de données commune pour la conception et la fabrication, ils n'intègrent pas complètement tous les chaînons entre ces deux domaines : **la génération automatique** (ou assistée) **des gammes de fabrication** (ou *CAPP, Computer Aided Process Planning*) et surtout la conception du montage d'usinage qui est un outillage indispensable pour fixer la pièce sur la machine outil.

1.1 Contexte.

Ce travail s'inscrit dans la continuité des travaux de Daniel BRISSAUD [Bri92] et d'Henri PARIS [Par95] déjà réalisés à l'ex laboratoire 3S (Sol Solide Structure) et l'actuel laboratoire G-SCOP sur l'automatisation de la gamme d'usinage. Ces travaux ont permis de développer un outil de génération automatique de gammes d'usinage appelé PROPEL implémenté dans un environnement CFAO Open Cascade. Cet outil génère un modèle prise de pièce qu'il faut ensuite matérialiser par un montage d'usinage modulaire.

Le problème qui nous intéresse ici est de prendre la conception des montages d'usinage modulaires dans sa globalité tout en répondant ainsi à l'ensemble des fonctions attendues. Il s'agit donc d'une solution globale. Nous nous intéressons à comprendre comment à partir d'un posage donné, les experts en usinage choisissent les composants technologiques et les relient entre eux et avec la plaque de base.

On s'intéresse plus particulièrement dans ce travail au montage modulaire compatible avec les opérations de fraisage réalisées sur un centre d'usinage 3 ou 4 axes.

1.2 Problématique

La conception et la réalisation du montage d'usinage sont des étapes importantes dans la maîtrise de la qualité des pièces usinées. Depuis quelques années, la littérature propose de nombreuses études sur la conception des montages d'usinage pour le fraisage. Ces travaux concernent la modélisation des connaissances pour

l'aide à la conception des montages d'usinage sous forme d'une base de règles et la conception automatique de montages modulaires pour les pièces prismatiques. Ces travaux considèrent plus particulièrement l'accessibilité des différentes surfaces de la pièce pour choisir les surfaces de posage, la conception du bridage et l'optimisation des efforts de serrage en tenant compte de la stabilité et de l'équilibre de la pièce, la conception de montages d'usinage assistée par ordinateur en proposant différentes approches; géométriques, ou à l'aide d'algorithmes génétiques.

La reconnaissance des entités de prise de pièce dans un environnement CFAO a été abordée lors de travaux précédents au laboratoire. De plus, nous avons mis en place des indicateurs permettant de caractériser les performances des prises de pièce durant le raisonnement de conception de gammes d'usinage. Il s'agit maintenant de matérialiser le montage d'usinage. Pour cela nous disposons des informations comme la cinématique de la machine outil, de la liste des opérations d'usinage, de l'entité de prise de pièce. Chaque appui est caractérisé par la géométrie de la pièce participant à chaque appui. Le bridage est caractérisé par un mode de bridage et par un ensemble de lieux potentiels où il est possible de placer une bride type en évitant les collisions entre les outils de coupe et la bride. De plus, nous disposons des indicateurs de qualité, caractérisant l'espace dans lequel doit se situer la géométrie nominale de chaque appui, de stabilité caractérisant les risques de glissement et de basculement de la pièce sur ses appuis pendant l'usinage.

Les travaux menés au laboratoire se sont appuyés sur une approche intégrée et sur le principe de moindre engagement. Mes travaux se sont aussi fortement appuyés sur une approche intégrée pour la conception simultanée de la gamme d'usinage et du montage d'usinage. Il s'agit donc de passer du modèle prise de pièce avec indicateurs associé à chaque sous-phase à la matérialisation du montage d'usinage. Pour cela, nous avons identifié les sous problèmes à résoudre et nous nous appuyons sur de nombreuses méthodes existantes pour proposer un algorithme intelligent. Bien sûr nous nous assurons à tout instant que les contraintes d'accessibilité des outils de coupe aux surfaces à usiner, de qualité et liées au comportement mécanique du système pièce montage d'usinage sont bien respectées.

Notre travail consiste dans un premier temps à formaliser les règles de choix des éléments d'appui, de maintien et de soutien et les règles pour les placer. Ceci en respectant les différentes contraintes liées à la conception du montage d'usinage modulaire à savoir le respect de la qualité de la pièce à usiner, l'accessibilité des outils de coupe aux différentes surfaces à usiner et le comportement mécanique de la pièce. Ces différentes contraintes ne sont pas indépendantes entre elles. Il est donc difficile de les satisfaire toutes en même temps. La solution retenue sera donc issue d'un compromis. Pour le placement nous proposons de mettre en place une fonction optimisant le placement de ces éléments sur la pièce en considérant les contraintes adéquates.

Dans un deuxième temps ces éléments technologiques sont reliés à la plaque de base en garantissant l'assemblage des éléments entre eux sans collision et la possibilité de monter et de démonter l'ensemble des pièces de la série tout en respectant les cadences et les conditions environnementales liées à la présence de copeau et de

fluide de coupe. De plus, le montage d'usinage doit être rigide et compact pour éviter les déformations excessives sous l'effet des efforts de coupe ainsi que toutes vibrations indésirables. L'évacuation des copeaux et du lubrifiant est importante pour assurer la propreté des contacts entre la pièce et le montage d'usinage.

L'ensemble des modèles, concepts et méthodes est alors intégrée dans un environnement CFAO Open Cascade. Cela permet au sein d'un même outil de concevoir la gamme d'usinage et pour chaque sous phase le montage d'usinage. Notre solution globale ne sera pas forcément optimale mais elle doit être pertinente, prête à l'utilisation sur machine outil.

2 *Plan de la thèse.*

Ce mémoire de thèse est composé de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous exposons la synthèse de notre recherche bibliographique concernant les travaux de recherche sur les montages d'usinage pour le fraisage durant ces quinze dernières années. Le but de cette étude est de situer notre travail par rapport aux autres travaux déjà établis tout en clarifiant notre problématique.

Dans le chapitre 2, nous présentons la méthodologie de conception du montage d'usinage modulaire pour le fraisage. Nous mettons en évidence une stratégie de conception du montage d'usinage à partir des données issues de l'architecture de la gamme d'usinage. Nous expliquons comment la conception du montage d'usinage peut se faire sans perturber les autres activités associées à la sous-phase et comment on va résoudre le problème de la conception du montage d'usinage de manière découplée des autres actions effectuées durant la conception de la sous-phase sans que la solution retenue ne soit remise en cause par la suite.

Le chapitre 3 présente la démarche de conception du montage d'usinage. C'est la partie qui concrétise réellement la méthodologie du chapitre 2. Dans ce chapitre, on traite pratiquement le choix et le placement des éléments technologiques modulaire ainsi que le choix et le placement des éléments de liaison avec la plaque de base. L'assemblage de l'ensemble du montage d'usinage avec les séquences d'assemblage est aussi défini.

Dans le dernier chapitre on présente les résultats de notre travail implémenté dans l'environnement CFAO Open Cascade avec un exemple pratique de conception du montage d'usinage.

A la fin une conclusion qui permettra de mieux synthétiser les objectifs atteints et de présenter les éventuelles perspectives de ce travail.

CHAPITRE 1 :

MONTAGE D'USINAGE

Ce chapitre présente un état de l'art sur les travaux de recherche consacrés à la conception des montages d'usinage pour le fraisage pendant ces quinze dernières années. La littérature présente beaucoup de travaux sur les montages d'usinage dans différents domaines d'étude parmi lesquelles certaines s'approchent de notre approche. Le but de ce chapitre est de situer notre travail par rapport aux autres travaux déjà établis tout en clarifiant la problématique qui nous intéresse.

Dans la première partie de ce chapitre on va donner la définition ainsi que les fonctions assurées par le montage d'usinage. La deuxième partie sera consacrée aux différents travaux réalisés sur les montages d'usinage. Enfin une conclusion est donnée pour résumer les travaux et dégager notre problématique.

1 Définition et fonction d'un montage d'usinage.

1.1 Définition d'un montage d'usinage

Un montage d'usinage est un outillage utilisé pour fixer la pièce solidement à la bonne position dans l'espace de travail de la machine outil. La conception du montage d'usinage joue un rôle important pour obtenir une pièce usinée de bonne qualité [Ziro7]. Elle s'inscrit au sein d'un processus plus global de fabrication industrielle. Les contraintes que doit respecter un montage d'usinage sont les suivantes :

- Garantir un libre accès des outils de coupe aux surfaces à usiner,
- Garantir la qualité de la pièce à usiner,
- Garantir la stabilité de la pièce sous les sollicitations dues aux efforts de coupe,
- Garantir un montage et un démontage aisé de la pièce,
- Permettre l'évacuation des copeaux et du fluide de coupe,
- Garantir la sécurité de l'opérateur pour la mise en œuvre du montage.
-

1.2 Fonctions d'un montage d'usinage

Les fonctions principales que doit remplir le montage d'usinage sont :

- **Positionner la pièce.** Durant l'usinage, la pièce doit être positionnée précisément dans l'espace de travail de la machine-outil. Cette condition est nécessaire pour garantir un bon positionnement des usinages sur la pièce en respectant l'iso statisme et assurant le maximum de précision et de stabilité. Pour cela, le posage est une combinaison d'appui prépondérant, secondaire et tertiaire qui peut être de type 3-2-1r (plan, linéaire, butée), de type 3-2-1c (plan, centreur, locating) ou de type 4-1-1 (pivot, butée, butée) (Figure² 1.1).
- **Maintenir la pièce.** Durant l'usinage, la pièce doit être maintenue en position sur ses appuis pour éliminer tout risque de mouvement dû aux sollicitations mécaniques extérieures comme les efforts de coupe, le poids de la pièce et les forces d'inertie. Ce maintien est assuré par un bridage qui peut être de mode bride lorsque l'effort de bridage est opposé à l'appui plan prépondérant, de mode étau lorsque l'effort de bridage est opposé à l'appui linéaire d'orientation et de mode mandrin lorsque la géométrie d'appui participe aussi au bridage (Figure 1.2).
- **Soutenir la pièce.** Dans certains cas, il est nécessaire d'ajouter des soutiens pour éviter les déformations et/ou les vibrations indésirables de la pièce durant son usinage. Le soutien est assuré par des éléments réglables afin de ne pas perturber la qualité de la mise en position de la pièce dans l'espace de travail de la machine outil.

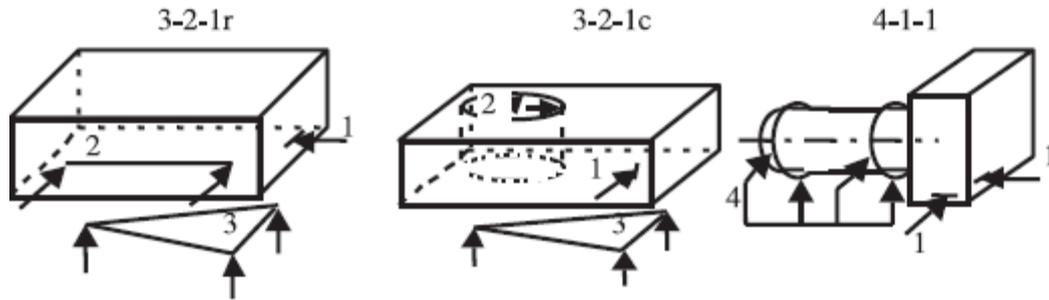


Figure. 1.1 Les différents types de posage. [Par95].

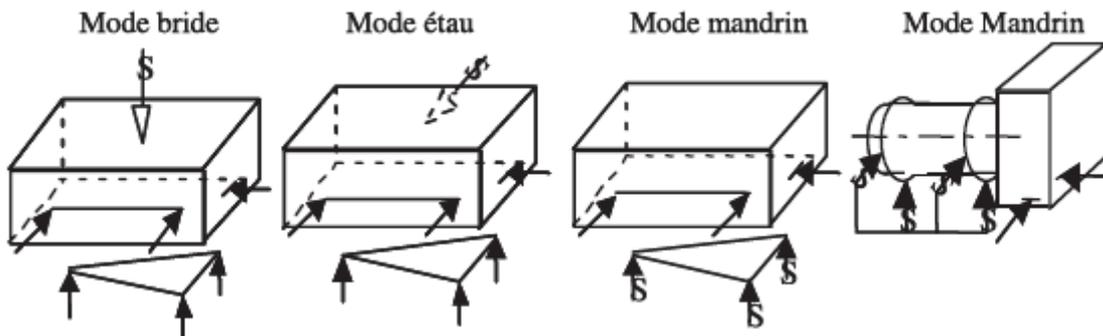


Figure. 1.2 Les différents modes de bridage. [Par95].

L'objectif premier du montage d'usinage est de situer précisément la pièce dans l'espace de travail de la machine outil par rapport à un référentiel afin d'assurer l'usinage au bon endroit sur la pièce. Cette mise en position ne doit pas être perturbée par les efforts de coupe, de bridage et d'inertie. De plus, les outils de coupe ne doivent pas entrer en collision avec les éléments du montage d'usinage tout au long de leurs trajectoires.

1.3 Montage modulaire

Les montages modulaires (figure 1.3) sont réalisés à partir d'éléments modulaires standards assemblés pour obtenir un porte-pièce désiré. Ils peuvent être conçus et réalisés rapidement. Comme ces montages sont démontés à chaque campagne d'usinage, il faut, en contrepartie, avoir d'une part un stock d'éléments modulaires suffisant (ce qui représente un coût non négligeable) et d'autre part des opérateurs pour effectuer le montage, le réglage puis le démontage et le nettoyage à chaque lancement de lot.

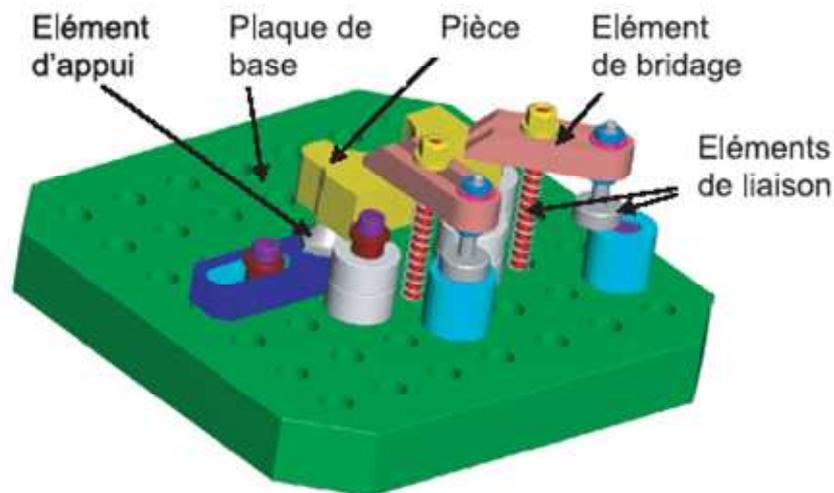


Figure. 1.3 Exemple d'un montage d'usinage modulaire. [Zir07]

Les montages d'usinage modulaires pour le fraisage offrent les avantages suivants :

- 1) Gain de temps incontestable sur l'étude et la réalisation d'un montage, mais aussi sur le temps global de mise en œuvre (délai total de fabrication du montage),
- 2) Flexibilité : modifications faciles et rapides en fonction de l'évolution des pièces,
- 3) Parfaitement adapté aux études réalisées par C.A.O,
- 4) Capacité de bridage étendue,
- 5) Précision liée à la rigidité du système : grande résistance aux efforts de coupe et de bridage,
- 6) Conforme aux adaptations pour palettisation ou cellules flexibles,
- 7) Capacité de brider des pièces en fonction du type de machine : sur centre d'usinage à broche horizontale ou verticale, sur fraiseuses, sur machines à mesurer 3D,
- 8) Grande performance par ses possibilités de prise de pièces,
- 9) Adapté aux petites et moyennes séries,
- 10) C'est un outillage très performant pour la sous-traitance qui permet de réduire les délais de fabrication.

1.3.1 Groupement de pièce en panoplie ou en multi-phase

Pour les montages d'usinage modulaires on peut grouper un ensemble de pièces sur le même montage (figure 1.4), ceci est généralement utilisé pour les pièces de petites dimensions et pour des moyennes et grandes séries. Le montage est dit en panoplie si on est dans la même phase sinon on change de phase et l'on est alors en multi-phase.



Figure 1.4 Groupement de pièces sur le même montage. [Nor00]

2. Différents travaux réalisés sur les montages d'usinage

L'objectif de cette partie est de revoir les travaux déjà réalisés dans le domaine des montages d'usinage. Ce qui nous permettra de bien comprendre les solutions déjà mises en place pour résoudre les problèmes liés à la qualité des pièces, aux comportements mécaniques et à l'accessibilité. Je pourrais ainsi m'appuyer sur ces travaux pour mieux définir ma problématique et essayer de trouver des pistes de solution.

Je présenterais comment la problématique posée a pu évoluer dans le temps, et les raisons de cette évolution. Ceci permet de définir de façon précise, ce qui a été fait et ce qui reste à faire.

Depuis quelques années, la littérature propose de nombreuses études sur la conception du montage d'usinage pour le fraisage. La plupart de ces études s'intéressent plus particulièrement à des sous domaines liés à la conception du montage d'usinage pour le fraisage. On trouve plus particulièrement des études sur :

- La modélisation des connaissances pour l'aide à la conception des montages d'usinage à l'aide d'une base de règles,
- La conception automatique des montages d'usinage pour les pièces prismatiques,
- La conception de montage d'usinage assisté par ordinateur,
- Les problèmes de serrage des pièces dans le montage d'usinage,
- Comportement dynamique des montages d'usinage,
- Les déformations de la pièce ou du montage d'usinage
- La sélection automatique des surfaces de serrage,
- L'analyse de l'erreur de positionnement,
- L'analyse de la stabilité,

- L'analyse de la tolérance des entités d'usinage,
- L'accessibilité des surfaces de prise de pièce,
- La performance des montages d'usinage,
- La planification de posage,
- La vérification de l'interférence entre l'outil et le montage d'usinage,
- Le frottement aux points de contact montage-pièce,
- Vérification ou validation de la solution du montage d'usinage.

Dans la suite on va essayer d'organiser cette étude selon la méthodologie utilisée et selon l'objectif de l'étude et suivant le travail dominant dans chaque étude.

2.1 Processus de conception du montage d'usage

D'après **Bi et Zhang [Bio1]**, le processus de conception du montage d'usinage comprend quatre parties qui sont :

1. Description du problème de conception du montage d'usinage,
2. Analyse pour la conception du montage d'usinage,
3. Optimisation dans la conception du montage d'usinage,
4. Vérification de la conception du montage d'usinage [Kano1].

2.1.1 Description du problème de conception du montage d'usinage

Un problème de conception dans le cas général peut toujours être défini comme un problème d'optimisation qui englobe trois éléments : les variables de conception, les contraintes de conception et les objectifs de conception. Pour la conception du montage d'usinage la recherche de la solution optimale globale est difficile à obtenir mais l'optimisation des différents paramètres comme les forces de serrage optimales, le placement des points d'appui optimal reste possible. D'une façon générale on cherche une solution pertinente.

2.2 Analyse pour la conception du montage d'usage

Les modèles d'analyse suivants sont employés pour vérifier si une configuration de montage répond aux contraintes de conception du montage d'usinage.

2.2.1 Analyse cinématique

L'analyse cinématique permet de s'assurer que les composants du montage n'obstruent pas le chemin d'outil au cours de l'usinage et que les entités d'usinage sont accessibles. Elle permet aussi de s'assurer que les composantes du montage ne rentrent pas en collision entre elles et accèdent facilement aux surfaces d'appui et de bridage.

2.2.2 Analyse de forces

L'analyse de forces est utilisée pour vérifier que les forces appliquées par les systèmes de bridage sont suffisantes pour maintenir l'équilibre statique et dynamique en présence des forces de coupe.

2.2.3 Analyse de déformations

C'est l'étape qui comporte le plus de calculs. Le souci est qu'une pièce peut se déformer élastiquement et/ou plastiquement sous l'influence des forces de coupe et de bridage de sorte que les tolérances désirées ne sont plus respectées. La déformation est un souci particulier surtout avec les pièces à paroi mince et les pièces où il faut enlever beaucoup de matière.

2.2.3.1 Utilisation de la méthode des éléments finis

En raison de ses bonnes possibilités et performances dans l'analyse des structures, la méthode des éléments finis a été employée dans beaucoup de travaux traitant les aspects de déformation. Elle a été utilisée pour la première fois dans l'analyse de déformation des montages d'usinage vers les années 1990 par **Lee** et **Cutkosky [Bio1]**. D'autres chercheurs ont par la suite utilisé cette méthode soit pour prédire, évaluer ou minimiser les déformations du système pièce-montage d'usinage. Parmi ces chercheurs on trouve **Kashyap [Kas99]** qui s'est intéressé à minimiser les déformations de la pièce dues aux forces de coupe autour des positions des points d'appui, en particulier pour les pièces à parois minces.

Satyanarayana [Sato4] a analysé les effets des différentes conditions aux limites associées à un calcul par éléments finis pour les prédictions de la déformation et pour les forces de réaction aux points de contact pièce-montage. Spécifiquement il considère, les éléments de contact avec frottement, les forces nodales et les conditions aux limites de déplacement appliquées aux appuis de type sphère-plan et plan-plan et la géométrie de contact des brides. Il confirme dans son étude que lorsque la pression de contact et la déformation sont importantes, il faut utiliser des éléments de contact type surface-surface.

Siebenaler [Sio06] a modélisé le système pièce-montage pour explorer l'influence du montage sur la déformation de la pièce. Cette analyse permet de constater que 98% de la déformation se produit au niveau des points d'appuis. Le reste de la déformation se produit dans les autres composants du montage d'usinage. Les paramètres considérés sont le frottement au contact pièce-montage, la densité du maillage et la prédiction de la déformation de la pièce.

Et enfin, pour la prédiction de la rigidité du montage d'usinage **Zheng [Zhe08]** a présenté un modèle d'éléments finis en introduisant les éléments de contact non-linéaire sur la surface de contact (figure 1.5). L'élément de contact est modélisé par trois ressorts indépendants, deux dans les directions tangentielles et un dans la direction normale de la surface de contact. Une forte non-linéarité est causée par la séparation et le glissement possible entre deux composants du montage. Les résultats sont en accord avec la solution analytique correspondant aux poutres et les résultats issus de la littérature.

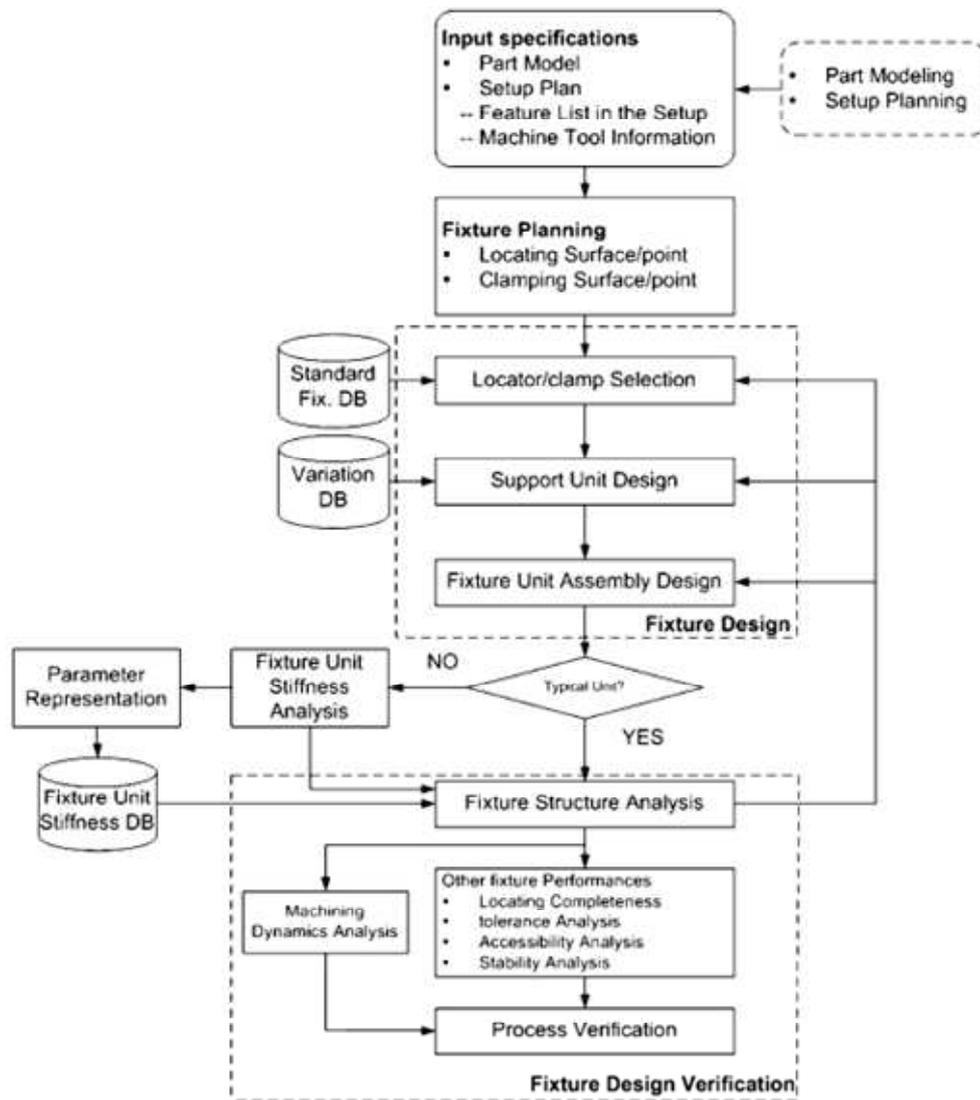


Figure. 1.5 Système de conception du montage d'usinage. [Zhe08]

Prabhakaran [Pra07] a optimisé le placement des éléments du montage pour minimiser la déformation de la pièce en se basant sur l'hypothèse que la pièce est un corps élastique. La déformation de la pièce est modélisée en utilisant la méthode des éléments finis couplé avec un algorithme génétique.

2.2.3.2 Tolérance et analyse de l'erreur de positionnement

La méthode des éléments finis et l'étude des déformations permettent aussi d'analyser l'erreur de positionnement pour confirmer le respect des tolérances. Dans ce domaine on trouve Rong [Ron01] qui présente une approche d'analyse de l'erreur de positionnement pour la planification de posage et la conception du montage d'usinage, il inclut trois techniques : (1) faire correspondre les éléments de mise en position avec les entités de mise en position; (2) définition de la zone de tolérance vectorielle; (3) développement de l'algorithme d'évaluation de l'erreur de positionnement avec la fonction d'analyse de la sensibilité (figure 1.6).

La définition de la zone de tolérance et le système de coordonnées sont mis au point pour l'analyse de l'erreur de positionnement de la pièce sur son montage d'usinage. En outre, la méthode et le modèle sont applicables à tous les types de pièces tridimensionnelles. Intégrée avec un système de planification de posage à base de graphe, cette méthode peut être utilisée dans la planification du posage et au stade de la conception du montage d'usinage pour générer un schéma de mise en position optimale.

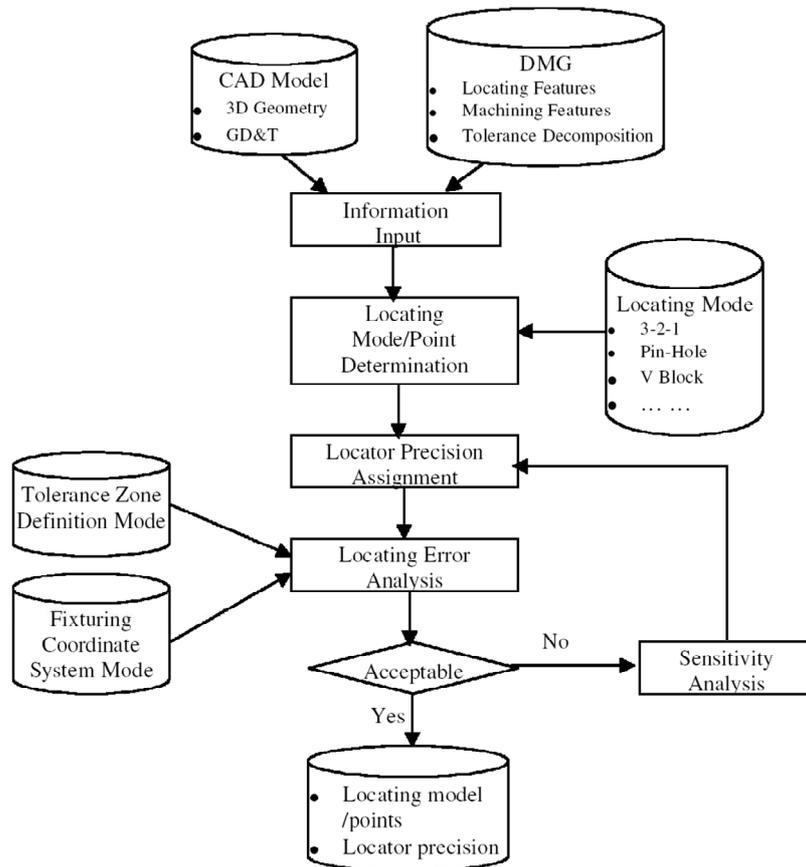


Figure 1.6 Vue d'ensemble du système d'analyse de l'erreur de positionnement. [Ron01]

Il est très important de connaître la relation entre l'erreur de positionnement et le déplacement de la pièce pour respecter la qualité des entités d'usinage. Dans ce but **Carlson [Caro1]** a établi une équation quadratique pour représenter cette relation en considérant la pièce comme un corps rigide. Cette équation dépend des positions des points d'appuis et de la géométrie de contact entre l'appui et la pièce. Les principaux facteurs sont la distance entre les appuis par rapport à la taille des erreurs de positionnement et la courbure de la surface autour des points de contact.

Marin [Maro3], traite le problème de respect des tolérances géométriques en fonction de l'erreur de positionnement. D'abord, il résout le problème direct qui prédit la tolérance de l'erreur de positionnement de l'entité d'usinage en fonction de l'erreur d'appui. Après, il résout le problème dit "inverse" qui consiste à créer des bornes sur les erreurs de mise en position pour assurer que les limites fixées par les tolérances géométriques ne sont pas violées. La méthode proposée est basée sur le

calcul de la différence causée par la déformation qui se produit à la suite des erreurs d'appui dont l'écart peut être écrit comme une fonction quadratique.

La modélisation analytique de l'effet des séquences de bridage sur l'erreur de positionnement est donnée par **Raghu [Rago4]**. L'erreur de positionnement de la pièce positionnée selon le principe 3-2-1 et considérée comme un corps rigide est quantifié par le déplacement d'un point de la surface de la pièce. Une procédure algorithmique visant à appréhender comment les forces et les déformations changent quand les brides sont appliquées de façon séquentielle. Les déformations à tous les points de contact sont établies lorsque chaque bride est appliquée. Les déformations élastiques à ce stade sont obtenues en minimisant l'énergie potentielle totale du système pièce-montage. La comparaison avec les expériences montre que la moyenne des erreurs de prédiction est de l'ordre de 25%. La simplicité relative du modèle peut être utile au concepteur du montage d'usinage pour faire rapidement des comparaisons qualitatives et quantitatives des différentes séquences de serrage.

2.2.3.3 Influence de l'effort de bridage et de coupe sur la qualité des usinages

Les efforts de bridage et de coupe influencent considérablement la qualité des surfaces usinées. La gestion de ces efforts pour améliorer la qualité des surfaces usinées est indispensable. Dans ce contexte **Liao [Liao1]** a développé un modèle d'analyse par éléments finis du système pièce-montage d'usinage pour étudier l'influence de la pré charge de bridage et des efforts de coupe sur la qualité des surfaces usinées. L'ampleur de l'erreur de la surface est corrélée proportionnellement aux charges externes (de serrage et d'usinage). La raideur dynamique du système montage-pièce dépend de la structure de la pièce, de sa mise en position et de son serrage. Par conséquent, chaque entité d'usinage sur la pièce a une réponse vibratoire différente à une excitation forcée. Lorsque la fréquence des forces de coupe (fréquence de passage des dents) ne correspond pas à l'une des fréquences naturelles du système montage-pièce, seules les vibrations forcées seules, influencent légèrement la qualité finale de la surface usinée.

2.2.3.4 Influence des erreurs des surfaces d'appui sur la qualité des surfaces usinées

L'influence des erreurs des surfaces d'appui sur la qualité des usinages est étudiée par **Sangnu [Sano1]** à travers un modèle mathématique qui prédit l'impact des erreurs des surfaces d'appui sur la mise en position d'une pièce cylindrique. **Zhang [Zhao1]** emploie aussi les graphes pour décrire les relations entre les entités et les tolérances. Il utilise un modèle de décomposition de tolérance pour répartir les tolérances.

Pour ce qui est de Wang [Wano2b] il étudie l'impact des erreurs de positionnement (figure 1.7) sur les erreurs géométriques potentielles des entités d'usinage. Il montre l'importance de considérer l'erreur globale entre les multiples points d'appui. Il propose également une approche d'optimisation de placement des points d'appui pour réduire les variations géométriques aux points critiques des entités d'usinage (figure 1.8). D'après lui la mise en position optimale permettra de réduire au minimum les erreurs de fabrication et de réduire les tolérances inutiles uniformes pour tous les appuis.

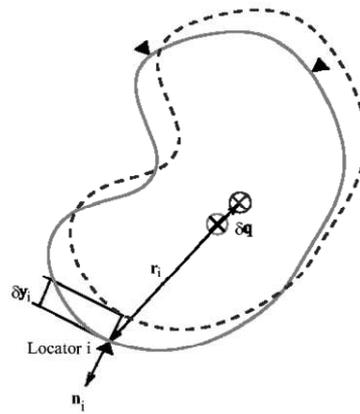


Figure 1.7 Le modèle de montage, l'erreur d'appui et l'erreur de positionnement. [Wan02b]

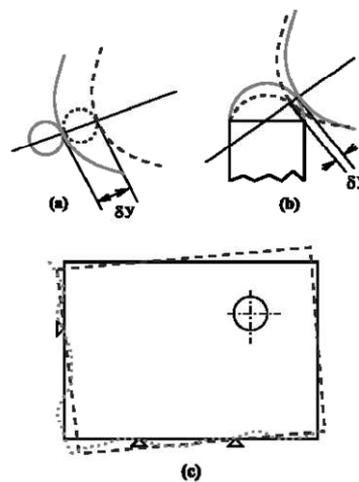


Figure 1.8 L'erreur d'appui : (a) l'erreur de position d'appui, (b) l'erreur de profil d'appui (c) l'erreur dans l'entité de référence. [Wan02b]

L'évaluation de la conception des montages d'usinage basée sur des critères de qualité est traitée par **Pelinescu [Pel02]**. Trois objectifs sont définis : La précision de la mise en position de la pièce, l'amplitude et la dispersion des forces de contact des appuis et l'équilibre de la pièce.

L'impact des défauts géométriques et la conformité pièce-montage d'usinage sur les surfaces usinées sont décrits par **Qin [Qin07]**. L'erreur de positionnement et la déformation élastique de la pièce pourront contribuer aux erreurs des surfaces usinées. Dans le détail, il montre que la mise en position de la pièce et le processus de serrage sont évalués sur la base des défauts géométriques et des déformations locales du système pièce-montage dans les zones de contact. Il rapporte que le processus de serrage est déterminé par la résolution d'un problème de programmation non linéaire pour réduire au minimum l'énergie totale dispersée par friction.

2.3 Méthodologies utilisées dans l'analyse pour la conception du montage d'usinage

Plusieurs méthodes sont utilisées pour l'analyse de la conception du montage d'usinage, des méthodes utilisant soit la géométrie, soit les lois de la mécanique.

2.3.1 Utilisation de la méthode géométrique

L'approche géométrique est beaucoup utilisée car la majeure partie des informations peut être identifiée par les systèmes CAO. Dans ce contexte **Wu** et **Rong** [**Wu98b**] ont automatisé la conception des montages d'usinage modulaires à base d'analyse géométrique pour les pièces prismatiques en déterminant les surfaces d'appui et les relations d'assemblage avec les composantes modulaires (figure 1.9). Pour la précision du positionnement, l'analyse géométrique est toujours utilisée et la pièce est projetée sur le plan de l'appui prépondérant. Les défauts des points d'appuis ne sont pas considérés. Pour la planification du bridage lorsque les appuis sont placés sur la pièce, les positions des brides peuvent être sélectionnées et vérifiées pour garantir la stabilité de la pièce par une analyse de l'équilibre de la pièce. Enfin pour l'accessibilité il évoque deux types d'accessibilité, la première est l'accessibilité de chaque surface de la pièce, la seconde est la facilité de chargement et de déchargement de la pièce dans le montage d'usinage.

Hou [**Hou01**] a développé un système de conception automatique de montage d'usinage (figure 1.10) composé de trois modules : un module de gestion de la base de données qui comprennent les différents type de montages, un module de sélection des éléments technologiques et un module de conception du montage d'usinage.

La base de données se compose de montages modulaires mécaniques, montages modulaires hydrauliques et les vés modulaires pour les pièces cylindriques. Les éléments technologiques appropriés peuvent être automatiquement sélectionnés en fonction des conditions d'usinage. Enfin, par des algorithmes de raisonnement, la mise en position et les orientations sont déterminées.

En ce qui concerne la conception du montage, les règles de raisonnement s'appuient sur le principe 3-2-1 pour les pièces prismatiques. Tout le modèle est développé en intégrant les systèmes de gestion de base de données et les systèmes de CAO. L'appui prépondérant est généralement la surface parallèle à la plaque de base et qui a la plus grande aire pour réaliser une stabilité plus élevée. L'appui secondaire est destiné à la surface la plus étendue pour que les deux points d'appui soient les plus éloignés possibles et l'appui tertiaire est perpendiculaire à l'appui secondaire.

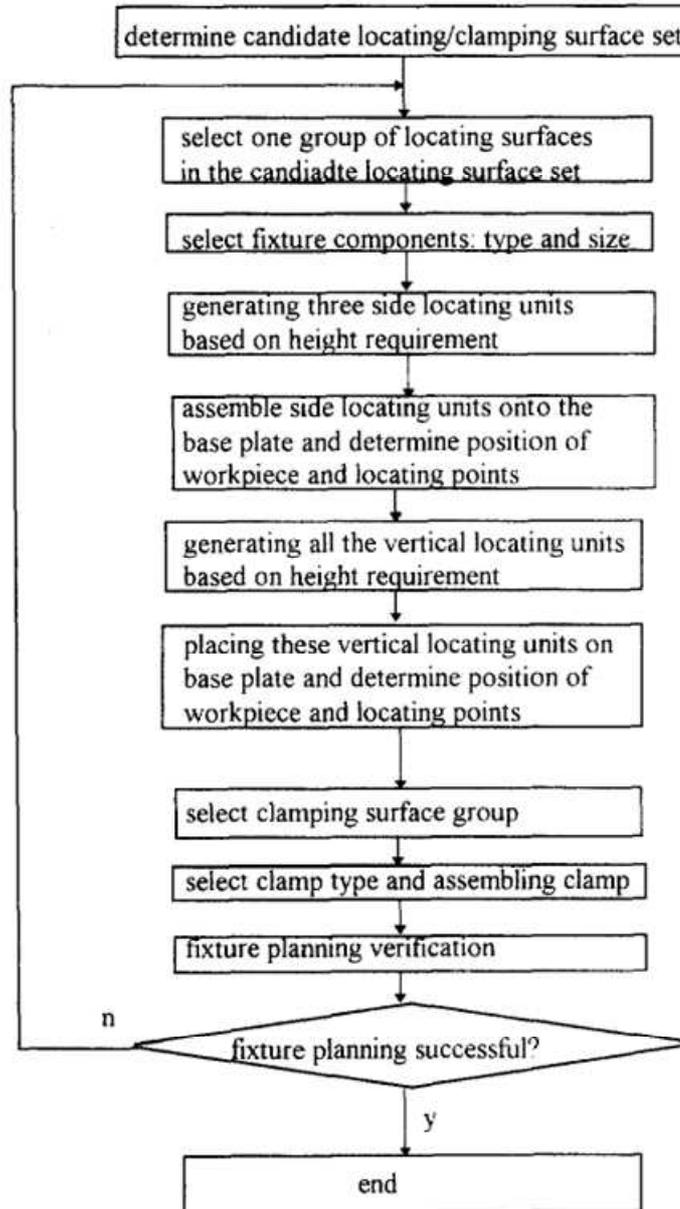


Figure. 1.9 Organigramme de planification automatique 3D du montage modulaire. [Wu98b]

Le centre de gravité de la pièce doit être à l'intérieur du triangle constitué par les trois appuis de l'appui prépondérant pour garantir la stabilité. Pour les pièces à parois minces, le principe N-2-1 ($N \geq 3$) peut être utilisé pour empêcher les déformations. Les surfaces de bridage doivent être opposées à l'appui prépondérant et secondaire correspondantes. Pour une meilleure rigidité, la force de coupe doit être appliquée pour plaquer la pièce sur ses appuis.

Ce système est très basique et très limité car il ne prend pas en compte tous les cas des forces d'usinage et ne traite qu'une famille de pièces prismatiques ou cylindriques.

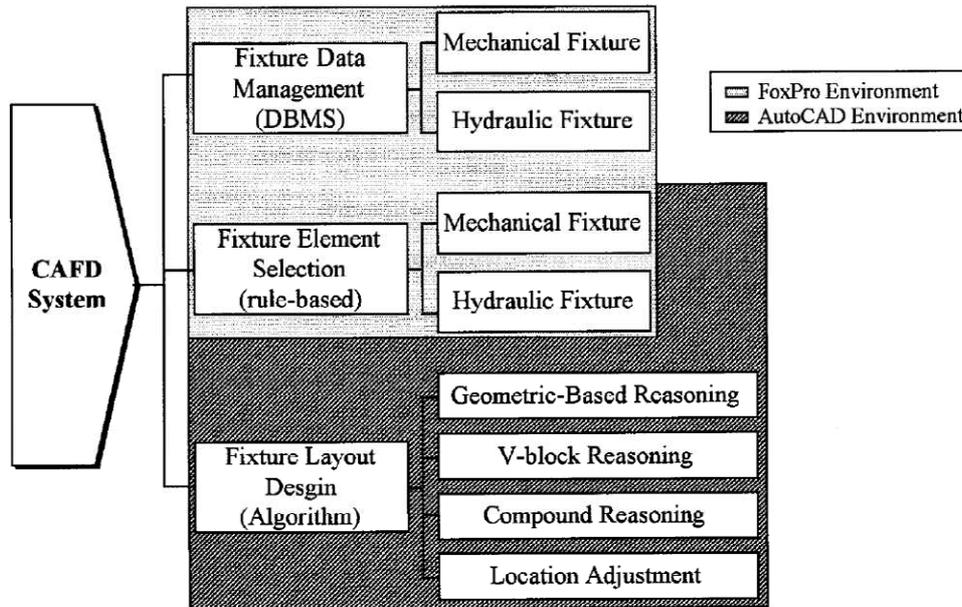


Figure 1.10 Architecturer du système de conception du montage assisté par ordinateur. [Hou01]

Dans le même cadre **Joneja [Jon99]** propose un système à base d'entités et de règles heuristiques qui génère le nombre minimum de prise de pièce compatible avec les éléments du montage et les outils de coupe disponibles pour les pièces prismatiques. Le système prend en compte les contraintes d'usinage, les machines-outils, ainsi que la faisabilité des montages d'usinage.

La prise de pièce, les séquences d'usinage, et les fonctions de planification de montage sont des modules interactifs de l'ensemble du système. Le principe 3-2-1 est utilisé ainsi que d'autres méthodes comme l'équilibre de la pièce et la théorie des tenseurs. Ce système nécessite les informations issues de la sous-phase car le choix des outils de coupe doit être effectué avant la génération du montage d'usinage pour valider l'accessibilité de ces outils. L'approche du système proposé est définie premièrement par l'analyse du problème avec identification du domaine (montages modulaires, étau, etc.), pour les montages modulaires, il faut identifier les éléments technologiques d'appui et de bridage et leurs points de placement. Une fois les éléments et les points d'appuis et de bridage déterminés il faut vérifier l'interférence avec la trajectoire d'outil. Une vérification globale de la stabilité utilisant les techniques d'analyse cinématique est enfin effectuée.

La recherche des "meilleures" positions d'appui et de bridage à base d'analyse de déformation par éléments fini et de base de règles heuristiques (figure 1.11) est réalisée par **Roy [Roy99]**. Son algorithme est basé sur la forme de la pièce et sur les conditions d'usinage afin de trouver les positions des points d'appui et de bridage qui permettent de minimiser les déformations de la pièce et d'éviter l'interférence avec l'outil de coupe. Les éléments du montage ainsi que les points de contacts sont considérés comme rigides. Les conditions aux limites sont créées selon le plan de

posage et les conditions de coupe. Seules les déformations globales sont considérées dans cette étude ainsi que l'influence des positions des points d'appui.

Afin d'améliorer le système et éviter de recourir chaque fois à l'analyse par éléments finis qui est très coûteuse, **Roy** développe une méthode heuristique qui considère principalement le rapport possible entre les points d'application de la force de coupe et les positions proposées des points d'appuis.

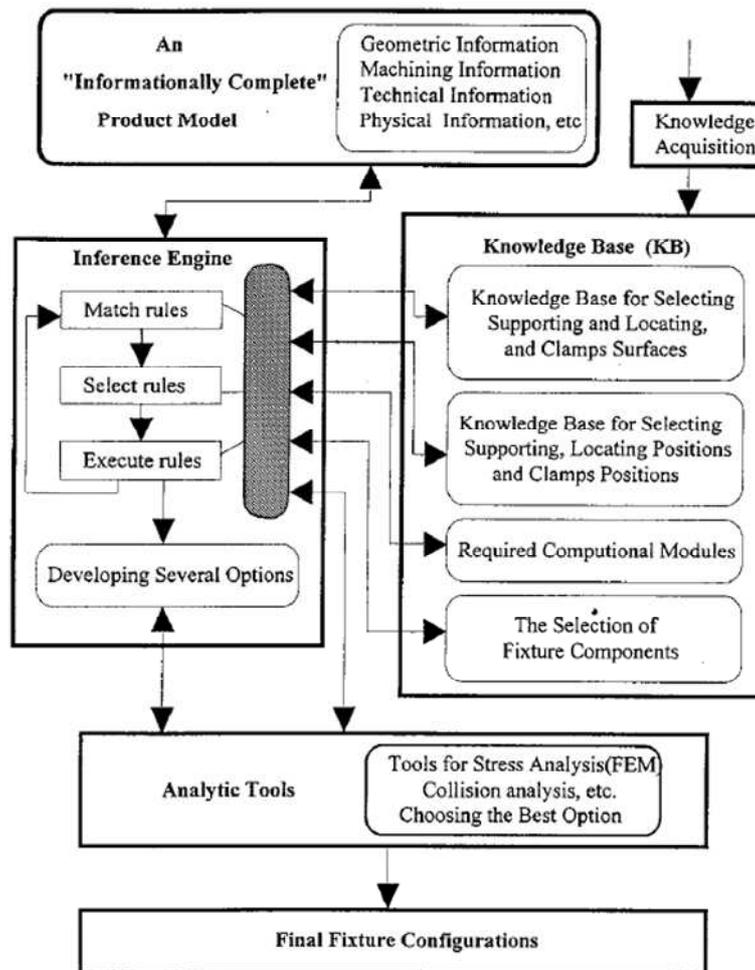


Figure 1.11 La structure du système proposé. [Roy99]

Une étude préliminaire identifie en premier lieu l'ensemble des surfaces possibles de serrage. Une fois que les positions des points d'appuis et de bridage sont déterminées, les positions de bridage préliminaires sont ensuite étudiées. La figure 1.12 illustre le processus de sélection des positions de bridage.

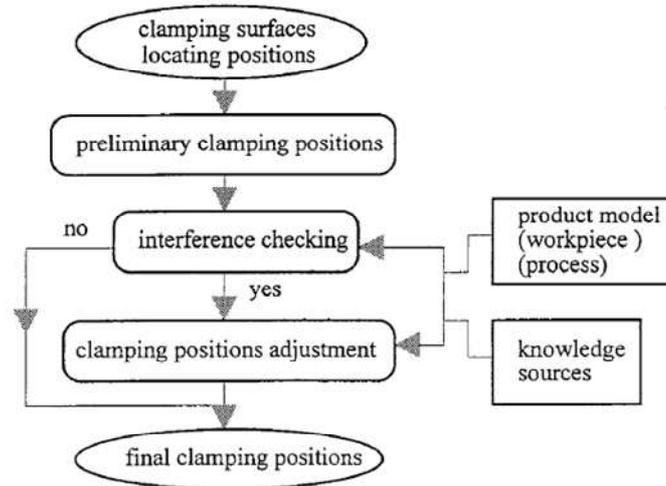


Figure 1.12 Processus de sélection des positions de bridage. [Roy99]

L'accessibilité des surfaces d'appui est traitée par **Li [Li99a]**. Par application d'une technique de discrétisation de la surface candidate, un modèle d'accessibilité des surfaces de posage est établi, basé sur une évaluation globale de l'accessibilité des points discrets sur la surface. Parmi les critères d'accessibilité que **Li** cite dans son travail on trouve : la surface doit être non usinée, plane, à direction normale accessible et suffisamment large.

2.3.2 Théorie des torseurs

La théorie des torseurs est basée sur le mouvement de déplacement des corps rigides dans l'espace 3D. La force et le mouvement d'un objet peuvent être modélisés comme des torseurs de petit déplacement. Parmi les chercheurs qui ont utilisé cette méthode on trouve les premiers travaux de **Bourdet [Bou88]**, ensuite **Marin [Maro2a]** et **[Maro2b]** qui aborde le problème de calcul sans frottement du système de bridage optimal avec le calcul d'équilibre pour les pièces 3-D ayant des faces planes et cylindriques. Étant donnée une pièce avec un système d'appui 3-2-1 prédéfini, des régions polygones convexes sur les faces de serrage sont définies comme étant les positions qui peuvent recevoir les brides. Le type de contact pièce-montage est supposé être de type point-surface. Il utilise une méthode algébrique linéaire pour déterminer la position des brides. Ensuite les points de bridage optimal avec frottement sont calculés pour atteindre l'équilibre.

Roy [Roy02] a développé une méthodologie d'analyse de la stabilité de la pièce sur son montage d'usinage en considérant les deux comme rigide. Il propose une analyse qualitative pour s'assurer de la stabilité de la pièce et une analyse quantitative pour aider le concepteur à reconcevoir les positions des points d'appuis et de bridage en vue d'obtenir une meilleure stabilité de la pièce. Les forces de bridage suffisantes sont exigées pour équilibrer les forces de coupe de sorte que la pièce reste en contact avec tous les appuis pendant l'usinage. Cette analyse ne tient pas compte du frottement. Pour la simplification du modèle, les forces de bridage sont supposées identiques. La résolution du problème comporte trois étapes :

1 Chercher l'équilibre statique;

2 Garder le contact de la pièce avec les points d'appui et de bridage c'est-à-dire les réactions d'appui R_i ($i=1,\dots,6$) >0 , et les forces de bridage F_{Bi} ($i=1, 2,3$) >0 ; et

3 Minimisé les forces de bridage F_{Bi} ($i=1, 2,3$).

En fonction des positions des points d'appui et de bridage le système est capable de trouver la meilleure stabilité. Une règle heuristique est nécessaire pour renforcer la méthode car ce n'est pas toujours facile de trouver la meilleure solution.

Marin [Mar01] aborde le problème de la mise en position optimale basée sur le principe 3-2-1. Les faces représentées par des polygones convexes sur lesquelles les appuis sans frottement sont placés doivent être planes et sont choisies par le concepteur. Une mesure de la qualité a été introduite pour les appuis, basés sur toute l'opposition que les appuis exercent à l'ensemble du mouvement. Basés sur cette mesure, deux algorithmes combinatoires et un programme linéaire calculent le placement des appuis. Les algorithmes tiennent compte également des règles heuristiques de conception visant à éviter les erreurs de positionnement du système de prise de pièce. Le positionnement des trois points d'appuis de l'appui prépondérant sont les points résultant de la projection des appuis sur le plan d'appui qui doivent être les sommets d'un triangle isocèle inscrit dans la surface d'appui et qui à le plus grande étendue pour avoir une stabilité maximale. Le problème indiqué dans cette étude est un problème d'optimisation à objectifs multiples avec des contraintes non linéaires.

2.3.3 Analyse à base de règles ou à base d'entités

La modélisation des connaissances regroupe la modélisation de la démarche de conception et les règles métier. Les développements scientifiques pour atteindre ces résultats portent sur l'acquisition, la modélisation et la validation des connaissances. Parmi ces travaux on trouve ceux de **Caillaud [Cai95]** qui modélise le processus de conception du montage d'usinage en six étapes (figure 1.13). La première étape permet de renseigner le système sur la machine-outil et les différentes opérations d'usinage qui sont regroupées en sous-phases. Pour chaque sous-phase, il classe les surfaces potentielles de mise en position et associe à chacune d'entre elles une solution technologique (étape deux). A partir de ces solutions technologiques, les surfaces potentielles de maintien en position sont définies et classées pendant l'étape trois. Un calcul d'effort permet de définir les lieux de bridage et la solution technologique de maintien est choisie. Enfin, pendant l'étape quatre, les zones appartenant à la pièce qu'il faut soutenir à l'aide de support sont définies. Un choix technologique est aussi effectué pendant cette étape. Les deux derniers niveaux concernent le choix des éléments constituant le montage d'usinage. Ce modèle de conception est implanté dans un système expert appelé SEACMU dans le générateur NEXPERT OBJECT. **Caillaud** a aussi développé une démarche de définition du montage d'usinage modulaire pour la technologie à trous. Les trous sont utilisés autant que possible pour localiser les éléments (principalement ceux de mise en position).

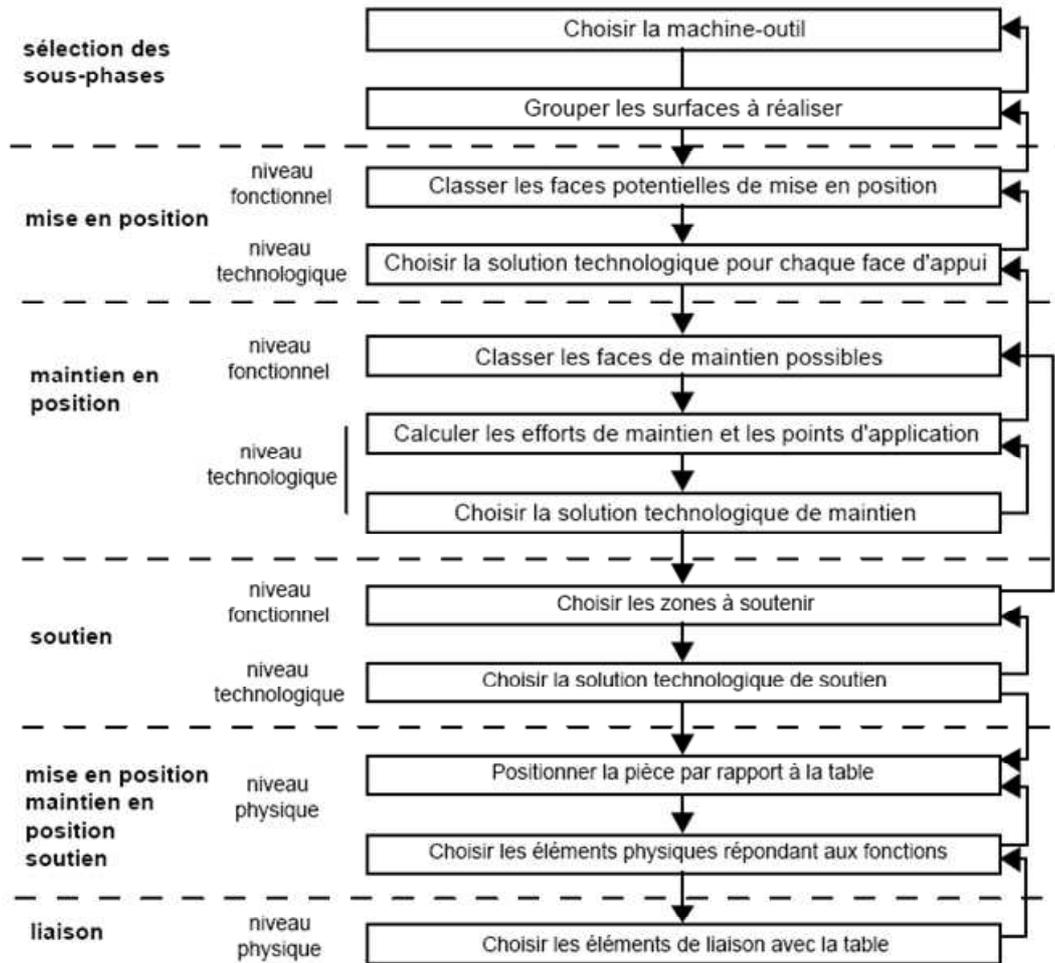


Figure 1.13 Processus de conception des montages d'usinage. [Cai95]

2.3.4 Méthodes d'analyse mécanique

La méthode d'analyse mécanique est très répandue pour modéliser les interactions des forces et les déformations du système pièce-montage. Cette méthode est beaucoup utilisée par les chercheurs pour étudier le comportement mécanique du système pièce-montage avec l'étude des contacts et du frottement afin d'évaluer l'équilibre et la stabilité statique et dynamique de la pièce. Dans ce domaine on trouve **Deng [Deno5]** qui analyse la stabilité dynamique du système pièce-montage au cours d'usinage pour les pièces de forme arbitraire (figure 1.14). Il utilise la structure des pièces rigides, entourées par des appuis et des brides à contact plan ou sphérique. Les principaux modes de déplacement, lorsque le système est soumis à des forces résultant de l'action de serrage et de la coupe sont : la déformation locale, le glissement, et la perte de contact au niveau des points d'appui. Cette étude suppose également que la machine-outil et les outils de coupe comme rigides et que les vibrations du montage et de la pièce n'affectent pas les efforts de coupe. Il propose dans son étude un modèle dynamique qui prédit le mouvement dépendant du temps, de la pièce fixée et soumise aux efforts de coupe et un modèle statique qui calcule les déformations dues aux forces de serrage. Pour modéliser l'effet de la matière enlevée, un modèle géométrique est utilisé pour calculer l'inertie variable. Les résultats tirés

de cette étude sont : (1) la dynamique des systèmes est importante pour l'analyse de la stabilité des montages lorsque la fréquence d'excitation est proche de la fréquence naturelle du système, (2) l'enlèvement de la matière affecte sensiblement le comportement dynamique et la stabilité du montage, (3) l'approche utilisée permet de déterminer les forces de serrage adaptées qui satisfont les critères de stabilité et (4) la force de serrage a un effet considérable sur la raideur du contact pour les éléments du montage à embout sphérique. La rigidité de contact des composants du montage est un des paramètres essentiels dans l'analyse de la rigidité du montage, ce qui est supposé connu dans ce travail.

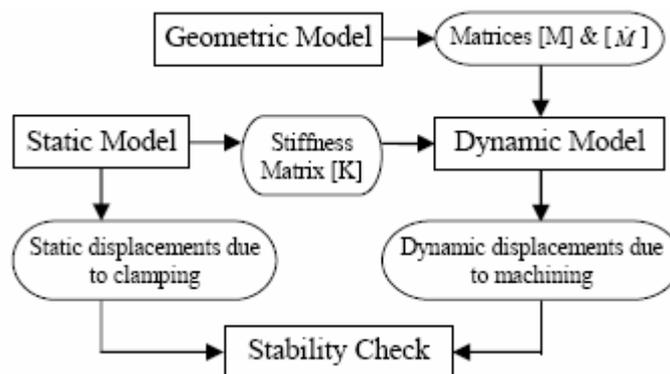


Figure 1.14 Procédure d'analyse de la stabilité dynamique. [Den05]

Il existe beaucoup d'autres travaux qui utilisent la méthode d'analyse mécanique pour étudier les interactions entre les forces de serrage, les charge d'usinage et les contacts pièce/montage avec ou sans frottement pour évaluer l'équilibre et la stabilité de la pièce sur ses appui ainsi que la minimisation des efforts de bridage. Parmi eux, les travaux de **Liao [Liao0]**, **Yeh et Liou [Yeh99]**, **Tan [Tano4]**, **Hurtado [Huro2a]**, **Tao [Tao99a]** et **[Tao99b]**, **Li [Lio0]**, **Xie [Xie00b]**, **Xiong [Xio02]**, **Phoomboplab [Phoo8]**, **Penev [Pen97]**, **Xie [Xie00a]** et **Wang [Wano3]**. La déformation de la pièce en fonction du temps, sous les efforts de bridage et de l'usinage est aussi estimée. Certain de ces travaux utilisent la théorie de Hertz pour l'étude des contacts. Tous ces travaux s'intéressent à un aspect local qui est l'étude du contact pièce-éléments du montage d'usinage et ne s'intéressent absolument pas au montage d'usinage dans son aspect global et à son interaction avec les autres éléments de la sous-phase.

2.4 Optimisation dans la conception du montage d'usinage

Plusieurs travaux se sont intéressés à l'optimisation de la conception des montages d'usinage en utilisant les différentes méthodes d'optimisation. Ces travaux s'intéressent plus particulièrement à la détermination des forces de bridage minimales en statique et en dynamique, à la minimisation des déformations et à la minimisation des défauts de mise en position.

2.4.1 Utilisation des méthodes analytiques

Dans les travaux d'optimisation, on trouve Li [Li99b] [Li01a] et [Li01b] qui présente une approche de mise en position et de calcul des forces de bridage optimales en statique et en dynamique. Il propose un modèle de contact élastique pour améliorer la précision de la mise en position par : le placement optimal des appuis et des brides, la réduction des déformations de la pièce et l'amélioration des caractéristiques des forces de réaction. L'objectif est de minimiser les effets de la déformation élastique localisée de la pièce aux points d'appuis. Le modèle dynamique est basé sur les équations de mouvement de Newton-Euler, avec la modélisation de chaque contact pièce-montage comme un demi-espace élastique soumis aux charges normales et tangentielles. L'objectif est de minimiser l'erreur de positionnement aux points d'appui au cours de l'usinage, ainsi que les forces de serrage (figure 1.15). Dans les itérations de l'algorithme si l'intervalle de tolérance requis n'est pas atteint, des éléments de soutien supplémentaires sont ajoutés et l'ensemble du processus est répété. La valeur maximale de l'erreur de position au cours de l'usinage a été réduite de près de 58,7%.

Le modèle statique détermine les forces de serrage optimales pour un montage à brides multiples soumis à des forces de coupe quasi-statiques. La méthode utilise le modèle de la mécanique du contact élastique pour représenter le contact pièce-montage ainsi que l'optimisation avec un modèle multi-objectif sous contraintes.

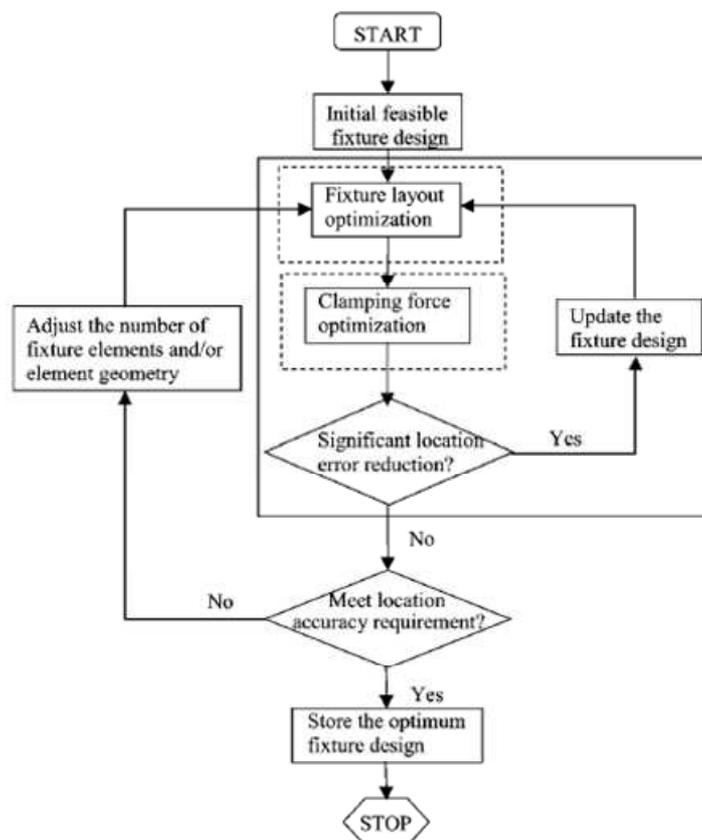


Figure. 1.15 L'algorithme itératif d'optimisation de la mise en position et des forces de serrage.

[Li01a]

La première fonction objectif est la minimisation de la force de bridage et la seconde fonction objective est la minimisation de l'énergie complémentaire total qui est déterminé par la résolution du problème de contact élastique. Les contraintes du problème sont le frottement statique et l'équilibre de la pièce. Les matériaux de la pièce et du montage sont linéairement élastiques dans les régions de contact, et parfaitement rigide ailleurs. La force de serrage est supposée constante au cours de l'usinage. Cette hypothèse est valable lorsque les brides hydrauliques ou pneumatiques sont utilisées. La théorie de Hertz est utilisée pour déterminer les déformations aux points de contact sphérique.

DeMeter [DeMo1] a modélisé le pré-chargement linéaire du système de bridage, qui peut être appliqué au système pièce-montage d'usinage. Le modèle considère la déformation statique du système pièce-montage d'usinage en réponse au processus de serrage et d'usinage. Le modèle calcule l'effort de bridage minimal nécessaire pour empêcher la pièce de glisser sur ses appuis tout au long du processus d'usinage. Cette étude expérimentale a également révélé la sensibilité des pré-charges calculées par rapport à la conformité des éléments du montage, ainsi qu'au coefficient de frottement. Ce modèle considère l'élasticité de toutes les parties du système montage-pièce ainsi que le frottement à l'interface montage pièce.

Burdick [Buro3] décrit un système de montage expérimental à contacts multiples sans frottement pour mesurer les réactions d'appui, le chargement et les déplacements de la pièce considérée comme un corps quasi-rigide. Ce système est utilisé pour déterminer expérimentalement le rapport entre le déplacement de la pièce et les variations de la force de serrage de la bride ou des forces de coupe agissant sur la pièce. Le système utilise le modèle de Hertz pour modéliser le contact appui-pièce. Contrairement au modèle de ressort linéaire utilisé pour prédire les réactions des forces trouvées dans la littérature, ce modèle est plus précis.

Wang [Wan05] présente une méthodologie d'optimisation de mise en position réalisée en considérant la répétitivité, l'immobilité et la stabilité de la pièce avec des surfaces complexes. L'optimisation de la disposition du bridage offre une méthode de minimisation de l'intensité de la force de serrage (figure 1.16). La procédure d'optimisation de serrage est : (1) de trouver les positions de serrage qui immobilise la pièce, (2) obtenir le meilleur bridage en terme de stabilité. Les hypothèses du modèle sont les suivantes : (1) frottement aux points de contact, (2) charges externes considérés comme statiques. La répétitivité de la mise en position de la pièce se trouve dans l'unique position d'orientation. Afin d'obtenir la stabilité, la force de serrage doit plaquer la pièce contre tous les éléments d'appuis pendant tout le processus d'usinage. Il conclut que la croissance du nombre de brides peut réduire l'ampleur de la force de serrage, ce qui contribue à réduire la concentration dans les zones de contact.

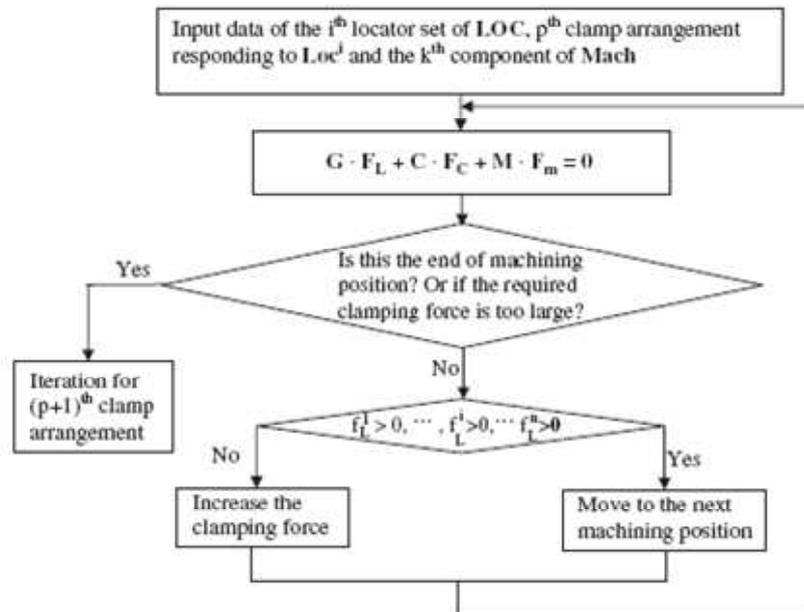


Figure.1.16. Organigramme d'optimisation des forces de bridage. [Wan05]

Tao [Tao99a] a développé aussi une approche simple de détermination du bridage optimal (figure 1.17) pour les pièces de forme arbitraire basée sur la géométrie algorithmique. Il présente un algorithme s'appuyant sur l'équilibre des forces, dans laquelle, et dans la mesure du possible, tous les points de serrage sont automatiquement trouvés. La séquence de serrage est, à son tour, décidée par la zone de serrage faisable où sont situées les brides. Un critère d'équilibre de bridage est également proposé afin que la disposition de bridage puisse être générée.

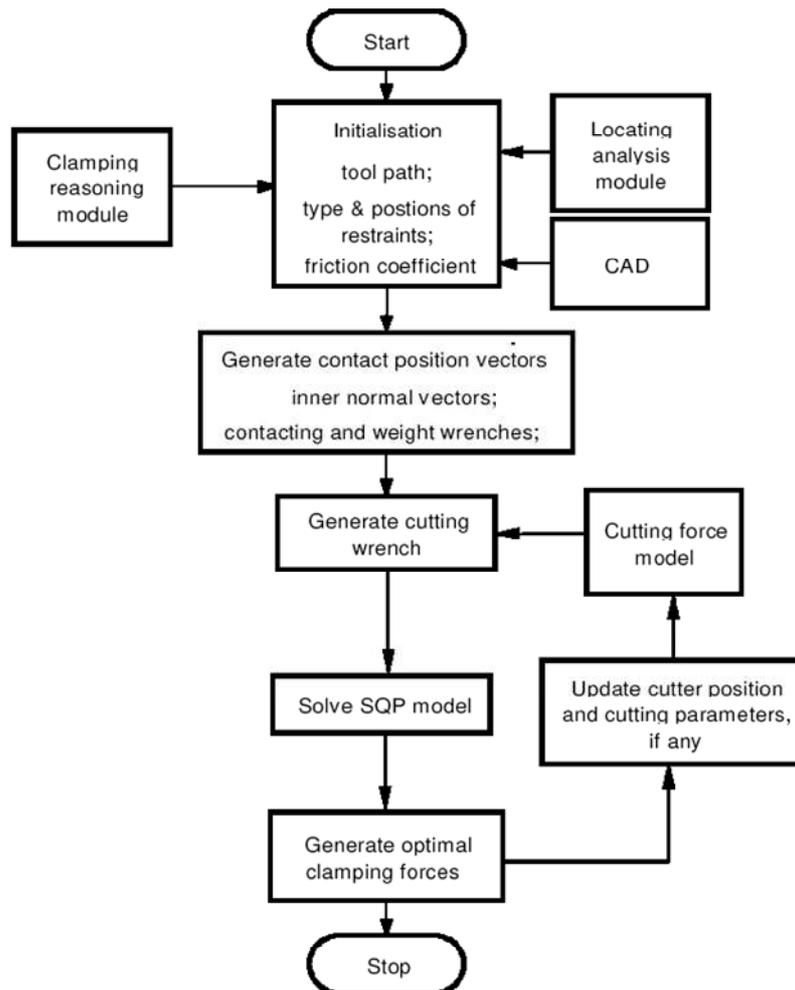


Figure 1.17. Organigramme d'optimisation des forces de bridage dans le contexte de conception automatique de montage. [Tao99a]

2.4.2 Raisonnement à base de règles

La conception assistée par ordinateur à base de connaissance peut aider à optimiser la conception du montage d'usinage. Parmi ceux qui ont utilisé cette méthode on trouve **Jeng [Jen97]** qui propose un système qui permet de concevoir le montage d'usinage pour les pièces prismatiques en petite série avec une approche à base de connaissances, des techniques de l'intelligence artificielle et de la modélisation géométrique avec le système CAO. Il utilise une base de données d'entité pour représenter la pièce, une base de règles pour le raisonnement durant la conception et une base de données d'éléments technologiques pour sélectionner les composants. Les éléments technologiques sont choisis en fonction de la géométrie de la pièce. Le système (figure 1.18) inclut le posage, le bridage et l'assemblage. Les points d'appui sont choisis en fonction de la stabilité, de la précision de la mise en position et de l'accessibilité des outils de coupe aux surfaces usinées. La logique floue est utilisée pour optimiser la mise en position en fonction de la stabilité et la tolérance demandée. Les surfaces d'appui sont choisies en fonction des tolérances

dimensionnelles et géométriques. Les pièces sont classées en famille plate, longue ou cubique. Les points d'appuis secondaires sont placés aussi loin que possible. De préférence la pièce est placée directement sur la plaque de base. C'est un système très simple qui ne prend pas en compte les réalités de production.

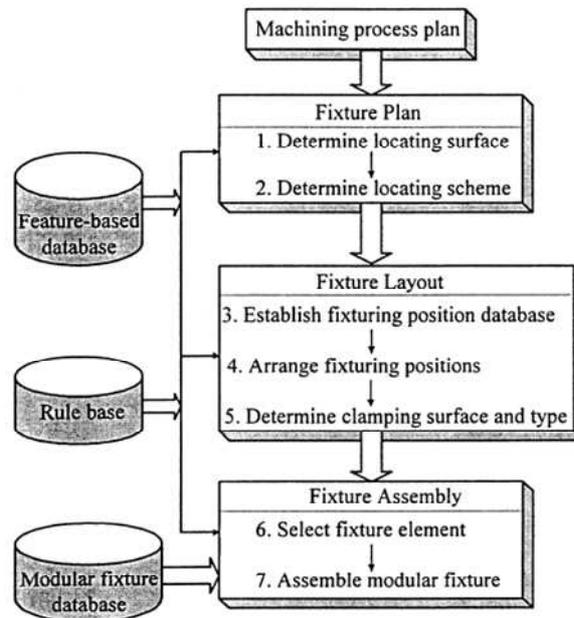


Figure.1.18 Le système de conception de montage proposé par Jeng. [Jen97]

2.4.3 Utilisation des algorithmes génétiques

La conception du montage d'usinage est généralement considérée comme un problème complexe multimodal et discret. Tandis que la plupart des méthodes ont des difficultés à la traiter, les méthodes stochastiques comme les algorithmes génétiques et les réseaux de neurone ont fourni une alternative viable. **Wu** et **Chan [Wu96]** ont appliqué les algorithmes génétiques pour l'optimisation de la conception du montage d'usinage. L'objectif général du système de vérification a été élaboré pour vérifier la validité des différentes configurations du montage d'usinage en analysant différents types de contact du système pièce-montage. Dans cette approche d'optimisation, l'évaluation globale des configurations candidates repose sur l'appréciation des individus. La fonction objective pour l'optimisation de la stabilité est basée sur la minimisation de l'énergie statique et dynamique. Les résultats préliminaires de la mise en œuvre des algorithmes génétiques ont démontré leur robustesse et leur efficacité. Différents paramètres de contrôle sont testés et différents schémas de codage sont introduits.

Les algorithmes génétiques ont été utilisés par **Val [Valo2b]**, **Chouby [Cho05]** et **Krishnakumar [Kri00]** pour optimiser l'emplacement des éléments du montage d'usinage. Pour **Val** la méthode intègre un nombre important de concepts tels que l'encodage, l'augmentation de la mutation qui est le changement des valeurs des

paramètres aléatoirement choisis avec une probabilité très basse, et le partage qui est une technique employée pour imposer la diversité dans la population. C'est-à-dire il aide le procédé à chercher plusieurs solutions optimales globales proches et empêche la convergence aux optimums locaux. **Choubey** considère la fonction objective avec le problème d'équilibre sous l'influence des forces extérieures tandis que **Krishnakumar** s'est intéressé au problème de déformation.

Kaya [Kay06] applique les algorithmes génétiques pour minimiser les erreurs de positionnement par l'optimisation de placement des points d'appuis et de bridage grâce à l'intégration d'un code d'éléments finis pour calculer les valeurs de la fonction objective (figure 1.19). Cette approche est particulièrement adaptée pour les problèmes où il n'existe pas une relation mathématique bien définie entre la fonction objective et les variables de conception. Dans cette étude, le principal obstacle pour l'application de l'algorithme génétique pour l'optimisation de la mise en position est le coût élevé de calcul.

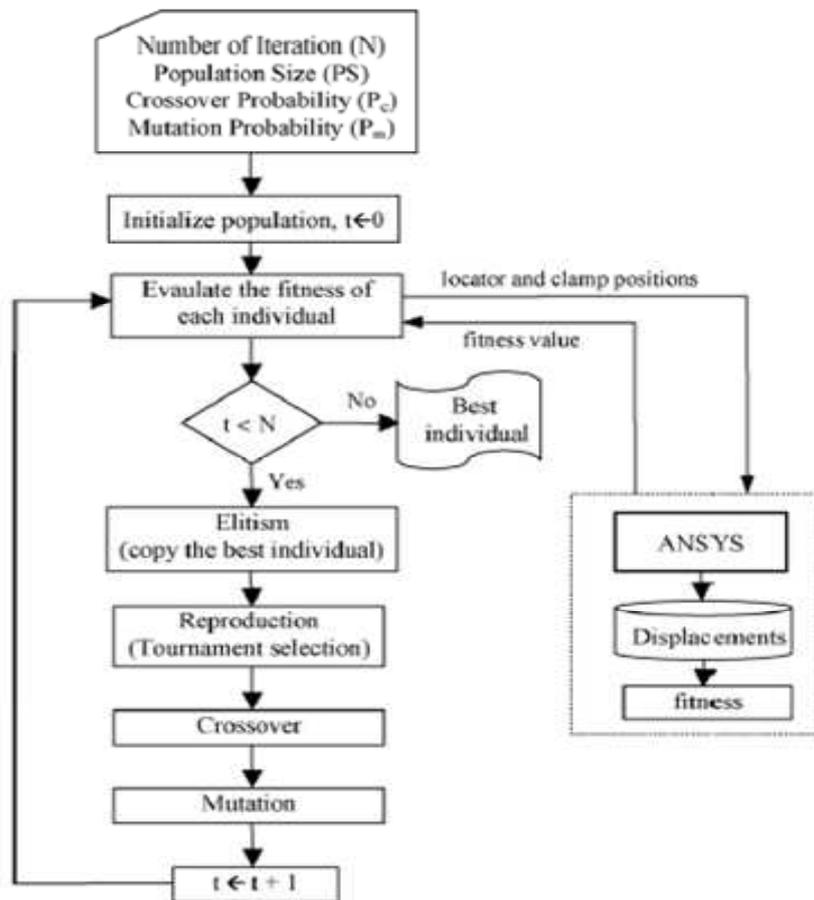


Figure.1.19 Organigramme de la méthodologie proposée avec l'interface ANSYS. [Kay06]

2.4.4 Utilisation des réseaux de neurone

Les algorithmes génétiques et les réseaux de neurone peuvent être combinés dans un système de conception du montage comme a fait **Kumar [Kum99]** où il a utilisé les deux (figure 1.20 et 1.21). La conception du montage dispose d'un grand espace de solution et elle a besoin d'un outil de recherche performant pour évaluer la meilleure solution. Ce processus d'évaluation utilise les règles expertes. Toutefois, si des règles supplémentaires sont introduites, des conflits entre les règles peuvent survenir. Cette difficulté peut être évitée si les réseaux de neurone sont utilisés. En utilisant les algorithmes génétiques, le système développé a la capacité de fournir non seulement une solution optimale, mais un ensemble de solutions non optimales. Cette initiative permettra au concepteur d'avoir des schémas de conception alternatifs si nécessaire. Cette facilité n'est pas disponible lors de l'utilisation des techniques d'optimisation classiques. En utilisant les réseaux de neurone, le système est capable de saisir les relations complexes qui existent entre les divers paramètres.

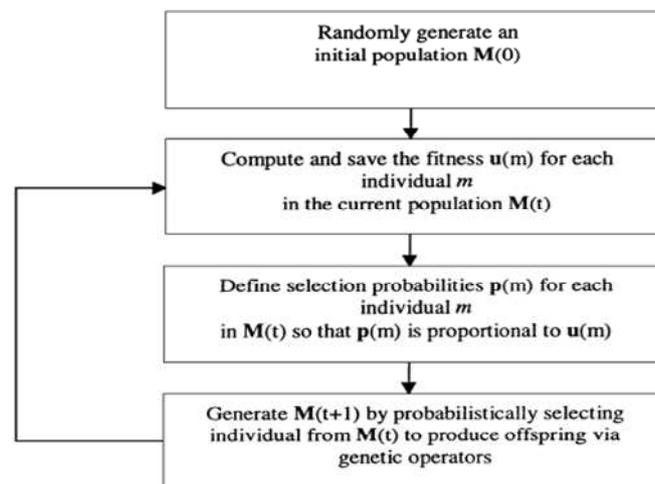


Figure.1.20 Organigramme de l'algorithme génétique. [Kum99]

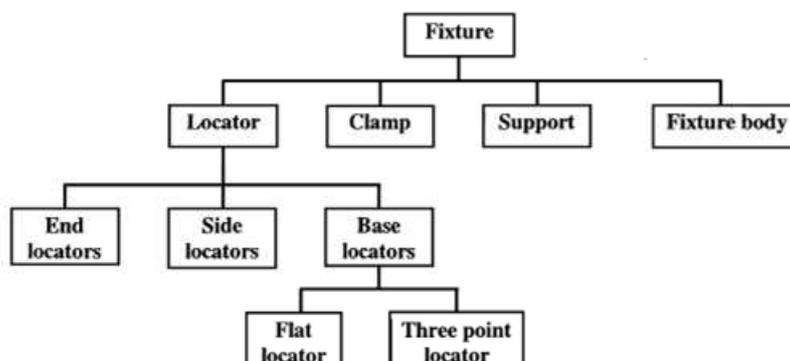


Figure.1.21 L'arbre de variable de gène. [Kum99]

2.4.5 Méthode à base de cas

Dans le concept de raisonnement à base de cas qui est une forme de raisonnement par analogie, l'expérience précédente est stockée dans une bibliothèque de cas. Il consiste à raisonner à partir d'expériences ou de cas rencontrés pour résoudre de nouveaux problèmes. Ce qui revient très souvent à résoudre un problème en se rappelant comment un problème similaire a été résolu. Chaque cas, enregistre au moins deux genres d'information : la description et la solution du problème. Quand le système fait face à un nouveau problème, le cas précédent le plus semblable est recherché et modifié pour satisfaire la nouvelle situation. Dans ce contexte on trouve les travaux de **Ben Khalifa [Ben07]** pour les pièces prismatiques. Son travail consiste à chercher des montages d'usinage convenables aux caractéristiques des entités d'usinage proposées. Il a créé une base contenant plusieurs cas d'entités d'usinages associées à leurs montages, en respectant les caractéristiques de chaque entité, ainsi que les moyens de production existants (figure 1. 22). Les entités d'usinage sont classées suivant leurs types (Rainure, poche, chanfrein...etc.). La base de connaissance est constituée des règles d'usinage permettant de déterminer les détails de fabrication en fonction des caractéristiques des entités d'usinage proposées. La représentation de la pièce est à base d'entités (Figure 1.23).

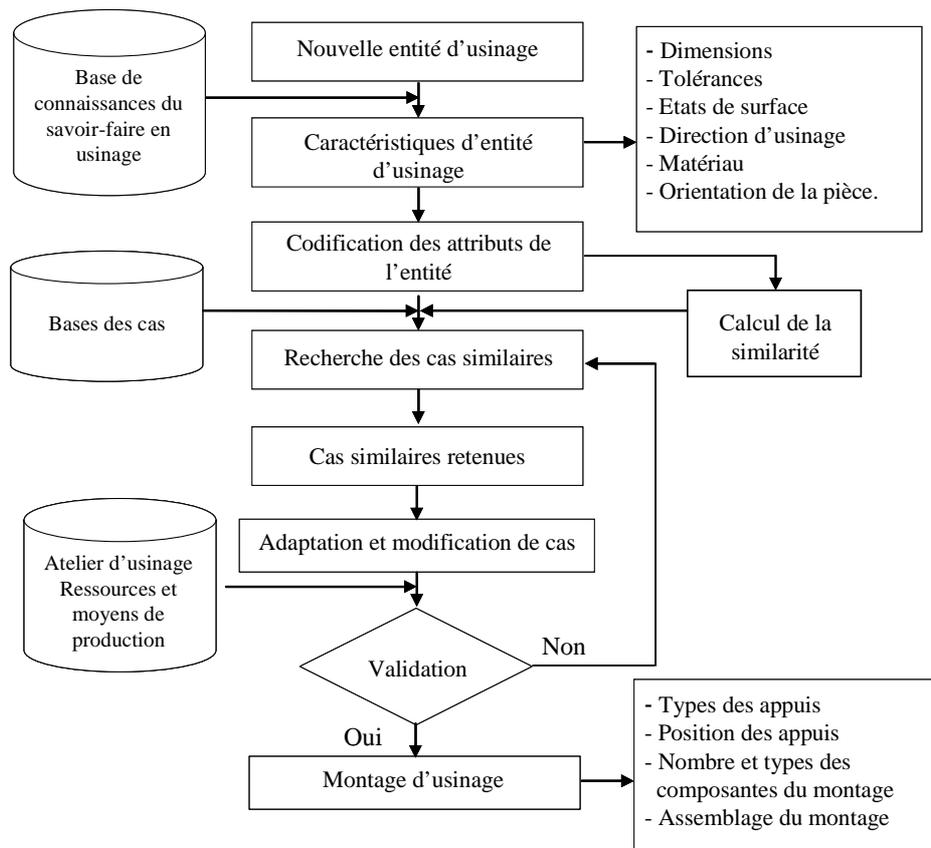


Figure 1.22 Processus de conception du montage d'usinage par le CBR. [Ben00]

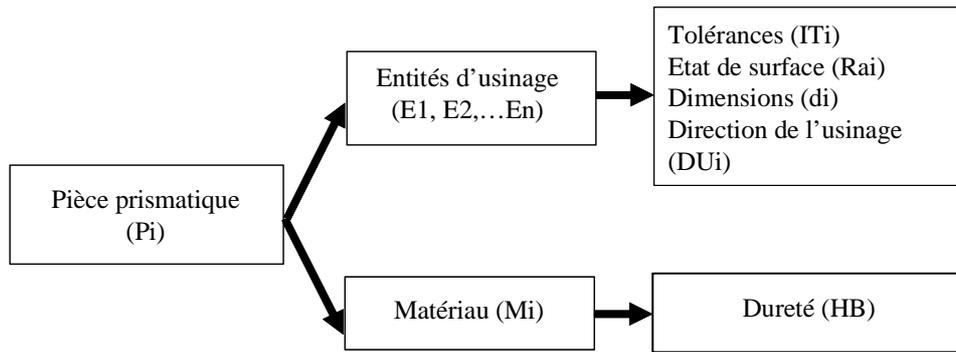


Figure 1.23. Représentation de la pièce. [Ben00]

2.5 Vérification de la conception du montage d'usinage

L'objectif de la vérification est de définir, mesurer et optimiser la qualité du montage d'usinage. Ceci s'ajoute comme une nouvelle étape à la conception du montage d'usinage assistée par ordinateur. C'est une partie intégrée du processus de conception et doit tenir compte de la détection de n'importe quelle interférence qui peut se produire pendant la conception. Pour cela **Kang** dans **[Kano3a]**, **[Kano3b]** et **[Kano3c]** présente des techniques assistées par ordinateur de la conception et de la vérification du montage d'usinage modulaire et spécifique. Les techniques se basent sur les modèles géométriques et cinématiques pour analyser la mise en position, les tolérances, la stabilité de la pièce, l'accessibilité et les forces de bridage minimales. Dans le modèle géométrique, une matrice jacobéenne lie les déplacements de la pièce avec les déplacements de l'appui. Dans le modèle cinématique, une matrice de rigidité du montage lie les forces extérieures avec les déplacements de la pièce et la déformation du montage d'usinage. Le modèle cinématique est créé pour formuler le problème de stabilité avec frottement et trouver, les forces de serrage minimales, les déformations et les réactions d'appui. Les séquences de serrage peuvent également être vérifiées avec cette approche.

Liu [Liu03] réalise la vérification de la conception des montages d'usinage ayant des points d'appui non localisés mais plutôt linéaires ou surfaciques comme par exemple les Vés ou les règles (Figure 1.24). Le contact est modélisé comme une infinité d'appui minuscule. Cette méthode peut être appliquée pour valider la faisabilité d'un montage avec contact ponctuel, linéaire ou surfacique pendant les séquences de bridage et d'usinage. Le système est modélisé comme un problème d'optimisation non linéaire à l'égard des forces de serrage minimales. Cette méthode fournit un moyen simple et efficace pour : (a) vérifier si une configuration de montage est valable à l'égard de la stabilité de la pièce, la stabilité de bridage et l'équilibre totale et (b) déterminer les forces de serrage variable minimum au cours de l'usinage. La stabilité est validée pour tous les chemins d'outil possibles. Elle est validée pour le cas le plus pénalisant, qui est le chemin d'outil avec les forces de coupe agissant contre les brides. Les sorties du modèle sont l'ensemble des forces de bridage variables optimales pour équilibrer les forces d'usinage au cours du temps. Toutes les réactions d'appui doivent rester positives. Ceci signifie que la pièce reste en contact avec ses appuis durant tout le processus d'usinage.

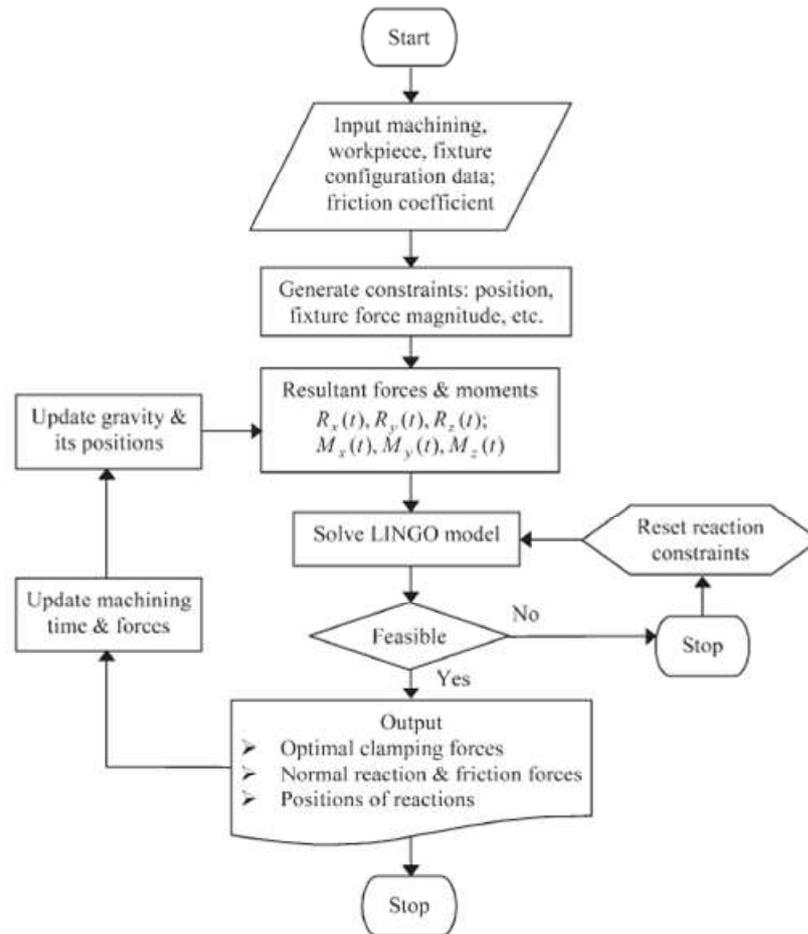


Figure.1.24 Organigramme de vérification de la configuration de montage d'usinage. [Liu03]

2.5.1 Vérification de l'interférence outil-montage d'usinage

La vérification de l'interférence entre les outils de coupe et les éléments du montage d'usinage joue un rôle primordial dans le processus de conception et de vérification du montage d'usinage. Plusieurs méthodes sont utilisées et plusieurs chercheurs se sont intéressés à ce domaine. **Hu [Hu00]** propose un algorithme basé sur l'étude des caractéristiques géométriques des composants du montage d'usinage et de l'outil de coupe. Le modèle des composants est simplifié en un contour 2D avec l'information sur la hauteur des composants qui est développé en fonction du rayon de l'outil. Ils sont représentés géométriquement par un nombre de blocs et de cylindres. La trajectoire d'outil est représentée par un déplacement d'un point pour l'usinage 3 axes, ou un segment de droite pour l'usinage 5 axes. La méthode est différente de celle qui utilise le volume balayé mais elle est plus efficace. L'application de cette méthode réduit considérablement la complexité de calcul pour vérifier rapidement les interférences. Il est bien connu que le déplacement de l'outil de coupe peut être modélisé comme un cylindre dont l'axe est soit parallèle ou perpendiculaire à la table de la machine outil. Seules les segments et les arcs de cercle sont utilisés comme contours des composants sur le plan de projection. On fait un décalage des contours extérieurs des composants vers l'extérieur (figure 1.25).

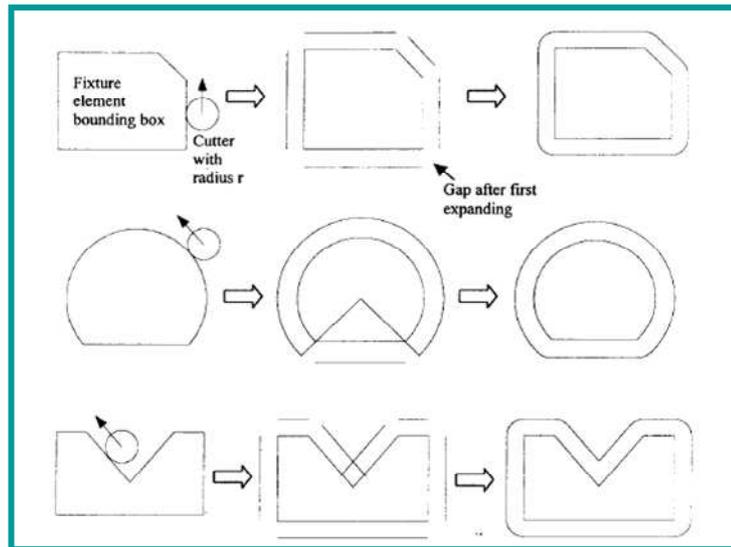


Figure 1.25 Exemples de décalage de contours. [Hu00]

Pour la détection des interférences entre les composants du montage, il suffit de détecter les intersections de deux boucles de contour 2D, qui est similaire à la méthode utilisée dans la détection des interférences entre la trajectoire d'outil et les composants du montage (figure 1.26).

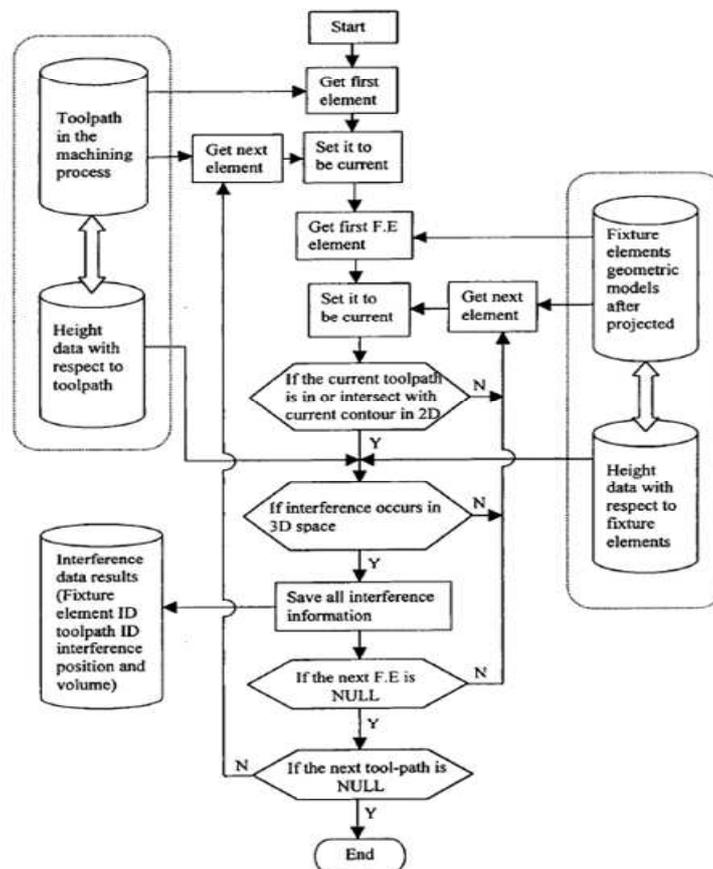


Figure.1.26 Algorithme de vérification d'interférence. [Hu00]

L'intersection entre deux boucles doit être identifiée et une nouvelle boucle présentant le domaine de l'intersection doit être générée. L'algorithme de contrôle (figure 1.27) d'interférence entre l'outil et les composants du montage est tout à fait général. Les résultats peuvent être réinjectés à la fois pour la vérification de la conception et la vérification de la programmation CN.

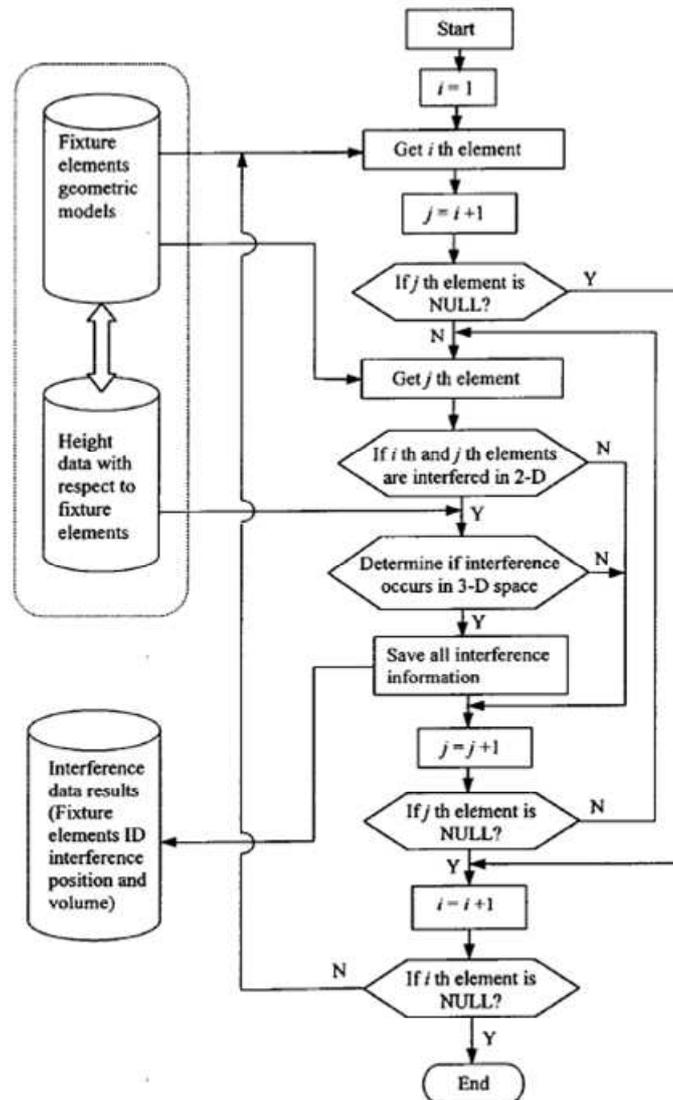


Figure.1.27 Organigramme de détection d'interférence entre l'outil et les éléments de montage.

[Hu00]

D'autres chercheurs utilisent les outils FAO pour la vérification de l'interférence entre la trajectoire d'outil et le montage d'usinage comme **Kow** [Kow00] et **Kumar** [Kum00] qui ont décrit une méthodologie basée sur la CAO et intégrée avec une base de données des éléments technologiques. Leur système vérifie la collision en utilisant la détection d'interférence d'usinage basée sur l'approche du volume de coupe balayé. Ceci est réalisé en intégrant le module de conception du montage avec la planification de la fabrication. La forme de l'outil de coupe est modélisée comme

un cylindre de sorte que la géométrie peut être caractérisée seulement par son diamètre et sa longueur. En extrayant la position de l'outil de coupe et l'information géométrique, le mouvement des silhouettes est constitué par la création d'un mouvement d'une section plane, perpendiculaire à la trajectoire de coupe, à chaque centre de coupe. Puis, un solide balayé le long de la trajectoire d'outil est créé par le mouvement de balayage de sections planes de l'actuel centre de coupe à l'autre centre de la trajectoire. A chaque centre de coupe, un cylindre est créé pour combler tout écart entre les sections de solides balayées. Tous les solides générés sont ensuite fusionnés en un seul solide. La détection de l'interférence entre le solide balayé et le montage est effectuée par la vérification statique de toutes intersections. La collision est implicite par l'existence d'un volume d'intersection. C'est une condition nécessaire et suffisante pour la détection de collision. Tout événement d'interférence peut être rectifié par le module interactif de conception du montage.

2.6 Conception du montage assistée par ordinateur

Beaucoup de travaux s'intéressent à la conception du montage d'usinage assistée par ordinateur. Parmi lesquels on trouve les travaux de **Dai [Dai97]**, **Rong [Ron97]**, **Ma [Ma98]** et **Ma [Ma99]**. Pour **Dai** il décrit une méthode pour créer paramétriquement la base de données des éléments technologiques en modélisant les sous ensembles pour faciliter l'assemblage du montage. Une méthodologie de vérification d'interférence est intégrée dans la phase de conception. Le système utilise une base de connaissance, et d'interface avec l'environnement CAO (Unigraphics-II) pour la modélisation de la pièce. Il est composé de 4 modules (figure 1.28). Le système place les points d'appui pour l'appui prépondérant, secondaire et tertiaire, puis il forme les tours de bridage.

Quand à **Rong** il présente un système de conception automatique de montages d'usinage (figure 1.29) où l'utilisateur, via une interface interactive choisi et donne toutes les informations nécessaires : 1) les surfaces d'appui sont classées en trois catégories principales : plan, trou, et profil externe; 2) les méthodes principales de mise en position pour les différentes surfaces sont classées en fonction du types d'appui correspondants; et 3) les variations de mise en position pour chaque méthode principale de mise en position sont examinées. Les modes de bridage pris en compte sont le mode bride et le mode étau.

Ma [Ma98] développe un algorithme pour choisir les éléments technologiques du montage, rechercher les relations d'assemblage, calculer les positions et les orientations des éléments lorsqu'ils sont montés sur la plaque de base. Ce travail est essentiellement pour les pièces prismatiques qui sont positionnées directement sur la plaque de base.

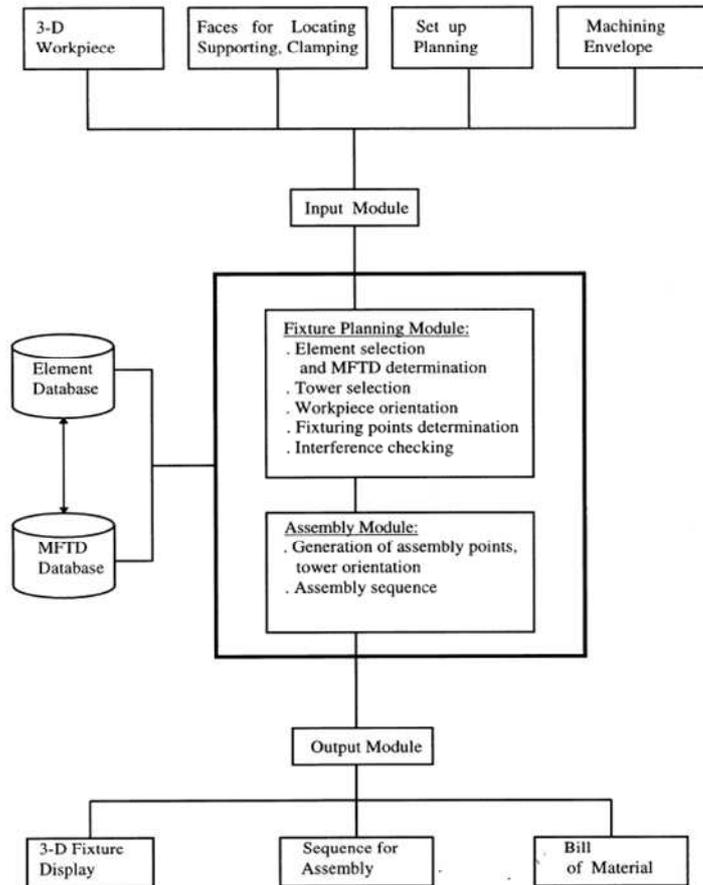


Figure 1.28 Organigramme du système proposé. [Dai97]

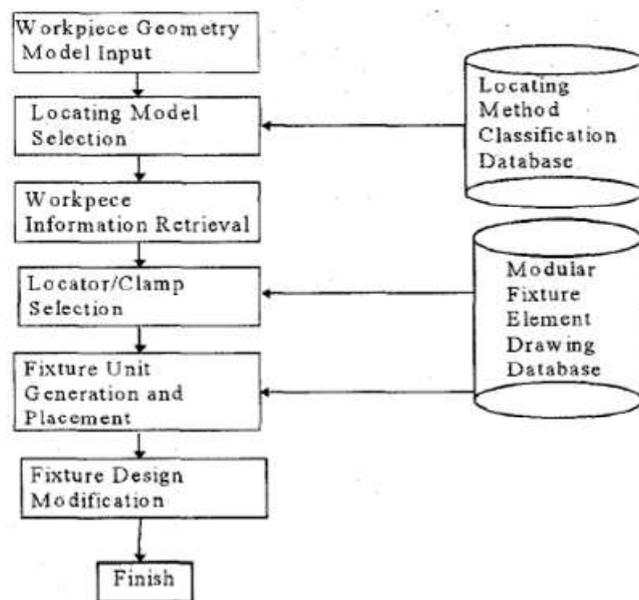


Figure 1.29 Système de conception du montage. [Ron97]

Ma dans [Ma99], a amélioré le système à base d'entités (figure 1.30) pour les pièces prismatiques dans lequel les surfaces et les points d'appui sont automatiquement déterminés en fonction de la géométrie de la pièce et des informations issues de la sous-phase. L'accessibilité des surfaces, la qualité des entités d'usinage et la stabilité de la pièce sont les principaux paramètres pris en considération. La première tâche est de déterminer automatiquement la direction de l'appui prépondérant et de sélectionner les points et les surfaces d'appui et de bridage optimal pour le posage choisi. Pour vérifier l'accessibilité dans le sens normal à la surface, un volume virtuel est généré par extrusion dans la direction normale de la surface. Les données technologiques, telles que le mode de bridage, les dimensions des éléments technologiques son pris en compte. Les surfaces de posage sont établies pour la planification verticale et horizontale.

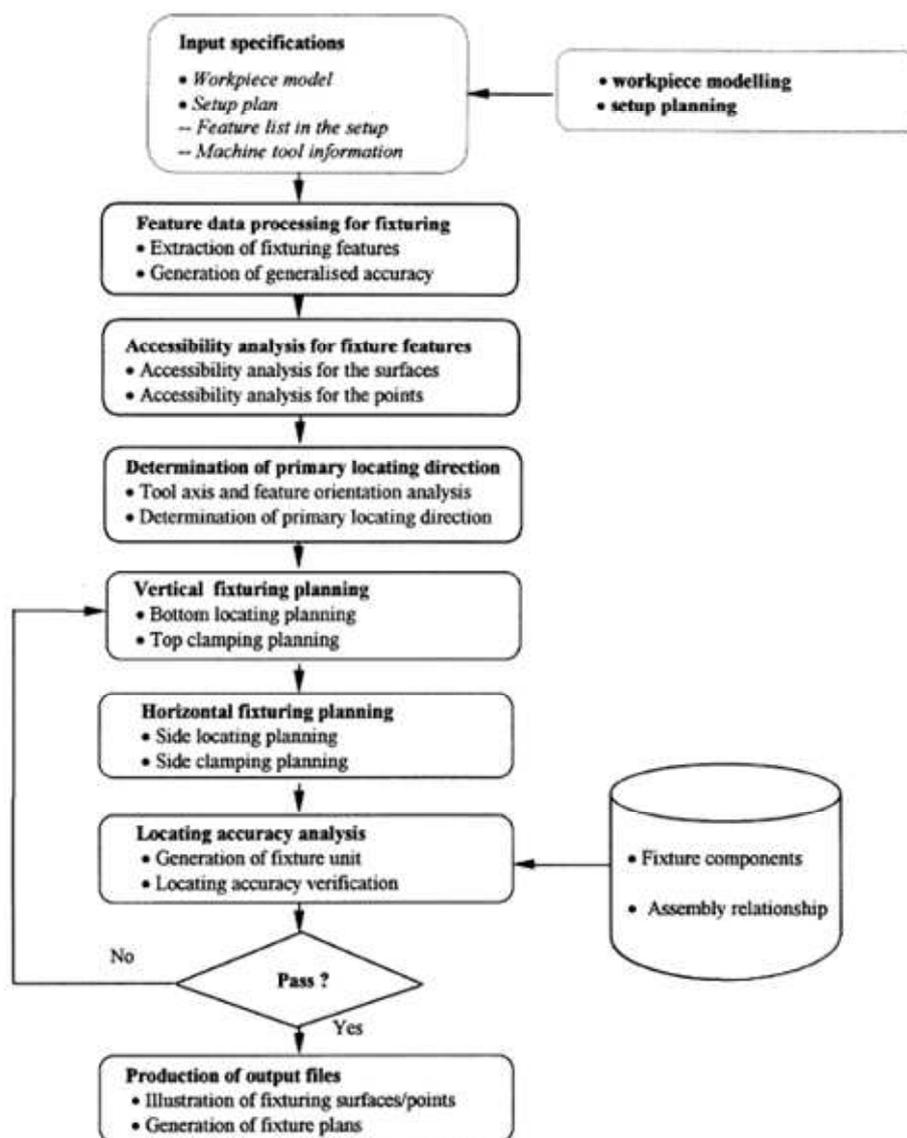


Figure 1.30 L'organigramme de la planification de montage. [Ma99]

Echave [Ech99] automatise le posage de type 3-2-1 et le bridage de type étau pour l'usinage sur machines CN 3 axes à base d'entités et de raisonnements géométriques. Seuls les montages modulaires sont étudiés. Il prend en compte les contraintes spatiales de la machine outil et des outils de coupe. Le posage est automatiquement planifié à base des volumes à enlever dans chaque orientation de la pièce. Les techniques de vérification utilisent les informations sur les entités pour estimer les collisions entre le montage d'usinage et les volumes à enlever. Le système comprend tous les tâches principales d'une sous-phase. L'intervention de l'utilisateur est limitée dans la plupart des cas pour confirmer ou approuver les résultats générés par le système. Le système utilise la représentation paramétrique des éléments technologiques et les méthodes associées pour automatiser leurs positionnements. Dans l'étude de la sous-phase, le nombre de changement d'outil est minimisé.

Zhang [Zha05] présente un algorithme de raisonnement pour la mise en position des pièces prismatiques basé sur le principe 3-2-1 (figure 1.31) et une approche de génération automatique de prise de pièce basée sur les règles expertes d'usinage, le respect de la tolérance, les coûts de fabrication et les contraintes de conception du montage d'usinage. Son but est de s'assurer que la prise de pièce générée pour l'usinage de la pièce peut avoir une solution du montage d'usinage. Le système permet à l'utilisateur de traiter la prise de pièce et la conception du montage d'usinage simultanément.

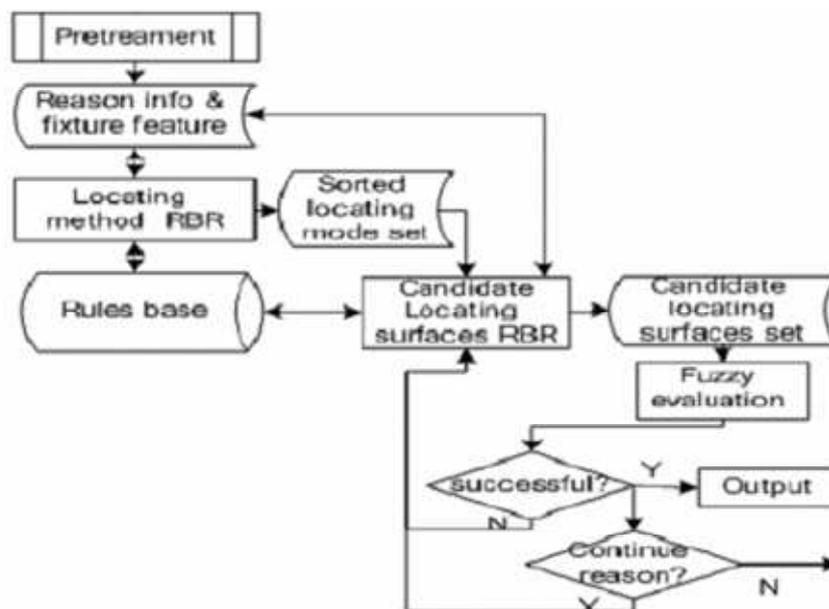


Figure 1.31 Vue d'ensemble du schéma de raisonnement de mise en position. [Zha05]

2.7 Conclusion

D'après ces études on constate que la conception des montages d'usinage implique plusieurs méthodes et domaines. Beaucoup de méthodologies ont été développées pour la conception et pour la détermination des configurations optimales de montages d'usinage. Cependant, il manque une directive, qui peut aider l'utilisateur à choisir la méthode appropriée avec des outils correspondants pour résoudre divers problèmes à différentes phases de conception.

La plupart de ces travaux s'intéressent à des familles de pièces bien définies comme les pièces prismatiques [jen97], [Che02] ou cylindriques [Sano1] et peu de travaux s'intéressent aux pièces de formes arbitraires ou de formes complexes. Beaucoup d'entre eux traitent une partie des problèmes locaux rencontrés dans la conception des montages d'usinage comme les problèmes de contact [Sato4], [Wano2a] les problèmes de serrage optimal [Lio1b], [Maro2b], [Tao99b] les problèmes de stabilité [Kano3c], [Liao0], [Huro2a] les problèmes de qualité [Payoo],..., etc. Et peu de travaux prennent la conception du montage d'usinage dans sa globalité.

On remarque aussi que la plupart de ces travaux considèrent que toutes les informations liées à la sous-phase sont connues au moment de la conception du montage d'usinage, ce qui nous oblige à étudier la conception du montage d'usinage simultanément avec les autres tâches de la sous-phase.

Notre approche vise à traiter le problème de la conception du montage d'usinage pour les pièces de complexité moyenne dans sa globalité en se basant sur des estimations et sur les informations issues de l'architecture de la gamme d'usinage. Il s'agit donc d'une approche intégrée pour la conception simultanée de la gamme d'usinage et du montage d'usinage associé. Cette approche intègre de nombreuses méthodes existantes pour résoudre chaque sous problème de manière indépendante [Bio1]. Une stratégie à quatre niveaux : élaboration de la sous-phase comportant un modèle prise de pièce avec indicateurs, choix technologique des éléments constituant le montage d'usinage qui sont en contact avec la pièce, placement optimal de ces éléments en intégrant les contraintes d'accessibilité de qualité et de comportement mécanique et enfin définition des liaisons entre ces éléments et la plaque de base

CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE DE CONCEPTION

1 Introduction

Dans ce deuxième chapitre, nous définissons la méthodologie de conception du montage d'usinage modulaire pour le fraisage. Nous mettons en évidence une stratégie de conception du montage d'usinage à partir des données issues de l'architecture de la gamme d'usinage. Nous expliquons comment la conception du montage d'usinage peut se faire sans perturber les autres activités associées à la sous phase et comment on va résoudre le problème de la conception du montage d'usinage de manière découplée des autres actions effectuées durant la conception de la sous phase sans que la solution retenue ne soit remise en cause par la suite.

2 Industrialisation des produits mécaniques

L'industrialisation des produits mécaniques est une étape fondamentale dans le processus de développement. Cette étape intervient après la phase de conception du produit et elle a pour but d'étudier la faisabilité de la fabrication des produits, compte tenu des données commerciales et des objectifs de la politique industrielle de l'entreprise. L'étude de développement et d'industrialisation doit être menée conjointement et en constante collaboration entre le bureau d'étude, le bureau des méthodes et la production.

2.1 Les différentes étapes d'industrialisation des produits mécaniques

L'industrialisation d'un produit mécanique fait intervenir plusieurs acteurs (figure 2.1) et services au sein d'une entreprise de production mécanique intervenant d'une manière ou d'une autre sur le produit. Le service marketing étudie les marchés, le service commercial reçoit les commandes et définit les besoins. Le cahier des charges, qui définit les fonctions que doit assurer le produit est transmis au bureau d'études (BE) chargé de concevoir le produit physique. Les systèmes de CAO, le calcul de structures, la simulation sont les outils employés pour définir les formes et les éléments du produit répondant aux fonctionnalités voulues. Le bureau des méthodes (BM) travaille en même temps. Il prévoit le fonctionnement technique de la production et prépare les documents nécessaires à son bon déroulement. La gestion de production (GP) organise les moyens à mettre en œuvre pour assurer pleinement la production. L'atelier réalise alors le produit en suivant les indications techniques fournies par le bureau des méthodes et les indications d'organisation provenant de la gestion de la production. Fini et assemblé, le produit peut ensuite être livré par le service expédition.

2.2 Les principales tâches du bureau des méthodes

On trouve quatre tâches principales dans le travail du spécialiste des méthodes : étude de la fabricabilité de la pièce, conception de la gamme d'usinage, proposition d'un devis de fabrication et préparation des documents atelier.

2.2.1 Etude de la fabricabilité de la pièce

Il s'agit d'étudier l'état courant et les informations de la pièce provenant du bureau d'études pour en déterminer les difficultés de fabrication et pour essayer de fabriquer la pièce à un coût économiquement raisonnable. Il s'agit aussi de voir si on peut réaliser la pièce par les moyens de production disponibles ou s'il faut recourir à la sous-traitance. Dans la plupart des cas le montage d'usinage constitue une contrainte du non fabricabilité de la pièce.

2.2.2 Proposition d'un devis de fabrication de la pièce

La proposition de devis est la réponse attendue à l'appel d'offre. Après avoir construit l'architecture de la gamme d'usinage, le spécialiste du devis chiffre les différents temps de travail et donc indirectement le coût de la production. Il faut que l'approche de génération de la gamme d'usinage définie permette de proposer des devis le plus

rapidement possible à cause de la concurrence. La validation rapide de l'existence d'une solution de montage d'usinage contribue fortement à la proposition d'un devis fidèle aux coûts réels.

2.2.3 Conception de la gamme d'usinage et préparation des documents atelier

Ce travail intervient une fois que la commande est ferme. Concevoir une gamme d'usinage d'une pièce consiste à proposer la suite des actions à entreprendre pour passer de la pièce brute à la pièce finie d'usinage, à partir de la définition de la pièce que l'on veut obtenir, de la technique d'obtention de la pièce brute, du contexte de production, des moyens de production disponibles, des aspects liés à la production, de la prise de pièce, du montage d'usinage, des cadences et de la série à réaliser.

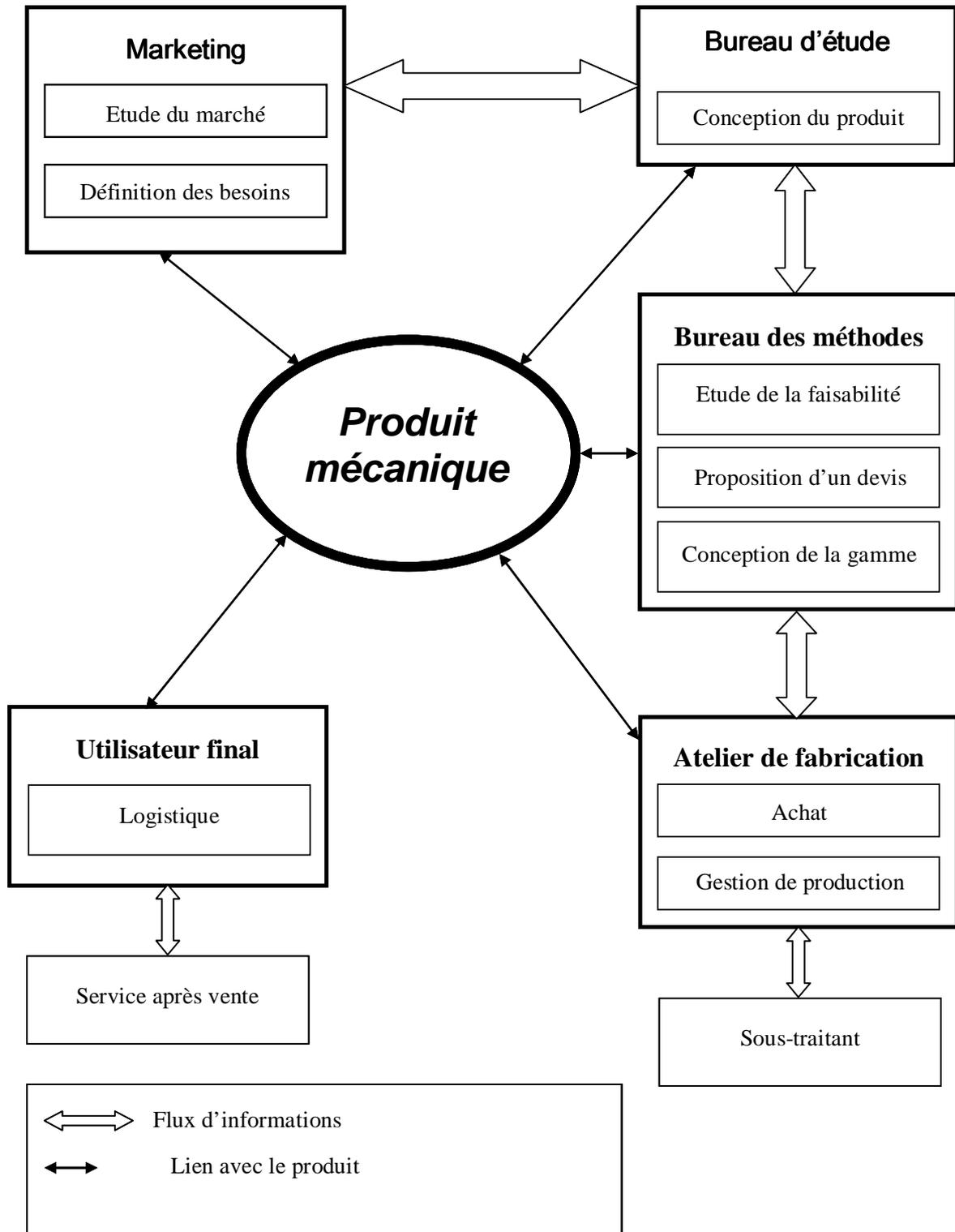


Figure 2.1 Les différents acteurs qui agissent dans l'industrialisation des produits mécaniques

2.2.4 Conception de l'architecture de la gamme d'usinage

La conception de gammes d'usinage [GAM90] consiste à rechercher l'ensemble des opérations d'usinage puis à organiser ces opérations en sous-phases avec le choix des prises de pièce et des machines-outils. La disposition de ces éléments permet d'estimer le coût de fabrication de l'ensemble des pièces de la série. Chaque sous-phase est ensuite étudiée afin de déterminer ces paramètres avec précision.

Les données ou les informations nécessaires pour établir une gamme d'usinage sont nombreuses et variées. On peut les classer comme suit :

2.2.4.1 Les données relatives à la pièce.

Il s'agit généralement d'un modèle représentant la pièce finie d'usinage ou d'un modèle CAO de cette pièce composée de la définition géométrique (modèle 2D, surfacique, modèle 3D) et d'informations techniques complémentaires sous forme de texte qui sont :

5. La qualité des différentes surfaces de la pièce et leur positionnement,
6. Le matériau constituant la pièce,
7. La présence éventuelle de traitement thermique ou de surface,
8. Le procédé d'obtention de la pièce brute.

2.2.4.2 Les données ou les contraintes économiques.

Il s'agit du nombre de pièce à fabriquer, la taille des lots et les délais de fabrication.

2.2.4.3 Les données technologiques ou les ressources à prendre en compte.

Il s'agit des moyens de production, c'est-à-dire les machines-outils avec leurs possibilités (type, puissance, nombre d'axes, courses, qualité garantie pour la série de pièces, capacité ...etc.), les types d'outils coupants (volume de copeau maximal, direction de travail) et leurs attachements possibles, les composants pour le posage et le bridage (table, éléments standards).

Les différentes tâches réalisées par le gammiste (figure 2.2) pendant la conception de la gamme d'usinage sont assez délicates et nécessitent une bonne connaissance des moyens disponibles (les machines-outils et les outils) et les actions à réaliser sur la pièce (opérations d'usinage, choix de prise de pièce, placement des traitements thermiques...). Son principal travail consiste à prédire le processus d'usinage avec suffisamment de fiabilité de manière à garantir l'usinage de la pièce en respectant la qualité et en minimisant les coûts et les temps d'usinage.

La conception de gammes d'usinage se fait en trois temps. Dans un premier temps, le problème est construit en définissant la pièce à usiner à l'aide d'entités d'usinage, en reconnaissant les entités de prise de pièce et en choisissant les ressources disponibles. Dans un deuxième temps, les architectures de gammes sont construites. Il s'agit de concevoir les sous-phases et d'allouer les ressources correspondantes sans déterminer finement tous les paramètres. Ensuite dans un troisième temps, une architecture de gammes est retenue et les différentes sous-phases sont étudiées en détail.

Cette stratégie permet d'estimer le devis de la production plus rapidement. En effet, les architectures de gammes contiennent toutes les informations permettant d'estimer le coût de la pièce et les ressources allouées avec une précision suffisante pour répondre à un appel d'offre. De plus, l'ensemble des gammes alternatives est construit ce qui permet de s'adapter précisément à la charge du site de production.

Il faut raisonner de manière suffisamment indépendante des ressources réelles qui vont être utilisées pour laisser le maximum de marge de manœuvre à la production qui pourra ainsi choisir les ressources parmi celles disponibles à l'instant de la production. La difficulté de cette étape provient donc du fait qu'il faut, à la fois, être précis pour que la gamme représente réellement la production qui va être mise en place, et être synthétique pour ne pas contraindre inutilement la production. Il s'agit donc de ne prendre à cette étape que les décisions strictement nécessaires pour la fabrication de la pièce.

Cependant cette stratégie n'est intéressante que si les architectures de gammes ne sont pas remises en cause lors de l'étude des sous-phases. Il s'agit donc de prendre en considération toutes les difficultés d'usinage et de gérer toutes les contraintes en conception d'architectures de gammes. L'étude de sous-phases consiste essentiellement à affiner les choix et à calculer les valeurs des différents paramètres en vue de lancer la production. L'existence d'une solution pertinente réaliste mais pas forcément optimale est assurée par cette stratégie de conception des architectures de gammes d'usinage.

Les données de sortie (l'architecture de gammes d'usinage) sont les sous phases d'usinage qui comprennent :

- Type de Machine à utiliser,
- Prises de pièce,
- Liste d'outils,
- Liste des opérations d'usinage,
- Temps et coûts, devis.

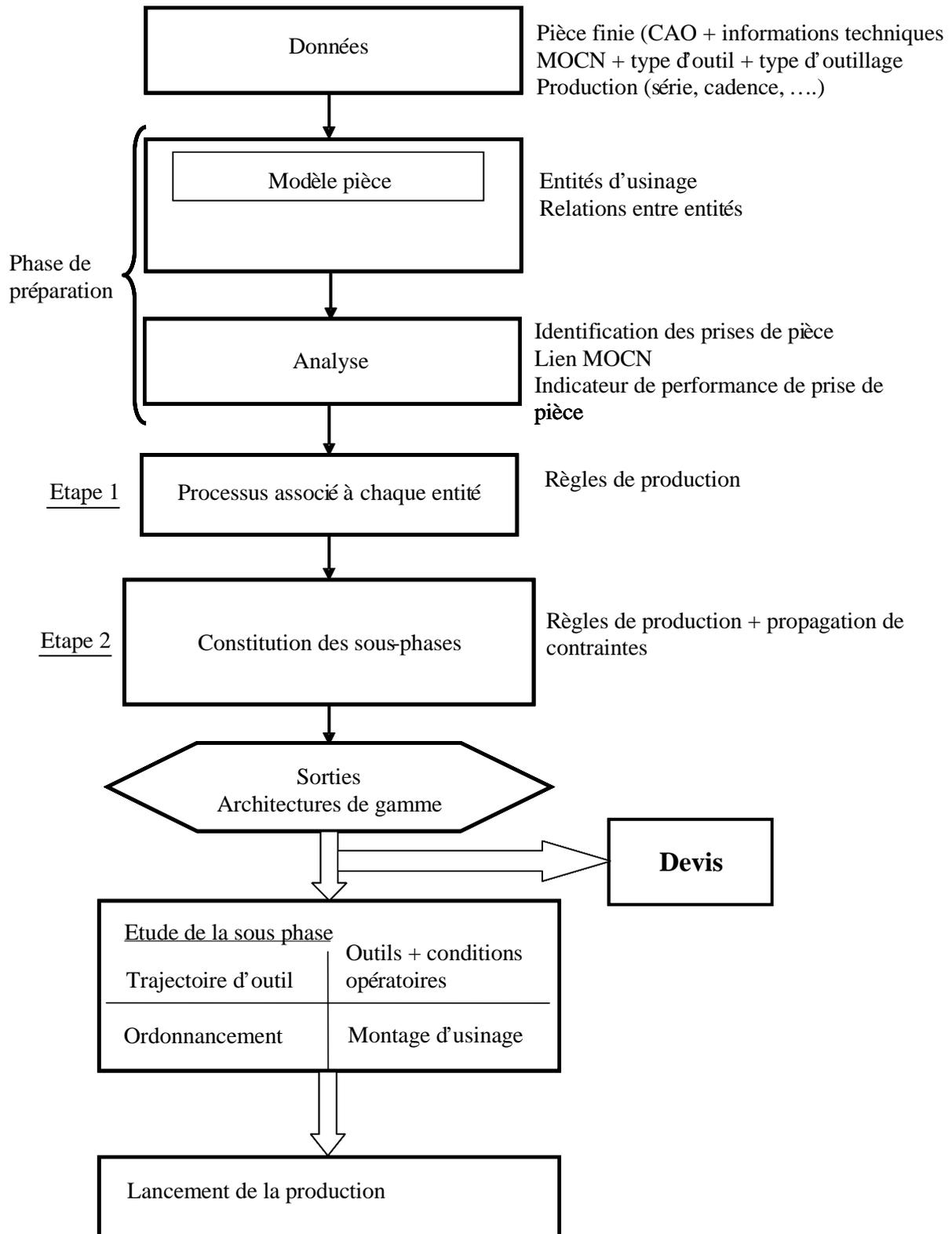


Figure 2.2 La conception de la gamme d'usinage

2.2.4.4 Etude de chaque sous-phase

Définition d'une sous-phase : une sous-phase d'usinage est un processus d'usinage réalisé sans démontage de la pièce, ni transfert du couple (pièce, montage d'usinage) d'une broche machine à une autre [Par95].

Une sous-phase représente l'enchaînement des opérations d'usinage réalisées sur une machine-outil donnée avec une prise de pièce identique pendant toute la durée de l'usinage correspondant à la sous-phase.

Une fois une architecture de gamme d'usinage retenue, il s'agit de préciser les outils de coupe, d'évaluer les efforts de coupe, de calculer les conditions de coupe et les trajectoires des outils, de concevoir le montage d'usinage, d'ordonner les opérations d'usinage au sein de la sous-phase et de créer les programmes de commande numérique. Toutes ces tâches doivent coopérer en même temps pendant l'étude de la sous phase.

La solution adoptée pour chaque sous-phase est validée en effectuant un calcul d'équilibre du système pièce-montage pour valider la stabilité de la pièce au cours de l'usinage, un calcul des déplacements de la pièce sur ses appuis pour valider la qualité des entités d'usinage et enfin une vérification de l'interférence entre l'outil et le montage d'usinage pour valider la non collision entre les deux. La qualité des entités d'usinage et la stabilité de la pièce au cours de l'usinage doivent être garanties. Le système de bridage doit bien tenir compte des trajectoires d'outil pour valider la solution proposé. La solution proposée doit être acceptable et doit éviter les allers et retours habituels entre le concepteur du montage d'usinage et celui qui étudie les trajectoires des outils à l'aide d'outils FAO.

2.2.4.5 Préparation des outils et outillage spécial

L'étude et la réalisation des outillages comprend :

Les outils de coupe : au sein de la sous-phase on doit déterminer les outils nécessaires qui doivent être disponibles au moment de la production et les ranger dans le magasin de la machine-outil suivant l'ordre de déroulement des opérations et des séquences du programme de la commande numérique.

Les outils de contrôle : ils peuvent être standards (pied à coulisse, palmaire,...etc.) ou spéciaux (montage de contrôle spécial). On doit préciser et justifier le choix des moyens de mesure. Le contrôle permet de s'assurer du respect des spécifications chiffrées contenues dans le cahier des charges. La valeur réelle de la grandeur de l'élément est comprise entre deux valeurs limites (maxi et mini).

Les montages d'usinage : pour chaque sous-phase on doit étudier et réaliser le montage d'usinage qui répond à la prise de pièce de cette sous-phase. Cette étape est très importante car un montage mal conçu peut affecter la qualité de la pièce et aller jusqu'au rebut de cette dernière. Des incidents peuvent arriver sur le poste de travail à cause d'un montage d'usinage mal conçu et qui peuvent aller jusqu'à causer des accidents grave à l'opérateur.

2.2.4.6 Lancement de la production

Après avoir configuré l'unité de production, configuré l'environnement de production et validé la configuration des moyens on peut lancer la production.

Au moment du lancement de la production il faut que tout soit à la disposition de l'opérateur qui va exécuter les travaux d'usinage sur machine-outil à savoir :

1) Un dossier technique de fabrication. Il comporte les fiches de phase, les cotations de fabrication, les fiches outils, les fiches porte-pièce, les programmes CN et les protocoles de mesure.

2) Les moyens matériels de production et de mesure. Il s'agit de la machine-outil, l'accès à tout ou partie des outils et porte-outils du secteur, le porte-pièce prêt à l'utilisation, les pièces brutes, le protocole de mise en œuvre des moyens et les consignes de gestion et d'organisation du secteur de production.

2.3 L'interaction entre les différentes tâches de conception d'une sous-phase d'usinage

Les différentes tâches d'une sous-phase sont étudiées simultanément. Jusqu'à présent il est impensable d'étudier où de concevoir une sous-phase sans la disponibilité et la détermination précises de toutes les données propre à chaque tâche qui inter-réagissent entre elles pour valider la sous-phase. Dans cette étude on cherche à bien comprendre les liens et l'interaction entre les différentes tâches de conception d'une sous-phase d'usinage, l'action de chaque tâche sur les autres, le degré de dépendance d'une tâche par rapport à une autre et l'influence des grandeurs des paramètres qui agissent au sein de la sous-phase. Cela va nous permettre de bien positionner les différentes tâches de la sous-phase par rapport à la conception du montage d'usinage afin de trouver une solution à cette dernière en fonction des données issues de l'architecture de la gamme d'usinage et qui sont disponibles à notre niveau.

2.3.1 Les différentes tâches à réaliser dans une sous-phase

L'étude de la sous-phase consiste essentiellement à affiner les choix et à calculer les valeurs des différents paramètres des tâches à réaliser en vue de lancer la production.

Les différentes tâches à réaliser dans une sous-phase sont :

- le choix des outils de coupe,
- le calcul des paramètres de coupe
- l'ordonnancement des opérations d'usinage,
- la conception du montage d'usinage,
- la détermination des trajectoires d'outils et leurs simulations,
- la génération des programmes de commande numérique,
- le contrôle de la pièce.

Toutes ces tâches doivent coopérer simultanément dans l'étude d'une sous-phase. Toutes les informations sont gérées en parallèle à chaque instant. La solution adoptée pour chaque sous-phase est validée en respectant la qualité de la pièce après usinage, en garantissant la stabilité de la pièce pendant toute la durée de l'usinage et en effectuant un calcul précis des risques de collision entre l'outil, la pièce et les éléments du montage d'usinage avec une vérification du respect des courses de la machine outil.

2.3.1.1 Choix des outils de coupe et détermination des conditions de coupe

- Choix des outils de coupe

Le choix précis des outils de coupe est effectué lors de l'étude de la sous-phase. On choisit les outils pour l'ensemble des opérations de la sous-phase parmi les outils existants. L'outil est choisi en fonction de son utilisation c'est-à-dire de la forme géométrique de l'entité d'usinage à réaliser (rainure, marche, profil quelconque) (figure 2.3), de l'opération d'usinage et de son type (ébauche, 1/2 finition ou finition), du porte outil à utiliser, du matériau de la pièce à usiner, de la trajectoire à suivre, de sa longueur de coupe, de sa disponibilité et de la machine-outil utilisée car chaque machine a une gamme d'outils qui se monte sur elle.

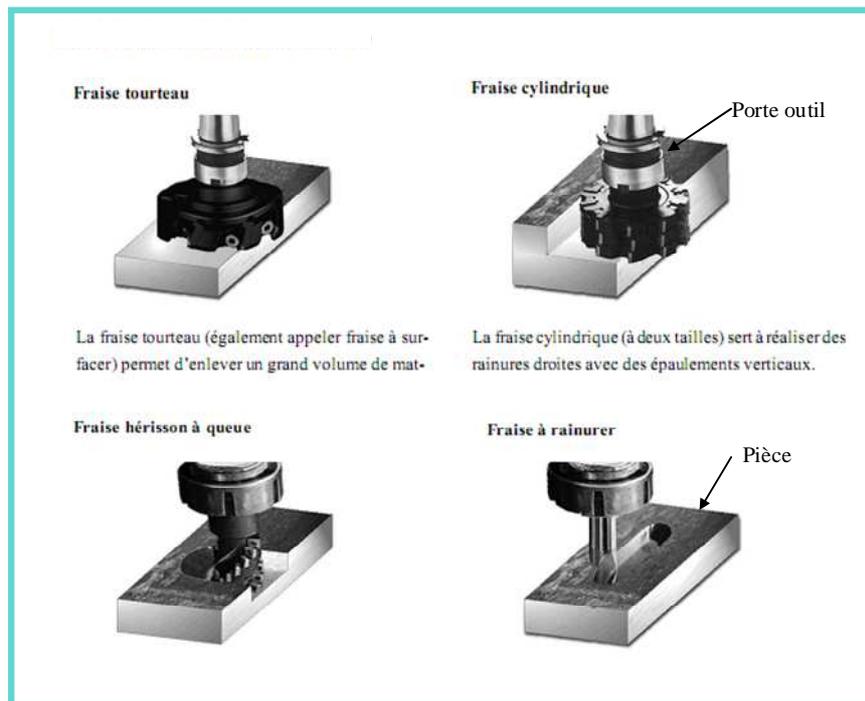


Figure 2.3 Différents outils pour différente entité d'usinage

Selon la stratégie adoptée, le nombre d'outils peut être minimisé afin qu'il couvre le maximum d'opérations possible pour diminuer le nombre de changement d'outils et ainsi diminuer le temps non productif. Il est choisi le plus court possible afin d'augmenter la rigidité et diminuer les vibrations pendant l'usinage. Il est choisi aussi

en fonction de la qualité d'usinage à obtenir. Pour les opérations d'ébauche on choisit des outils qui enlèvent le maximum de matière et qui supportent les conditions de travail les plus sévères.

- Détermination des conditions de coupe

Les conditions de coupe sont calculées après avoir déterminé le type d'outil coupant, son matériau, ses dimensions, la puissance à la broche machine. A partir de ces données la vitesse d'avance et la fréquence de rotation de la broche peuvent être calculées. Les efforts de coupe sont calculables pendant l'étude de chaque sous-phase pour chaque opération d'usinage. La détermination des conditions de coupe permet d'évaluer les efforts de coupe appliqués sur la pièce ainsi que la puissance absorbée par la machine.

2.3.1.2 Ordonnements des opérations d'usinage

Les opérations d'usinage compatibles sont regroupées dans une même sous-phase. Les usinages sont réalisés de manière séquentielle avec des outils différents qui sont choisis en amont de l'ordonnement des opérations d'usinage. Ordonner les opérations d'usinage au sein d'une sous-phase revient à classer leurs actions dans le temps : une opération d'usinage a lieu avant une autre. Il revient aussi indirectement à classer l'ordre d'utilisation des outils de coupe et ainsi organiser leurs changements à partir du magasin d'outil de la machine. L'ordre des opérations n'est pas pris au hasard mais il doit répondre à des impératifs que l'on désigne sous le nom de contraintes qui sont d'ordre : technologiques, géométriques et dimensionnelles, économiques. Il y a des stratégies où l'ordonnement des opérations d'usinage est planifié de telle sorte qu'elle optimise les séquences d'usinage en utilisant le minimum d'outils pour effectuer le maximum d'opération possible. L'ordonnement des opérations d'usinage influe sur les trajectoires des outils de coupe et sur leur optimisation ainsi que sur le temps d'usinage (figure 2.4). Pour cet exemple si on ordonne les opérations dans l'ordre 1-3-2-4 on évite le saut de bride et ainsi on évite de loin les collisions outil-bride. Les opérations sont toujours classées dans l'ordre, opérations d'ébauche puis opérations de demi finition et enfin opérations de finition.

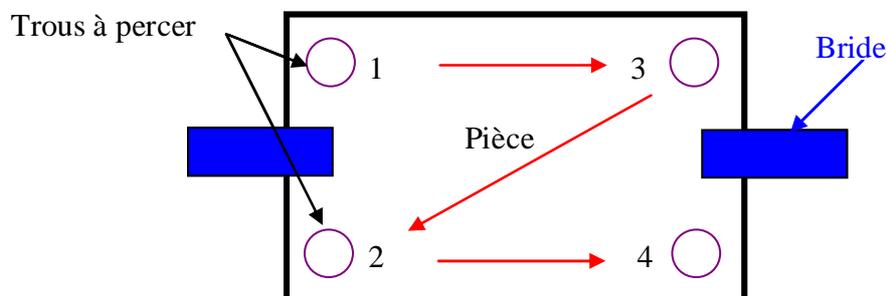


Figure 2.4 Exemple d'ordonnement d'opérations de perçage

2.3.1.3 Conception du montage d'usinage

La conception du montage d'usinage est effectuée lors de l'étude de la sous-phase. Elle nécessite le calcul de l'équilibre de la pièce pendant l'usinage pour garantir la stabilité et évaluer les réactions des points d'appui ce qui nécessite la connaissance des efforts de coupe. À partir de ce moment les efforts de bridage sont évalués. Les déformations subies par la pièce à travers le dispositif de bridage et l'outil de coupe doivent rester compatibles avec la qualité des entités d'usinage. Le respect des trajectoires d'outil est plus que nécessaire pour assurer l'accessibilité des outils de coupe pour toutes les opérations planifiées pour la réalisation des entités d'usinage. La sous-phase n'est validée qu'après la garantie de la stabilité de la pièce durant tout le processus d'usinage, la garantie de la qualité après usinage et démontage de la pièce, la vérification du respect du non violation des espaces de travail réservés aux outils de coupe et de la compatibilité des efforts de coupe au système pièce-montage d'usinage. Le montage d'usinage doit être conçu compact avec une structure la plus rigide possible.

2.3.1.4 Détermination des trajectoires d'outils

La génération des trajectoires d'outil correspond à une activité permettant de calculer l'ensemble des déplacements d'un outil, réalisant ainsi l'enlèvement d'un volume de matière en respectant une stratégie d'usinage imposée. Pour être bien claire la trajectoire d'outil regroupe deux parties, une partie qui caractérise le travail de l'outil par rapport à l'entité d'usinage, elle est caractérisée par l'intensité et la direction des efforts de coupe et une partie qui caractérise l'approche, l'engagement et le dégagement de l'outil, elle dépend de l'outil, de l'entité d'usinage et de l'ordre des opérations, c'est dans cette partie qu'il y'a plus de risque de collision outil-montage d'usinage. De plus, la réalisation effective de la pièce impose une opération de génération de trajectoires robuste et conforme à la qualité requise. La définition de la trajectoire d'outil est fonction de la forme attendue et de la géométrie de l'outil, du type de la machine-outil, de la qualité des surfaces et de la déformation de la pièce. La trajectoire d'outil est fortement liée à la configuration du montage d'usinage car les éléments de bridage occupent un espace qui se situe généralement dans l'espace de travail des outils de coupe. Les risques de collision avec ces outils de coupe sont élevés. Les lieux des éléments de bridage sont choisis en conservant l'accessibilité aux entités d'usinage. Les trajectoires sont définies de manière à éviter les collisions entre les outils de coupe et les éléments du montage d'usinage. Elles sont fonction des outils de coupe et sont contraintes par les éléments technologiques du montage d'usinage et surtout le système de bridage (Figure 2.5).

Les trajectoires d'outils influent sur l'intensité et la direction des efforts de coupe appliquée sur la pièce au cours de l'usinage.

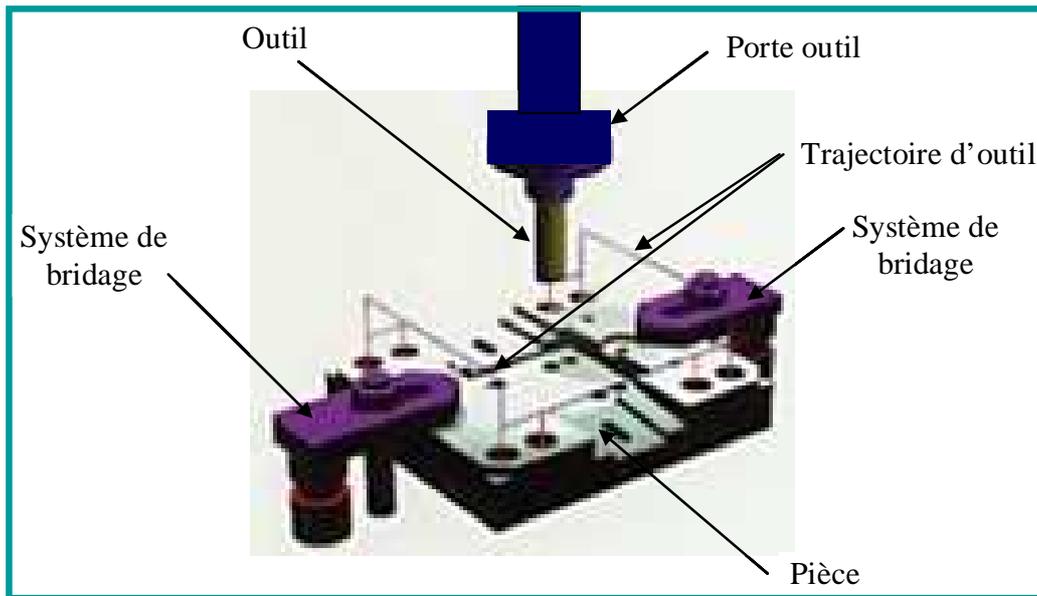


Figure 2.5 Trajectoire d'outil et système de bridage

2.3.1.5 Génération des programmes de commande numérique

Après avoir défini toutes les tâches de la sous-phase, calculé tous les paramètres et validé les trajectoires d'outil par simulation statique ou dynamique sur outil FAO, il faut générer le programme de commande numérique qui va piloter la machine outil CN pour l'exécution des opérations de la sous phase. Cette tâche présente la traduction des différentes actions menées au sein d'une sous-phase en langage compréhensible par la machine-outil [Cor88], [Mer97].

2.3.2 Les liens entre les différentes tâches d'une sous-phase

D'après l'analyse de chaque tâche de la sous-phase on voit bien qu'il y'a des chevauchements et des liens entre les différentes tâches. Ces liens sont dus à l'interaction entre les différents éléments de la sous-phase qui agissent toutes en même temps au moment de l'étude de la sous-phase, par exemple durant l'usinage, le parcours de l'outil, couplé à la géométrie de l'outil et aux conditions de coupe influent sur les efforts de coupe mis en jeu ainsi que la puissance consommée par la machine outil. Dans ce qui suit on va étudier ces liens. Dans un deuxième temps on va essayer de situer tous ces liens par rapport à notre problème de conception du montage d'usinage.

2.3.2.1 Le lien entre le choix de l'outil de coupe et l'ordonnancement des opérations d'usinage

Le choix de l'outil de coupe est fortement lié à l'ordonnancement des opérations d'usinage dans la mesure où pour chaque opération d'usinage est associé un outil de coupe bien défini. L'ordre d'action des outils de coupe dépend de l'ordonnancement des opérations. On peut choisir un outil qui fait deux ou plusieurs opérations simultanément comme par exemple le perçage étagé ou fraisage à l'aide de train de

fraise. Il faut qu'il y'ait une compatibilité entre le choix de l'outil et l'ordre d'action de cet outil dans le temps. L'ordonnancement est défini avant le choix de l'outil de coupe. Elle fixe automatiquement le choix de l'outil mais ce dernier restreint fortement l'ordonnancement.

2.3.2.2 Le lien entre le choix de l'outil et le montage d'usinage

Le choix de l'outil de coupe engendre une équivalence en effort de coupe qui influe sur l'équilibre et la stabilité de la pièce sur le montage d'usinage. Les efforts de coupe excessifs peuvent engendrer une instabilité et des déformations non désirables de la pièce. Un choix mal fait de l'outil de coupe du point de vue géométrie et dimension peut provoquer des collisions outil-montage d'usinage. L'outil, les paramètres de coupe et le montage d'usinage peuvent être adaptés pour éviter les phénomènes d'instabilité. Pour chaque montage d'usinage il y'a une plage d'outils de coupe qui est compatible. L'outil engendre une contrainte de déformation et d'accessibilité sur le montage d'usinage, son choix s'effectue avant la conception du montage d'usinage. Il peut restreindre la conception du montage d'usinage.

2.3.2.3 Le lien entre le choix de l'outil de coupe et la trajectoire d'outil

Le choix de l'outil de coupe contraint fortement la trajectoire de travail de l'outil dans la mesure où la direction d'usinage peut changer avec le choix de l'outil de coupe, ainsi que la direction et l'intensité des efforts de coupe. Les dimensions de l'outil peuvent changer la trajectoire comme par exemple l'opération de surfacage qui peut se faire en une seule opération avec un outil plus grand au lieu de plusieurs passages successifs avec une fraise de diamètre inférieur. Les trajectoires d'approche, d'engagement et de dégagement peuvent changer aussi avec le choix de l'outil de coupe. Il faut avoir une compatibilité entre le choix de l'outil et la trajectoire.

2.3.2.4 Le lien entre l'ordonnancement et la conception du montage d'usinage

L'ordonnancement des opérations d'usinage est le passage d'une opération à une autre. Une fois la condition «les entités d'usinage sont accessibles » est vérifiée, le passage d'une opération d'usinage à une autre dans n'importe quelle ordre peut être effectué sans problème. Il suffit de réserver l'espace de travail des outils de coupe et de garantir l'accessibilité de ces outils aux entités d'usinage pour pouvoir exécuter les opérations d'usinage dans l'ordre qui respecte les contraintes d'ordonnancement.

2.3.2.5 Le lien entre l'ordonnancement et la trajectoire d'outil

La trajectoire d'outil dépend en grande partie de l'ordre des opérations d'usinage car elle est constituée par l'ensemble des liens de passage d'une opération à une autre qui existe entre les différentes opérations d'usinage. Si on change l'ordre des opérations d'usinage, la trajectoire d'outil change obligatoirement. Il est bien clair qu'il y a un lien fort entre l'ordre des opérations d'usinage et la trajectoire d'outil.

2.3.2.6 Le lien entre la conception du montage d'usinage et la trajectoire d'outil

Le dispositif de bridage se situe en général dans l'espace de travail des outils de coupe ce qui augmente les risques de collision entre les outils et les brides constituant le système de bridage. Ceci contraint fortement les trajectoires d'outil du fait que les outils peuvent être amenés à contourner les brides pour se déplacer d'un usinage à un

autre. Le dispositif de bridage contraint la trajectoire d'outil et même peut la rendre impossible. Les trajectoires d'outil influent aussi sur le comportement mécanique du système pièce-montage d'usinage par l'intensité, la direction et le sens des efforts qu'elle engendre (Figure 2.6). Les efforts de coupe peuvent soit plaquer la pièce sur ses appuis ou l'arracher de ces derniers selon le sens du mouvement de l'outil. La conception du montage d'usinage doit coopérer avec les trajectoires d'outil pour s'affranchir d'une solution.

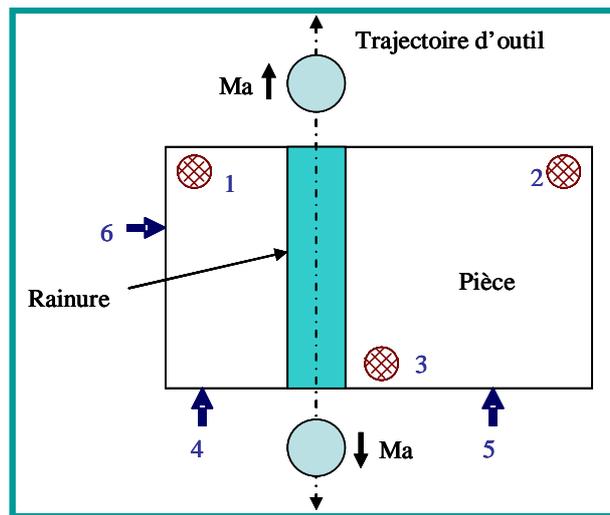


Figure 2.6 Le sens des efforts de coupe peut influencer sur la stabilité de la pièce

Les liens existant entre les différentes tâches d'une sous-phase peuvent être schématisés par la figure 2.7.

2.3.2.7 Liens entre les différentes tâches et la conception du montage d'usinage

Après l'analyse des liens entre les différentes tâches d'une sous-phase, on s'intéresse maintenant beaucoup plus aux liens de ces tâches avec la conception du montage d'usinage. Le lien du choix de l'outil de coupe et des conditions de coupe couplées avec la trajectoire d'outil se traduit par l'effort qui agit sur la pièce et qui conditionne la qualité et la stabilité de celle-ci. La trajectoire d'outil liée à l'ordonnancement des opérations d'usinage influent sur l'accessibilité et sur le comportement mécanique de la pièce. Pour ce qui est de l'ordonnancement seul, il est beaucoup plus lié à la trajectoire d'outil et elle n'a pas d'influence directe sur la conception du montage d'usinage. On peut conclure que toutes les tâches sont liées à la conception du montage d'usinage (figure 2.8) par des liens qui se traduisent par les efforts de coupe qui influent sur la stabilité et les déformations de la pièce ou bien proprement dite sur son comportement mécanique ce qui affecte directement la qualité des usinages et par l'accessibilité de ces outils de coupe aux entités d'usinage pour éviter les collisions outils-pièce et outils-montage d'usinage.

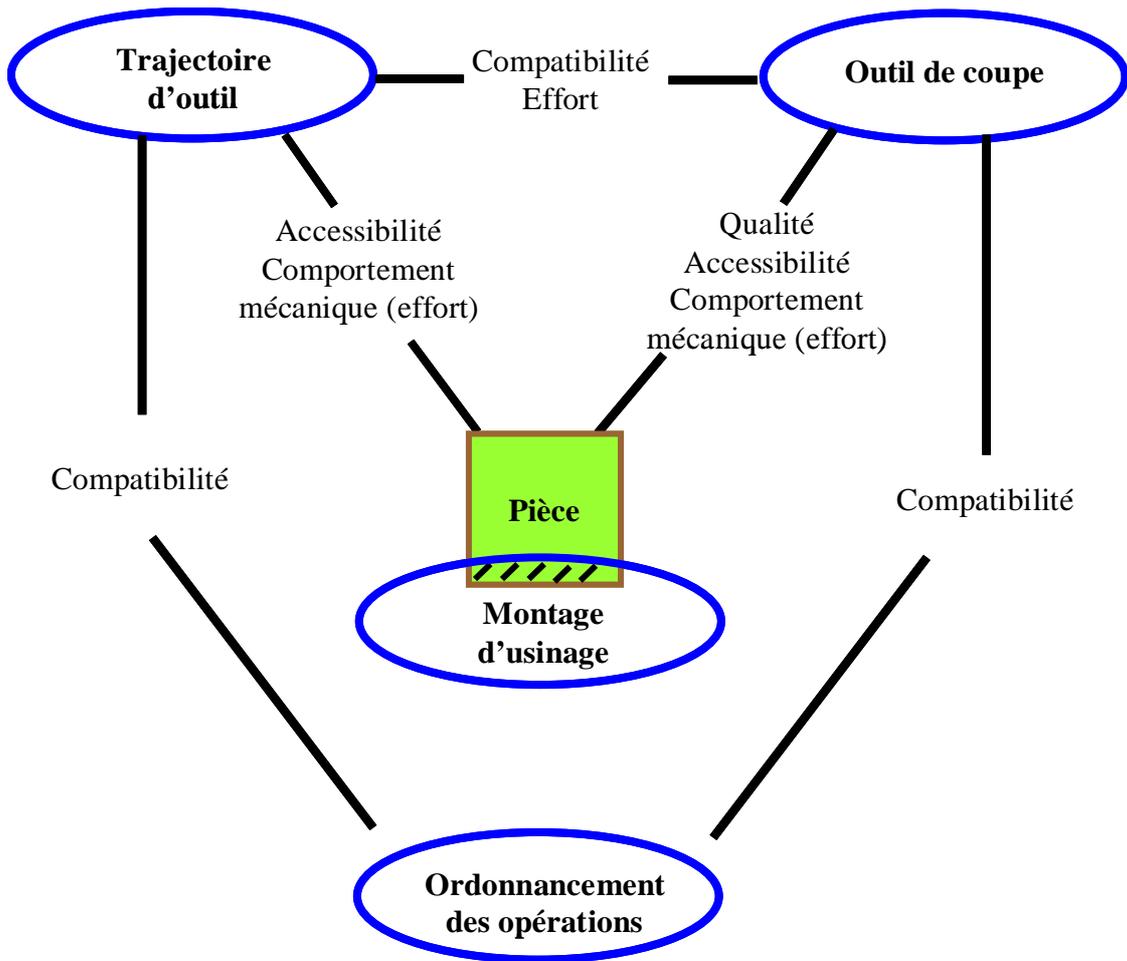


Figure 2.7 Les différents liens entre les éléments d'une sous-phase

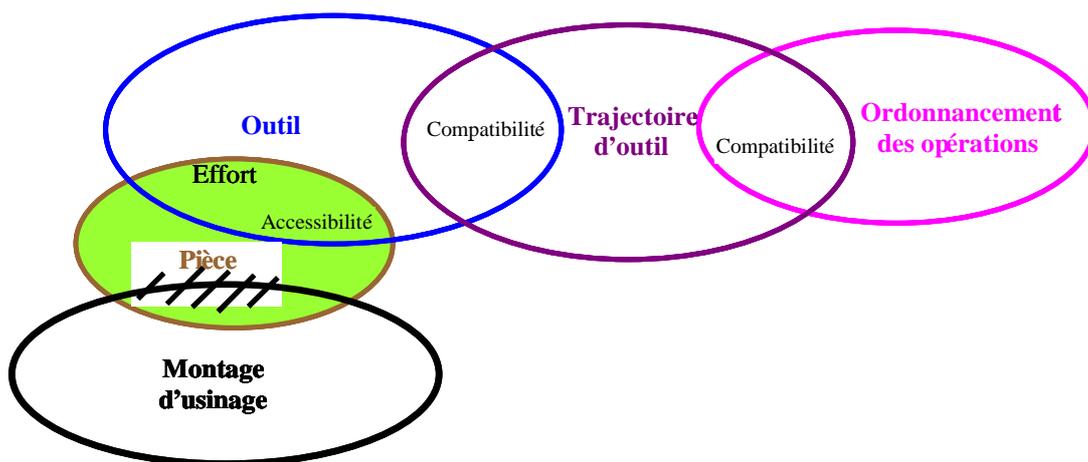


Figure 2.8 Les liens avec la conception du montage d'usinage

3 Notre approche vis-à-vis la conception du montage d'usinage

Notre approche vise à concevoir le montage d'usinage modulaire pour le fraisage d'une manière indépendante des autres tâches de la sous-phase en s'appuyant sur les informations disponibles et qui sont validées en amont dans l'étude de la gamme d'usinage et sur des estimations et des règles expertes. Notre objectif sera de proposer une stratégie de conception du montage d'usinage modulaire en parallèle à l'étude des autres tâches de la sous-phase tout en laissant un espace de solution suffisant aux autres tâches afin de ne pas trop les contraindre.

Il faut raisonner de manière suffisamment indépendante des autres tâches pour leurs laisser le maximum de marge de manœuvre. La difficulté de cette étape provient donc du fait qu'il faut, à la fois, être précis pour que la conception du montage d'usinage ne soit remise en cause par la suite, et être synthétique pour ne pas contraindre inutilement les autres tâches de la sous-phase. Il s'agit donc de ne prendre à cette étape que les décisions strictement nécessaires pour la conception du montage d'usinage.

Cependant cette stratégie n'est intéressante que si la conception du montage d'usinage ne sera pas remise en cause lors de l'étude des autres tâches de la sous-phase. Il s'agit donc de prendre en considération tous les chevauchements des autres tâches et de gérer toutes les contraintes en conception du montage d'usinage. L'existence d'une solution globale pertinente réaliste mais pas forcément optimale doit être assurée par cette stratégie de conception du montage d'usinage.

3.1 Principe de moindre engagement

Le principe de moindre engagement consiste à ne prendre une décision que lorsqu'elle est entièrement justifiée. Ce raisonnement n'est pas si facile à effectuer car il faut vraiment que la solution retenue soit réaliste et non remise en cause par la suite. Il ne faut pas contraindre inutilement les autres tâches de la sous phase. Il s'agit donc de prendre à cette étape que les décisions nécessaires et justifiées pour la conception du montage d'usinage en utilisant les informations disponibles à cet instant et en laissant une marge de manœuvre suffisante pour les autres tâches. Il ne faut choisir de solution que lorsqu'elle est pertinente [Bri92].

3.2 Disposer d'informations sur la faisabilité

Pour que notre approche soit valable et en vue de garantir la faisabilité de la conception du montage d'usinage de manière indépendante des autres tâches de la sous phase il faut disposer des informations qui nous permettent d'atteindre notre objectif qui est la solution pertinente de la conception du montage d'usinage sans qu'elle soit remise en cause par la suite. Les informations disponibles doivent nous permettre d'élaborer une stratégie de conception du montage d'usinage fiable. Il nous faut les informations qui nous permettent de gérer la qualité, l'accessibilité et le comportement mécanique de la pièce [Wu98a]. On peut formaliser aussi les règles expertes qui interviennent dans ce domaine. D'après ce qui a été dit auparavant si on arrive à prédire les efforts de coupe qui agissent sur la pièce et garantir l'accessibilité des outils de coupe aux surfaces usinées tout en respectant la qualité demandé et en garantissant la stabilité durant toute la durée de l'usinage, notre problème est résolu. Dans ce qui suit on va faire le bilan de toutes les données disponibles.

3.2.1 Etudes antérieures sur la gamme d'usinage et la sous-phase

Les études antérieures sur la sous-phase et en particulier sur la prise de pièce de Paris [Par95] ont permis de définir un modèle de prise de pièce intégré dans un système de génération de gamme d'usinage qui s'appelle PROPEL [Bri92] implémenté dans un environnement CFAO Open Cascade avec des informations parmi lesquelles l'entité d'usinage et des indicateurs qui permettent de caractériser les performances de la prise de pièce. Ces indicateurs évaluent l'aptitude de la prise de pièce à garantir la qualité de la surface usinée, la stabilité en cours d'usinage et l'accessibilité des outils de coupe aux surfaces à usiner. Il est donc possible de s'appuyer sur ces informations et d'interpréter ces indicateurs pour concevoir le montage d'usinage et valider la solution finale.

3.2.1.1 Présentation de PROPEL

PROPEL est un système de génération de gammes d'usinage et de sous-phase, implémenté dans l'environnement CFAO Open Cascade. Ce système est composé de 5 modules (figure 2.9) Il permet à partir du modèle CAO de la pièce et du modèle entité d'usinage de générer la gamme d'usinage et ainsi d'élaborer les sous-phases.

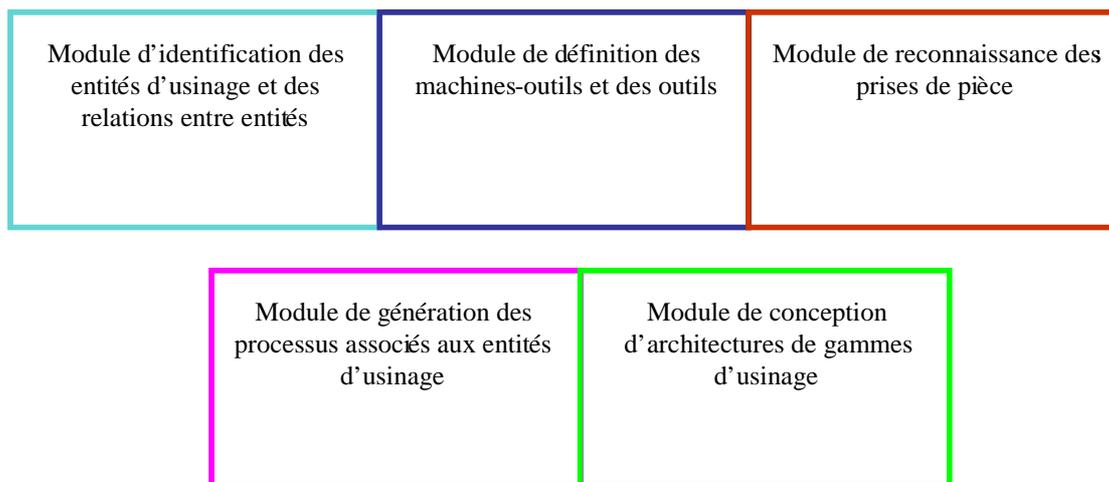


Figure 2.9 Architecture de **PROPEL** [Par95]

3.2.1.2 Le modèle entité de prise de pièce et ses attributs

Une entité de prise de pièce qui est générée par PROPEL (figure 2.10) est une combinaison de trois entités d'appui dont au moins une est une entités appui-bridage qui peut être matérialisée par un montage d'usinage. Le premier appui de la combinaison, appelé appui prépondérant, assure la stabilité de la pièce. Le second appui, appelé appui secondaire assure l'orientation de la pièce. Le troisième appui, appelé appui tertiaire ou butée, élimine le dernier degré de liberté de la pièce. La combinaison des trois appuis respecte les règles de l'isostatisme. La combinaison peut être soit de type 3-2-1 R (plan, linéaire, butée), de type 3-2-1 C (plan, centrage,

butée) ou de type 4-1-1 (pivot, butée, butée). Dans notre étude on s'intéresse uniquement au type de posage 3-2-1 R et 3-2-1 C.

Il s'agit donc d'un posage caractérisé par un type et un triplet d'appui. Chaque appui est caractérisé par la géométrie de la pièce participant à chaque appui. Le bridage est caractérisé par un mode de bridage et par un ensemble de lieux où il est possible de placer une bride type en évitant les collisions entre les outils de coupe et la bride. Cette information permet d'estimer l'existence d'une solution : en effet, les lieux de bridage ne correspondent pas aux lieux où seront placés les éléments technologiques de bridage. Dans ce travail, on ne tient compte que du bridage de mode bride.

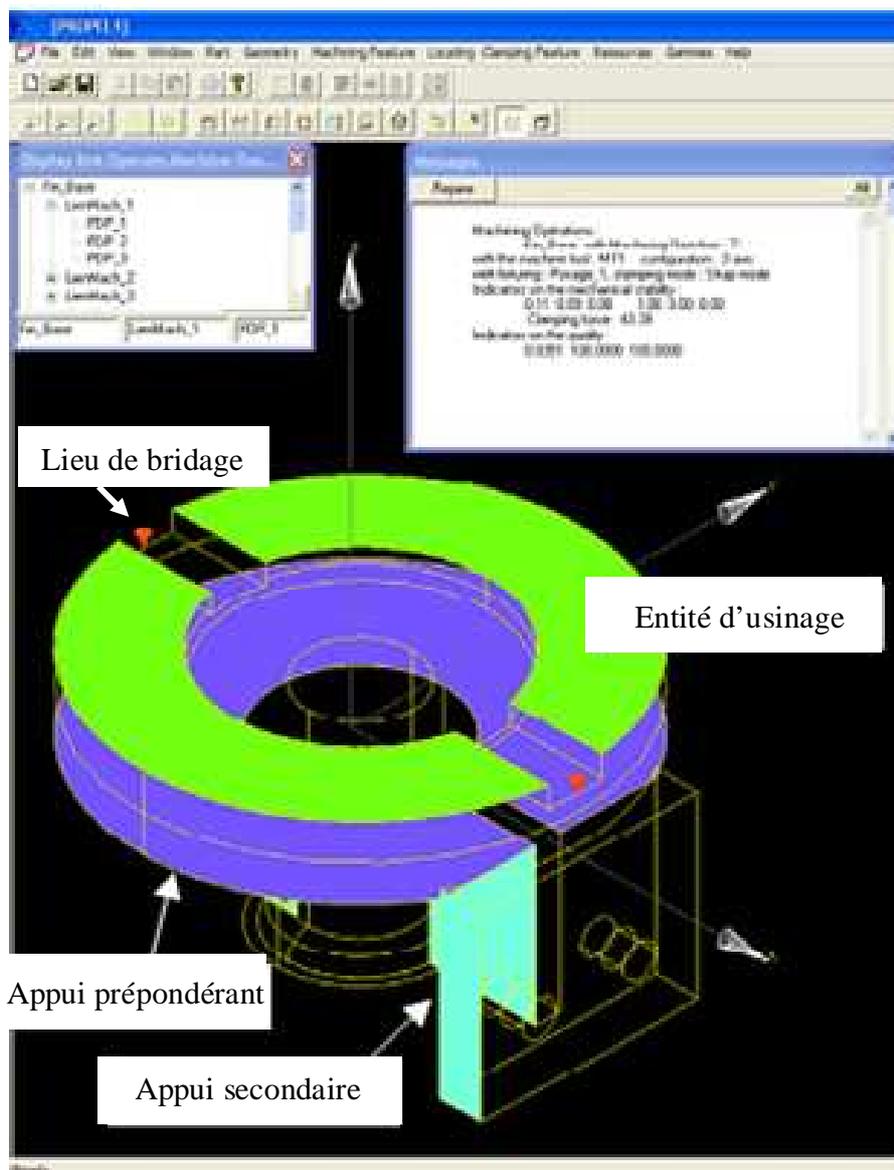


Figure 2.10 Modèle de prise de pièce et ses attributs générés par **PROPEL**

Les autres attributs de la prise de pièce sont :

- Les indicateurs de qualité

Le principal objectif de ces indicateurs est de définir la qualité des surfaces d'appui minimale compatible avec la qualité de positionnement des surfaces usinées avec cette prise de pièce. On peut même identifier les déformations admissibles pour chaque appui.

- Les indicateurs de stabilité

Le principal objectif des indicateurs de stabilité est de s'assurer que la pièce est stable durant l'usinage et que les efforts de bridage sont compatibles avec l'usinage. Il s'agit de maîtriser le comportement du système pièce-montage d'usinage-outil pendant l'usinage. Celui-ci est caractérisé par un effort minimal de bridage et par des indices de stabilité caractérisant les risques de glissement ou de basculement de la pièce en cours d'usinage.

- Accessibilité

L'accessibilité est une information implicite c'est-à-dire que les calculs ont été faits d'une manière grossière en l'absence des éléments technologiques réels du montage d'usinage et de leurs lieux de placements exacts.

3.3 Les informations disponibles issus de l'architecture de la gamme d'usinage

- Le modèle entité de prise de pièce et ses attributs qui sont:
- type de posage,
- triplet d'appui (prépondérant, secondaire et tertiaire),
- mode de bridage,
- lieux potentiels de bridage,
- indicateurs de qualité,
- indicateurs de stabilité (indicateurs de glissement et de basculement)
- entités d'usinage.
- la machine outil utilisée :

Il s'agit du nombre d'axes et de l'orientation de la plaque de base sur la table de la machine-outil. Deux configurations sont retenues : soit le montage est fixé directement sur la table de la machine outil, soit il est monté sur une équerre ou un cube. Les courses machine sont bien sûr connues. Nous retenons la cinématique 3 axes et 4 axes.

- Les directions d'usinage :

La direction d'usinage est un attribut de l'entité d'usinage. Elle modélise la direction d'accès des outils de coupe réalisant les opérations du processus de l'entité d'usinage.

- Les outils de coupe :

Seul le type d'outil est identifier ainsi que la dimension lié à l'entité d'usinage (Par exemple : diamètre de l'outil fraise pour l'entité rainure). Les autres dimensions de

l'outil ne sont pas définies ainsi que le nombre de dents pour une fraise. Il est bien évident que l'orientation de l'outil par rapport à l'entité d'usinage est bien connue.

- les opérations d'usinage

Il s'agit d'une suite chronologique d'opérations d'usinage. Chaque opération est typée (ébauche, 1/2 finition et finition). De plus, la surépaisseur de matière à enlever est connue.

- Le matériau de la pièce
-
- la base de données d'éléments modulaires

Les constructeurs des montages modulaires fournissent une bibliothèque informatique des éléments modulaires (figure 2.11). Ces éléments peuvent être introduits dans notre système CAO. Ainsi, chaque élément modulaire pourra être appelé par sa référence à l'écran pour être visualisé et positionné sur le montage d'usinage en cours de conception. Une nomenclature précise des éléments modulaires sera établie. La correspondance de cette nomenclature avec les références marquées sur chaque élément modulaire facilitera largement la tâche du monteur dans les ateliers.

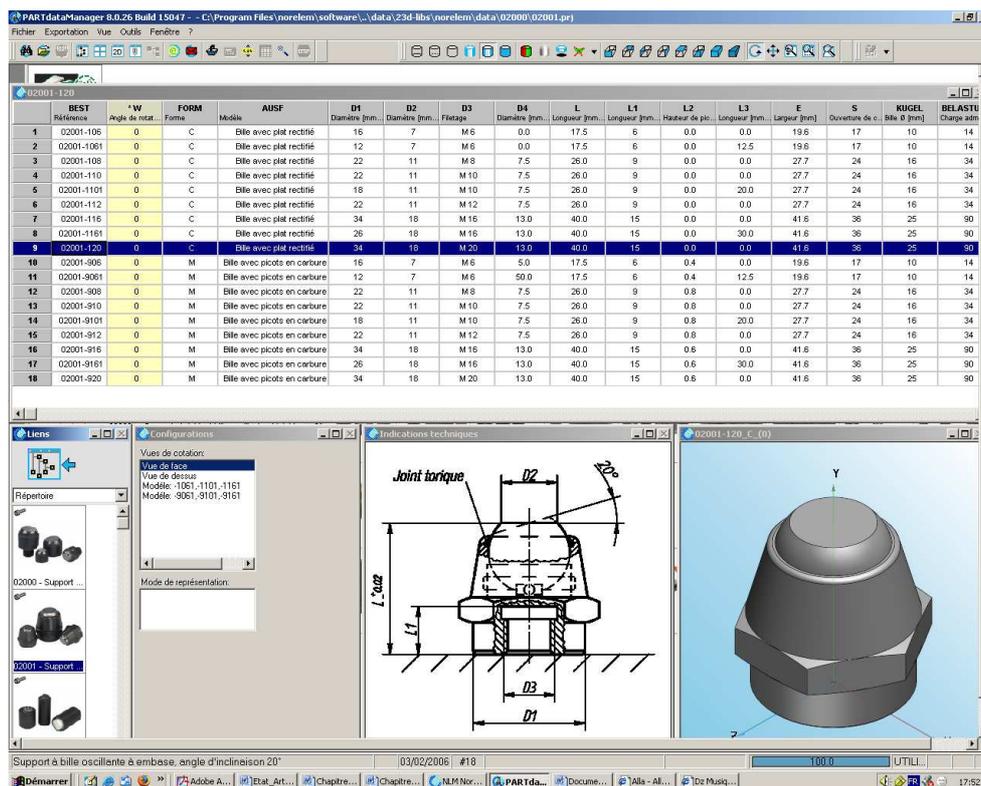


Figure 2.11 Base de donnée CAO montrant un élément d'appui [Nor00]

3.4 Découplage du problème à partir des informations disponibles

Le découplage du problème c'est la capacité de prendre des décisions pour la conception du montage d'usinage sans avoir toutes les informations précises des autres tâches de la sous-phase. Ceci tout en garantissant l'espace de solutions de chaque tâche le plus large possible.

Notre approche de conception du montage d'usinage revient à choisir et placer les éléments technologiques d'appui et de bridage en contact avec la pièce. Ces derniers sont ensuite liés avec la plaque de base pour former l'ensemble du montage d'usinage prêt à être utiliser. Ceci à partir des informations disponibles et qui sont issues de l'architecture de la gamme d'usinage. Car les autres informations nécessaires à la conception du montage d'usinage et qui sont liées aux autres tâches de la sous-phase ne sont pas disponibles à ce niveau. Notre stratégie consiste à découpler le problème de la conception du montage d'usinage des autres tâches de la sous phase tout en diminuant les liens qui existent entre ces tâches et la conception du montage d'usinage.

3.4.1 Découplage du problème

D'après l'étude d'une sous-phase, il ressort qu'il y'a un chevauchement entre les différentes tâches d'une sous-phase.

Le choix d'un outil de coupe et de sa trajectoire de travail permet d'évaluer les efforts de coupe. Ces efforts sont essentiels pour évaluer le comportement mécanique de la pièce et estimer la qualité des surfaces usinées. A partir de ce couple outil/trajectoire on peut aussi évaluer l'accessibilité de l'outil aux entités d'usinage. Selon notre stratégie, l'existence d'une solution pertinente est possible si :

- On arrive à prédire les efforts de coupe [Alt92] qui agissent sur la pièce pendant l'usinage avec suffisamment de précision pour prédire le comportement mécanique de la pièce. Ce comportement doit définir la stabilité et la qualité des surfaces usinées.
- On garantit l'accessibilité des outils de coupe aux entités d'usinage sans collision avec la pièce ni avec les éléments technologiques du montage d'usinage,

3.4.1.1 Prédiction des efforts de coupe et des trajectoires de travail des outils de coupe

Les efforts de coupe sont définis par leurs intensités et leurs directions qui peuvent être constantes ou variables, suivant le type d'usinage (figure 2.12). Des études ont été menées au sein de notre laboratoire pour estimer le torseur de coupe des outils tournants réalisant des opérations courantes comme le perçage, l'alésage, le taraudage, le rainurage ou le fraisage à partir d'une description de la pièce par entités d'usinage [Gro94].

Les efforts d'alésage se résument à un couple et un effort de poussée. D'après Gromaire [Gro94], ils sont environ 200 fois plus petits que ceux du perçage nécessaire à réaliser le trou d'ébauche. On serait donc tenté de négliger ces efforts. Les efforts de coupe pour une opération de taraudage se modélisent simplement par un couple qui s'exerce autour de l'axe de l'entité d'usinage. Cette valeur de couple est calculable de manière simple (2.1) ou bien elle est donnée par des tableaux en

fonction de la matière de la pièce et en fonction du diamètre du taraud et du pas de taraudage.

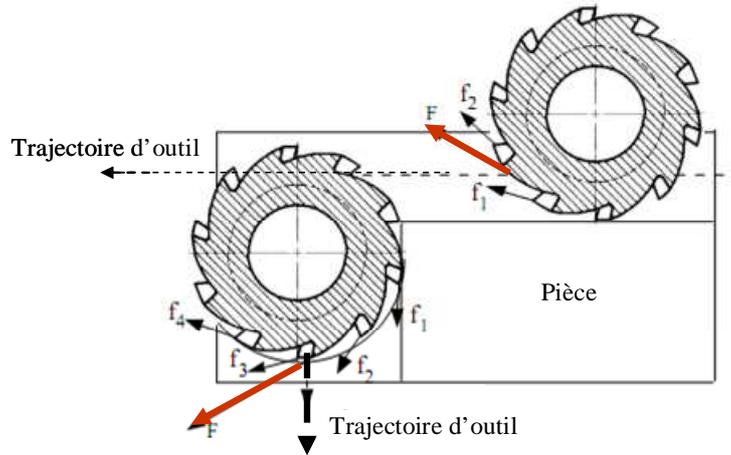


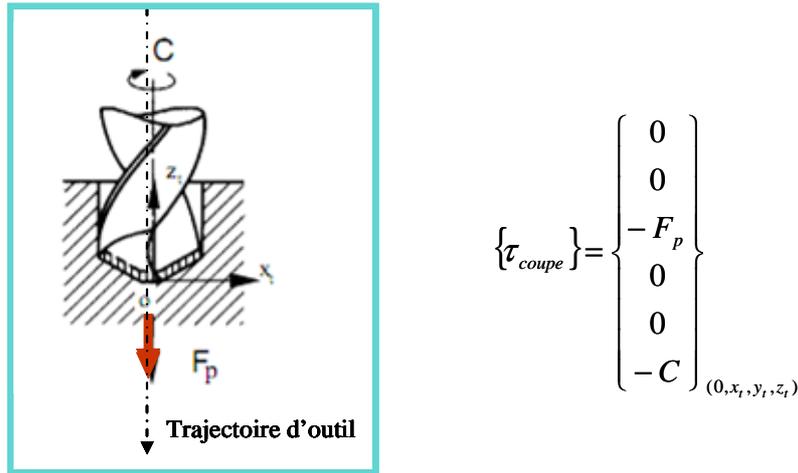
Figure 2.12 Evolution des efforts de coupe pendant l'usinage.

F est la résultante des f_i .

$$C = \rho \left[(d_t - d_i + p\sqrt{3}/8)^2 \times d \right]^5 \quad (2.1)$$

3.4.1.2 Prédiction des efforts de coupe en perçage

L'action de coupe lors d'une opération de perçage (figure 2.13) est modélisée par un effort de pénétration F_p suivant la direction d'usinage de l'entité de type trou et un couple C qui sont tous les deux constants pendant toute la durée de l'usinage si on néglige l'engagement et le dégagement du foret. Tanguy [Tan93] modélise l'effort de pénétration et le couple de perçage en fonction de l'avance et du diamètre de perçage par les relation (2.2) et (2.3). Les coefficients k, K_M et K_F sont fonction de la matière à usiner et de l'affûtage du foret. Comme l'avance est généralement déterminée à partir du diamètre, le torseur de coupe est alors uniquement dépendant du diamètre du trou, de la matière à usiner et de l'état initial du trou; trou venant du brut, trou déjà ébauché en perçage ou pas de trou sur la pièce brute. La trajectoire du foret est parfaitement définie par les attributs de l'entité d'usinage de type trou. Elle est située sur l'axe du trou. Le point d'application de l'effort de poussée évolue le long de la trajectoire de l'outil c'est à dire sur l'axe du trou. Le torseur de coupe $\{\tau_{coupe}\}$ est exprimé dans un repère (o, x_t, y_t, z_t) lié à la trajectoire de l'outil.



$$\{\tau_{coupe}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -F_p \\ 0 \\ 0 \\ -C \end{Bmatrix}_{(0, x_i, y_i, z_i)}$$

Figure 2.13 Torseur de coupe d'une opération de perçage

$$F_p = k \cdot K_F \cdot a \cdot \Delta d \quad (2.2)$$

$$C = K_M \cdot a \cdot (d_f)^2 \quad (2.3)$$

3.4.1.3 Prédiction des efforts de coupe en fraisage

La prédiction des efforts de coupe en fraisage est plus complexe à modéliser car la section du copeau n'est pas constante, le nombre de dents en travail est variable et la résultante de l'effort de coupe sur chaque dent en travail n'est pas bien connue. En conséquence, il est difficile de connaître l'intensité et la résultante des efforts de coupe au cours du temps. De plus d'autres paramètres tels que le nombre de dents d'une fraise, la largeur usinée, le diamètre de la fraise, le type de fraisage (fraisage de centre ou fraisage décalé), la direction de fraisage (fraisage en opposition ou fraisage en avalant), sont autant des paramètres qui influent fortement sur la direction et l'intensité de l'effort de coupe et qui ne sont pas connus à notre stade. L'effort de coupe est, en outre, directement dépendant de la trajectoire de l'outil. Cette trajectoire peut être estimée à partir de la géométrie de l'entité d'usinage, de la position et de l'orientation de celle-ci sur la pièce en utilisant des règles heuristiques. Pour simplifier le problème, nous avons négligé les états transitoires correspondant à l'engagement et au déengagement de la fraise et l'incidence de l'angle d'hélice sur l'effort de coupe, ce qui correspond à une profondeur de passe faible devant l'engagement de la fraise. Les travaux de Gromaire, déjà cités, ont permis de modéliser l'effort de coupe en analysant plus particulièrement la variation de l'intensité et de la direction de l'effort de coupe par rapport à la trajectoire de l'outil. L'effort de coupe sur chaque dent de la fraise est estimé à partir du modèle proposé par Altintas [Alt92] (figure 2.14). Les équations (2.4) et (2.5) permettent de calculer l'effort tangent F_t et l'effort radial F_r à la fraise en fonction de la profondeur de passe P, de l'épaisseur du copeau h et du coefficient k_s dépendant du matériau à usiner.

$$F_t = k_s \cdot P \cdot h^a \quad (2.4)$$

$$F_r = F_t / 1,5 \quad (2.5)$$

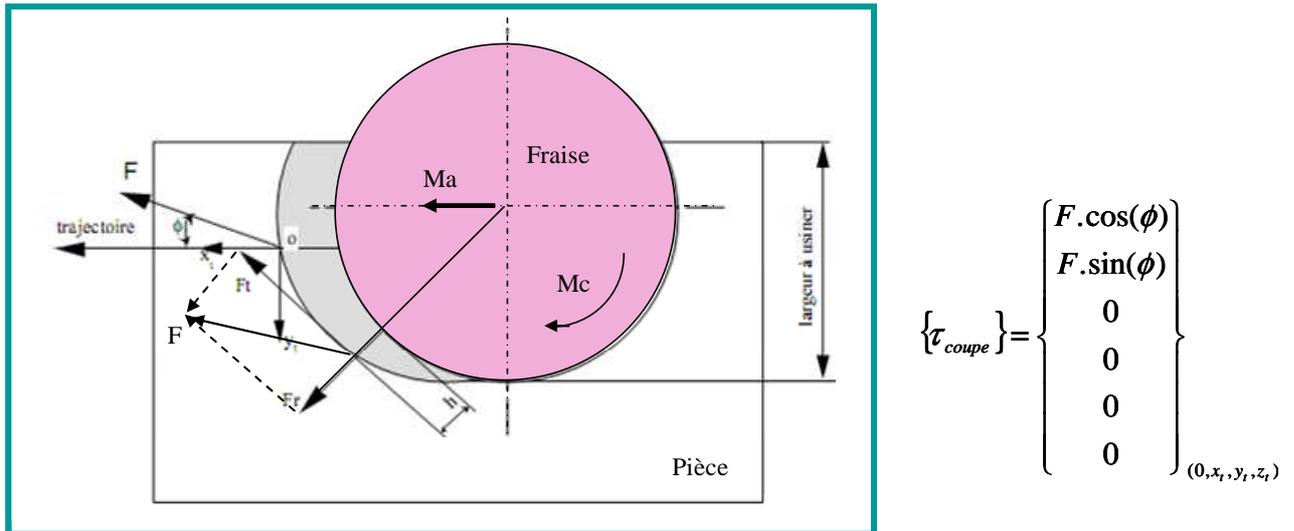


Figure 2.14 Les efforts de coupe en surfacage

La direction et l'intensité de l'effort F , résultant de l'action de l'ensemble des dents participant à l'usinage, varie pendant toute la durée de l'usinage. Cette variation de direction est directement liée au nombre de dents de l'outil de coupe et à l'engagement de la fraise dans la pièce qui est définie par le rapport entre la largeur à usiner et le diamètre de la fraise. La figure 2.15 nous montre les variations de l'intensité et de l'orientation de l'effort résultant F par rapport à la trajectoire de coupe pour un surfacage réalisé avec une fraise de diamètre 63 mm ayant 6 dents et une largeur à usiner de 45 mm.

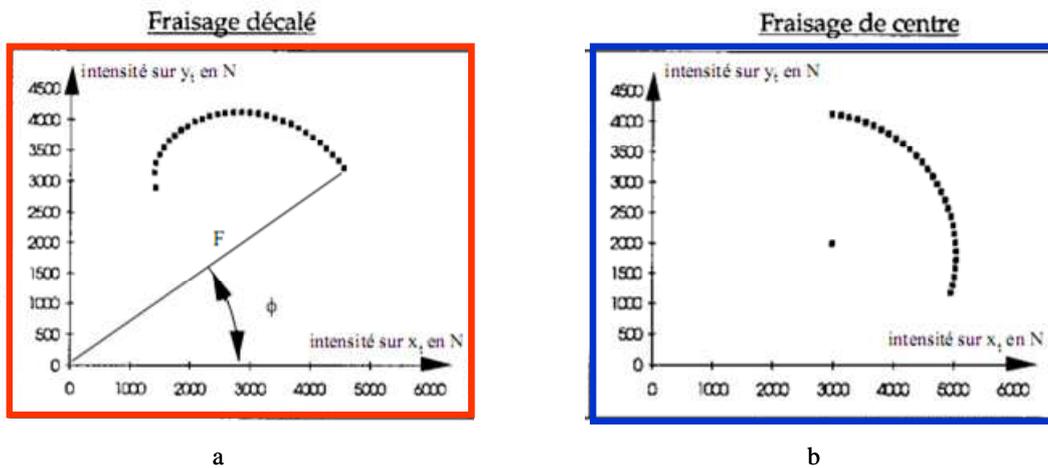


Figure 2.15 Variation de l'effort de coupe en fraisage normal. [Gro94]

Nous pouvons remarquer que l'angle ϕ varie de 35 à 64 degrés et que l'intensité F varie de 3224 à 5581 N. Il est alors possible d'estimer l'effort moyen de coupe par un vecteur faisant un angle ϕ moyen avec la trajectoire et une intensité F moyen. Ce vecteur parcourt la trajectoire pendant toute la durée de l'usinage. Le torseur de

coupe est exprimé dans un repère (o, x_t, y_t, z_t) lié à la trajectoire de l'outil. Le point o parcourt la trajectoire.

3.4.1.4 Prédiction des efforts de coupe en rainurage

L'étude du rainurage réalisée par Gromaire [Gro94] a permis de mettre en avant le rôle primordial joué par le nombre de dents de la fraise. Les résultats obtenus montrent une forte variation de l'angle ϕ (de -48 à 122 degrés en utilisant une fraise ayant deux dents) et de l'intensité F (de 0 à 3590 N) (voir la figure 2.16). Lorsque le nombre de dents augmente, la variation de l'effort de coupe diminue. La figure 2.17 montre les résultats de la simulation en utilisant une fraise à trois dents et à quatre dents. Dans la pratique, les fraises à rainurer possèdent deux ou trois dents. Il est alors difficile d'estimer l'effort de coupe lorsque la fraise à deux dents. Il est cependant possible de retenir l'effort de coupe ayant l'intensité maximale. La direction de l'effort est alors déterminée par l'angle ϕ correspondant à cette intensité.

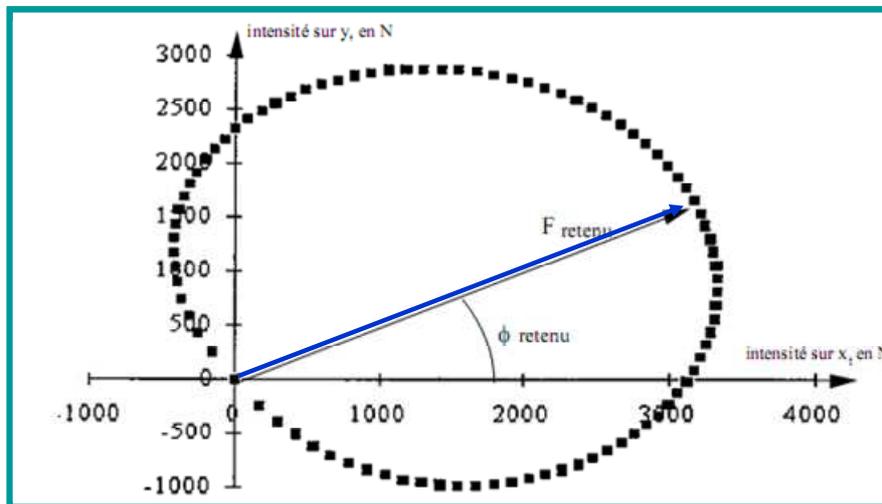
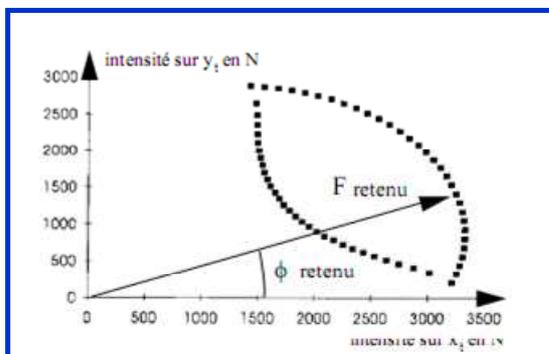
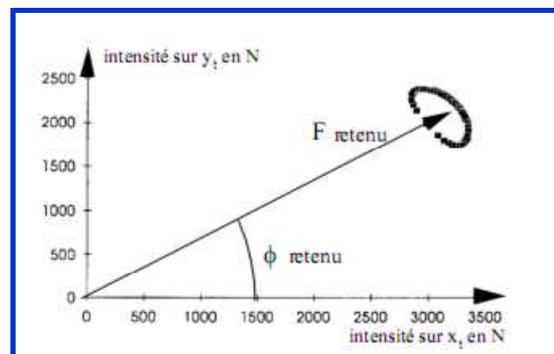


Figure 2.16 Variation de l'effort de coupe en rainurage avec une fraise de diamètre 20 mm à deux dents, une profondeur de passe de 1 mm, une avance de 0,2 mm/dent sur une pièce en XC38. [Gro94]



résultat avec une fraise à 3 dents



résultat avec une fraise à 4 dents

Figure 2.17 Incidence du nombre de dents sur la variation de l'effort de coupe. [Gro94]

En conclusion, on peut à partir des données technologiques dont on dispose comme l'entité d'usinage, la surépaisseur d'usinage, l'opération d'usinage et le type d'outil prédire avec suffisamment de fiabilité l'intensité et la direction du torseur des efforts de coupe pour les opérations de fraisage les plus courantes comme le perçage, le rainurage et le fraisage. On peut prédire le torseur de coupe pour chaque entité réalisable sur cette prise de pièce. D'après Gromaire [Gro94] toujours, la direction des efforts de coupe est bien définie pour le perçage. Pour le rainurage il faut retenir pour la fraise 2 dents que la direction change considérablement. Pour le fraisage la direction est plus stable avec l'augmentation du nombre de dents. La direction des efforts de coupe dépend aussi de la direction de fraisage qui peut être estimé.

3.4.1.5 Accessibilité des outils de coupe aux entités d'usinage

D'après les informations disponibles, l'accessibilité des outils de coupe aux entités d'usinage est déjà validée pendant l'étude de l'architecture de la gamme d'usinage. Mais c'est une information implicite car cette validation a été faite sans les éléments technologiques du montage d'usinage et sans la connaissance de leurs positions réelles et sans la prise en compte de l'environnement de la machine outil (porte outil, broche, courses,..., etc.). Cette accessibilité peut être perturbée par le choix et le placement des éléments technologiques du montage d'usinage et surtout par le système de bridage. Notre stratégie consiste à choisir et placer les éléments technologiques en respectant l'espace alloué aux outils de coupe et aux trajectoires de ces outils tout en considérant l'environnement de la machine outil. On doit d'abord identifier l'espace réservé aux outils de coupe.

3.4.1.6 Quelle est l'accessibilité issue de l'architecture de la gamme d'usinage

Généralement, lorsque le principe 3-2-1R ou 3-2-1C est retenu, nous faisons l'hypothèse que les outils coupants ne passent pas au travers de l'appui prépondérant. Cette condition limite les directions d'usinage acceptables au demi-espace supérieur à l'appui prépondérant. Les appuis d'orientation et la butée ne limitent pas les directions d'usinage. En effet, les éléments du montage d'usinage assurant l'orientation et la butée occupent un espace relativement restreint. Il est alors possible de passer les outils de coupe entre ces éléments. La gestion des collisions entre ces éléments assurant le posage et les outils de coupe permet de s'assurer de l'accessibilité des outils de coupe aux entités d'usinage réalisées avec cette prise de pièce.

D'après Paris [Par95] l'estimation de l'espace correspondant à l'enveloppe de la trajectoire de l'outil de coupe réalisant l'opération d'usinage est fortement dépendante du type de l'entité d'usinage. De plus, suivant le type de l'entité d'usinage, cette estimation est plus ou moins exacte.

L'usinage d'une entité de type trou est réalisé à l'aide d'un outil dont le diamètre est égal à celui du trou qui se déplace suivant l'axe du trou. L'espace correspondant à l'enveloppe de l'outil pendant l'usinage est alors un cylindre de diamètre égal à celui du trou, qui se situe sur l'axe de l'entité et de longueur égale à la plus grande dimension de l'espace de travail (figure 2.18). Lorsque l'entité est composée de plusieurs alésages étagés, nous retenons comme diamètre celui qui est le plus important. Cette estimation est exacte en finition. En ébauche, l'espace réellement

occupé par l'outil est inclus dans cette estimation. Dans le cas d'entité ayant deux directions d'usinage, nous associons à l'entité d'usinage un espace par direction.

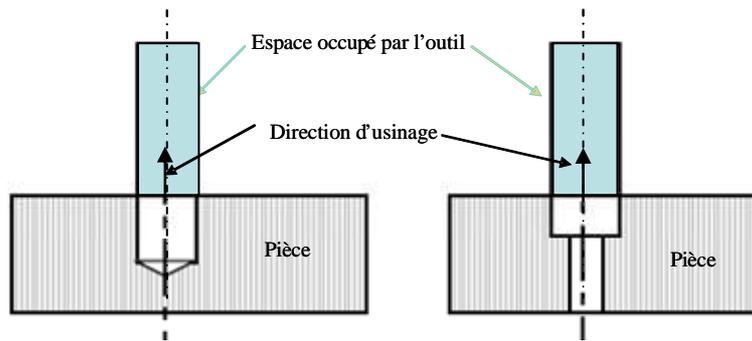


Figure 2.18 Espace correspondant à l'usinage d'une entité de type trou

L'usinage d'une entité de type rainure ou poche est réalisé à l'aide d'une fraise dont le diamètre est compatible avec les dimensions de la rainure ou de la poche. Pendant l'usinage, l'outil se déplace dans un espace qui est parfaitement défini par la géométrie de l'entité d'usinage. L'espace occupé par l'outil est alors un volume extrudé dont la base est le contour de la rainure ou de la poche et la direction d'extrusion la direction d'usinage (figure 2.19). Lorsque la rainure ou la poche n'est pas débouchante suivant une direction perpendiculaire à la direction d'usinage, l'estimation de l'espace occupé est exacte. Dans le cas contraire, la trajectoire d'engagement est dans le prolongement de la rainure ou de la poche. L'espace réellement occupé par l'outil est alors supérieur à l'estimation (figure 2.19).

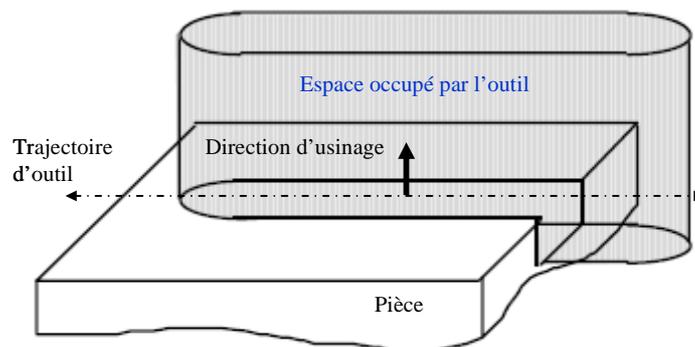


Figure 2.19 Espace correspondant à l'usinage d'une entité de type rainure

L'usinage d'une entité de type face plane est réalisé à l'aide d'une fraise qui parcourt toute la surface du plan. Le diamètre de la fraise peut être plus important que l'une des dimensions de la surface à usiner (la trajectoire est alors simple : une droite) ou plus petit que les dimensions de la surface à usiner (la trajectoire est plus complexe : un balayage). De plus, les trajectoires d'engagement et de dégagement augmentent les dimensions de l'espace occupé par l'outil de coupe (figure 2.20b). Comme nous ne connaissons pas le diamètre de l'outil et les trajectoires de l'outil, nous calculons un

espace correspondant seulement à l'usinage de la surface plane. Il s'agit d'un volume extrudé ayant pour base la surface plane et comme direction d'extrusion la direction d'usinage (figure 2.20a). L'engagement et le dégagement ne sont pas pris en compte. Cet espace est très nettement inférieur à l'espace réellement occupé par l'outil.

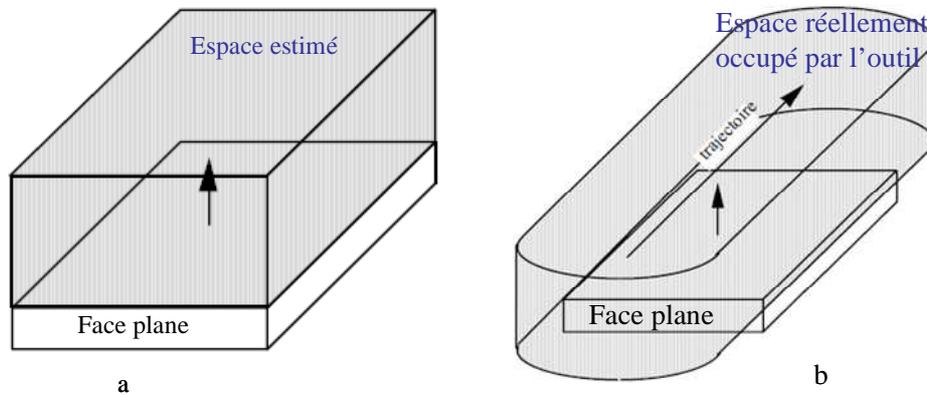


Figure 2.20 Espace correspondant à l'usinage d'une entité de type face plane

L'usinage d'une entité de type contour est réalisé à l'aide d'une fraise qui suit le contour. L'espace occupé par l'outil de coupe est alors très difficile à déterminer. En effet, le diamètre de l'outil et les trajectoires d'engagement et de dégagement ne sont pas connus. L'estimation du diamètre de l'outil D_{fr} n'est pas aisée. Il est cependant possible de fixer une valeur maximale à partir de règles heuristiques. Le volume occupé par l'outil est alors construit à partir de cette valeur (figure 2.21). Ce volume calculé, sans être exact, représente tout de même assez bien la réalité.

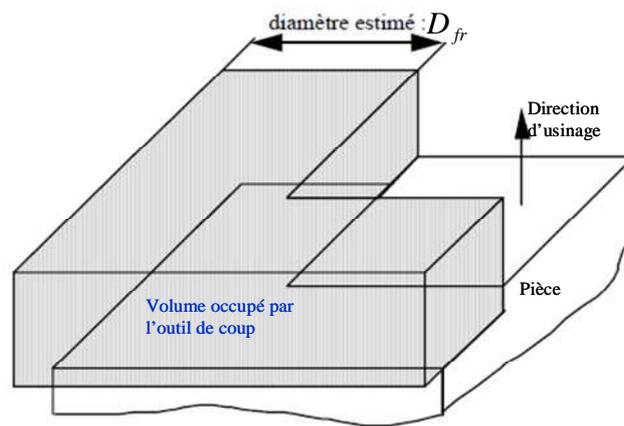


Figure 2.21 Espace correspondant à l'usinage d'une entité de type contour

3.4.1.7 Comment préserver l'espace de travail des outils de coupe dans l'étude de la prise de pièce

L'espace de travail des outils de coupe déjà validé dans l'étude de l'architecture de la gamme d'usinage va probablement être affiné par le placement des éléments technologiques d'appui et surtout de bridage. Notre stratégie de choix et de placement des éléments technologiques du montage d'usinage doit obligatoirement tenir compte de cet espace en vue de garantir l'accessibilité des outils de coupe aux entités d'usinage sans collision ni avec la pièce ni avec les éléments du montage d'usinage.

L'accessibilité des outils de coupe aux entités d'usinage doit tenir compte de l'environnement de la machine outil (courses, porte outil, broche), de la hauteur de la pièce par rapport à la plaque de base, des éléments de liaison et du nombre et positions des brides.

Dans le cas où la direction d'usinage est perpendiculaire à la direction de pose de l'appui prépondérant, il faut prévoir un espace supplémentaire pour le porte outil et la broche de la machine outil (figure 2.22).

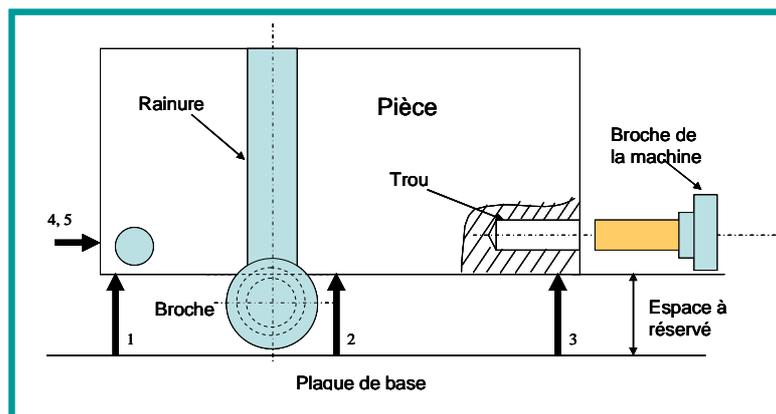


Figure 2.22 Espace correspondant au porte outil et à la broche machine

Pour ce qui est des éléments technologiques d'appui secondaire et tertiaire, il faut faire attention à leurs éléments de liaison avec la plaque de base qui peuvent empêcher l'accessibilité des outils de coupe aux entités d'usinage qui se trouvent à leurs voisinages comme dans l'exemple (figure 2.23). Dans ce cas, il faut éloigner au maximum les éléments de liaison qui se trouvent au voisinage des entités d'usinage.

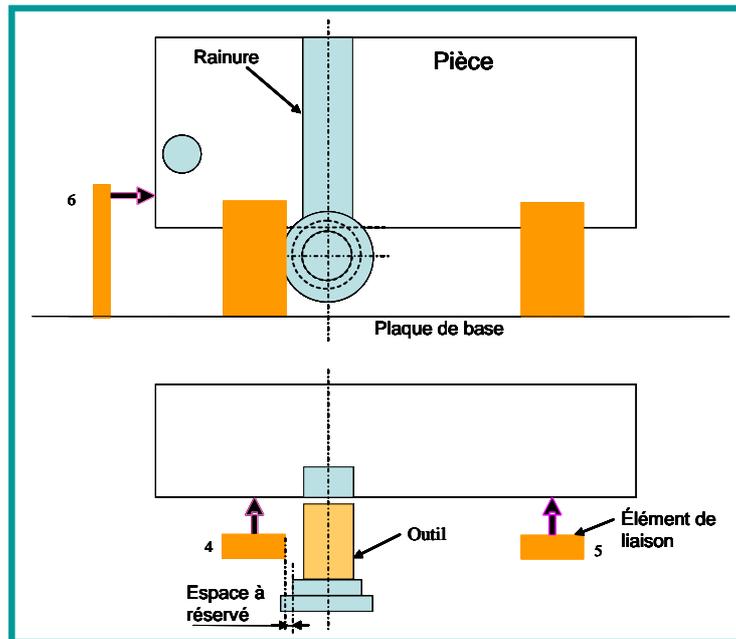


Figure 2.23 Espace à réserver entre les éléments de liaison et les portes outils

Aussi pour les touches d'appui qui se situent dans des plans perpendiculaire au plan de l'entité d'usinage, il faut garantir la non-collision de ces derniers avec les outils de coupe comme c'est montré dans la figure (2.24). Dans ce cas il faut toujours s'assurer que le corps de la touche ne rentre pas en collision avec l'outil de coupe.

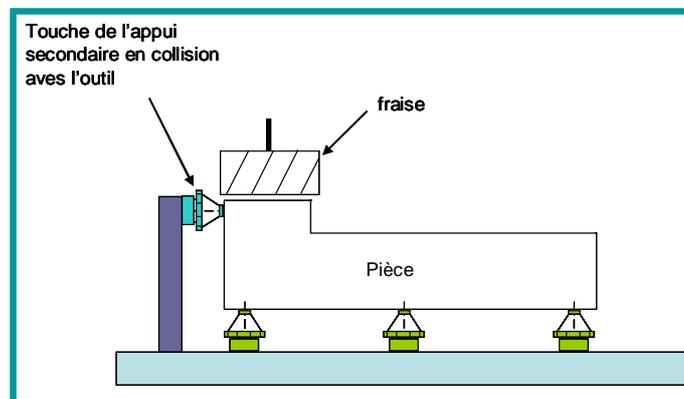


Figure 2.24 Cas de collision entre l'outil et la touche d'appui

3.4.1.8 Placement du système de bridage en respectant l'accessibilité

Les éléments de bridage occupent un espace qui se situe généralement dans l'espace de travail des outils de coupe. Les risques de collision avec ceux-ci sont élevés. Les emplacements des éléments de bridage sont choisis en conservant l'accessibilité aux entités d'usinage. Dans notre étude on s'intéresse uniquement au bridage de mode bride qui exerce un effort opposé à l'appui prépondérant. Le dispositif de bridage est alors placé en face de l'appui prépondérant. La bride est liée à la plaque de base par

un dispositif constitué d'un pied de bride et d'un tirant de serrage. Pour l'usinage 3 axes et lorsque la direction d'usinage est parallèle à la direction de posage de l'appui prépondérant seules les brides qui peuvent empêcher l'accessibilité des outils de coupe aux entités d'usinage (figure 2.25a). Lorsque la direction d'usinage est perpendiculaire à la direction de posage de l'appui prépondérant, généralement il n'y a aucun problème de collision entre l'outil de coupe et le système de bridage car l'espace de travail des outils de coupe ne se croise pas avec le système de bridage (figure 2.25b). Pour l'usinage 4 axes il y a un fort risque de collision entre les outils de coupe et les brides et aussi entre les outils de coupe et les pieds de bride et les tirants (figure 2.25c).

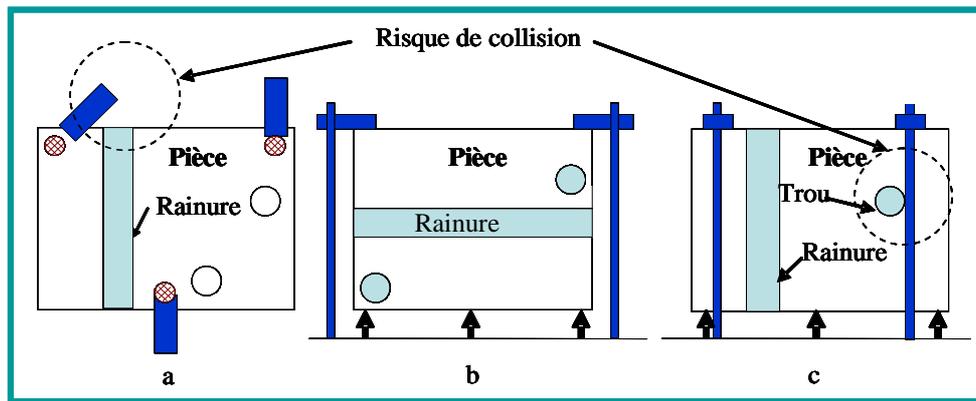


Figure 2.25 Les risques de collision entre les outils de coupe et le système de bridage

Les lieux potentiels de bridage représentés par les petits cônes, sur tout le contour des carreaux plans de la zone de bridage (figure 2.10) issus de l'architecture de la gamme d'usinage nous garantissent l'existence d'une solution de bridage. C'est à dire qu'il n'y a pas de collision entre le dispositif de bridage et l'espace de travail des outils de coupe. Il suffit juste de déterminer le nombre de bride en fonction de l'effort de bridage à appliquer sur la pièce et en fonction de l'espace disponible pour placer le système de bridage.

3.4.2 Existe-il un espace de solution suffisant sans trop de chevauchement entre les tâches de la sous-phase

Après avoir découpé le problème de la conception du montage d'usinage des autres tâches de la sous-phase en fonction des informations disponibles et en l'absence de toutes les données réelles. La question est : est ce qu'il existe un espace de solution suffisant sans trop de chevauchement entre les tâches de la sous-phase ?

L'espace a été conçu en l'absence du diamètre de la fraise, du nombre de dents, de l'excentration, de l'angle d'attaque, du matériau de l'outil et de la trajectoire de travail des outils de coupe. La solution sera pertinente si le choix par la suite de ces paramètres ne remet pas en cause la solution générale retenue. Il faut être capable de connaître le degré d'influence de ces paramètres sur la solution retenue. Jusqu'à quelle limite vont-ils perturber la solution et comment peut-on remédier pour limiter les conséquences ?

Pour que notre stratégie soit valide, il faut que :

- Notre espace de solution formé par le couple outil/trajectoire, des éléments technologiques d'appui et de bridage placés sur la pièce et reliés à la plaque de base soit suffisant,
- Et que la solution globale peut se faire sans trop de chevauchement entre les tâches de la sous-phase.

Il faut rappeler qu'on ne cherche pas la solution optimale mais plutôt l'obtention d'une solution pertinente est suffisante.

Voyant maintenant l'influence de chaque paramètre et comment on peut minimiser les chevauchements existants. On doit dialoguer avec les différentes tâches pour avoir une idée qui nous permettent de savoir comment ces paramètres sont choisis et quelles sont leurs limites afin de prendre les précautions nécessaires et de s'assurer qu'ils ne vont pas perturber notre solution par la suite.

3.4.2.1 Le diamètre de la fraise

Le diamètre de la fraise affecte la puissance de la machine, la position de la fraise par rapport à la pièce, l'engagement et la sortie de l'arête de coupe, la relation entre les paliers de la broche et le diamètre de la fraise et, dans certains cas aussi, l'état de surface. En règle générale, il faut choisir un diamètre de fraise égal à 1,2-1,5 fois la largeur de coupe (figure 2.26).

Le choix du diamètre d'une fraise est guidé, en règle générale, par les dimensions de la pièce et, plus spécialement, sa largeur. Mais s'il y a ici souvent un premier obstacle au niveau de la détermination de la puissance nécessaire compte tenu de celle effectivement disponible. Il existe également d'autres facteurs très importants pour que l'opération se déroule dans de bonnes conditions. À savoir, la position de la fraise et le type de contact entre ses dents et la pièce.

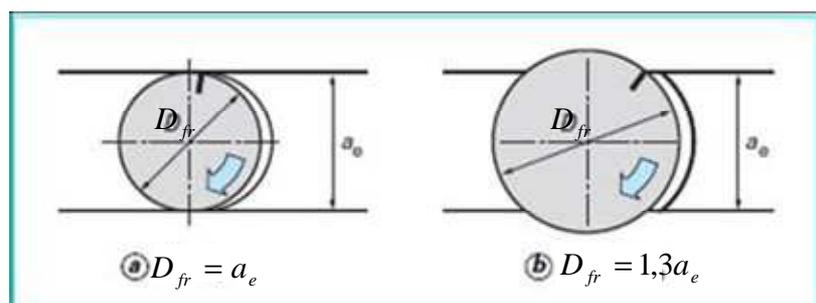


Figure 2.26 Rapport diamètre de fraise/largeur de coupe

Dans le cas de très grandes surfaces, il peut être nécessaire d'opérer en plusieurs passes (figure 2.27). L'épaisseur des copeaux, au début et à la fin de la coupe, est affectée par le diamètre et la position de la fraise. Si le diamètre est le même ou un peu plus grand que la largeur de la pièce, des copeaux trop minces se formeront en ces deux points, ce qui présentera les mêmes inconvénients que dans le cas d'une avance insuffisante par dent.

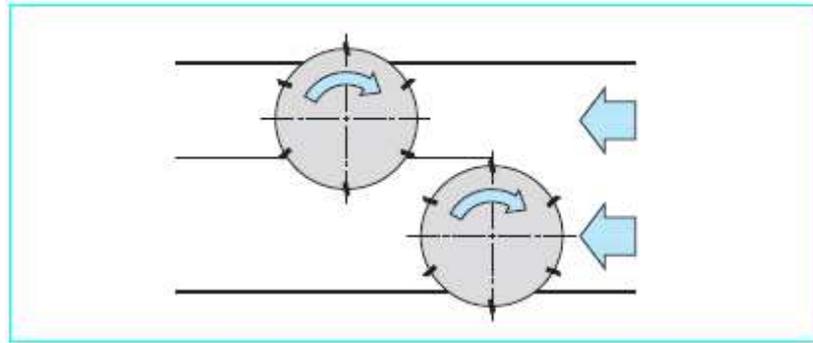


Figure 2.27 Surfaçage en deux passes

Le système de bridage peut contraindre le diamètre de la fraise (figure 2.28). La solution exige de laisser une marge entre le nez de bride et la fraise.

On voit bien que le diamètre de la fraise à surfaçer dépend de la largeur de coupe et se trouve dans un intervalle bien défini ce qui présente peut de chevauchement entre la conception du montage d'usinage et le choix de l'outil de coupe.

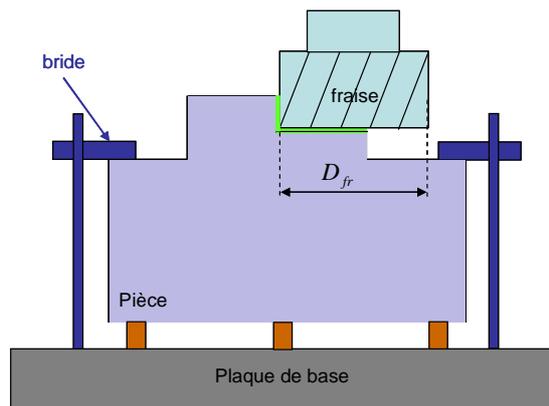


Figure 2.28 Si on peut respecter la règle 1,2 à 1,5 du diamètre de la fraise sinon on place les brides dans d'autres endroits

3.4.2.2 Le nombre de dents de la fraise

Les fraises étant des outils à arêtes multiples et qui ont un nombre variable de dents (z), déterminé pour chaque type d'opération par divers facteurs. La matière et les dimensions de la pièce, la stabilité, la finition de la surface et la puissance disponible sont des facteurs plus spécialement liés à la machine et à la méthode d'usinage, tandis que ceux dépendant de l'outil incluent une avance par dent suffisante, un minimum de deux arêtes simultanément engagées et une bonne capacité d'évacuation des copeaux.

3.4.2.3 L'angle d'attaque

L'angle d'attaque est l'un des indicateurs essentiels en ce qui concerne les différents types de fraises à surfacer. C'est là également où le choix diverge entre la fraise à surfacer proprement dite ou la fraise à surfacer-dresser. S'il est nécessaire d'exécuter un dressage, la fraise choisie doit obligatoirement avoir un angle d'attaque de 90°.

3.4.2.4 Le matériau de l'outil de coupe

Le matériau de l'outil affecte directement les efforts de coupe et ainsi la puissance consommée. Généralement on utilise soit les outils en acier rapide ou en carbure métallique. L'utilisation des outils de coupe en carbure métallique fait augmenter les efforts de coupe.

3.4.2.5 La trajectoire d'outil

Puisqu'on travaille avec des machines outils à commande numérique très performantes dont les déplacements sont commandés sans jeu, on peut recourir au fraisage en avalant car il offre un meilleur état de surface. On peut toujours faire des vérifications si la direction du fraisage en opposition présente un cas qui peut remettre en cause la solution.

3.4.2.6 Le positionnement de la fraise

Le début et la fin de la coupe sont des points importants au niveau de la définition de l'opération de fraisage. Il est important de parvenir à un rapport correct entre la direction de l'avance, le sens de rotation et l'épaisseur de copeau quel que soit le type de fraisage. La position de la fraise par rapport à la pièce est un autre élément important. Ces facteurs doivent donc être correctement déterminés, tout spécialement en surfacage où la marge de manoeuvre est la plus grande. En surfacage, la largeur de la pièce a une influence sur le choix de la taille de la fraise.

Le contact initial entre l'arête de coupe et la pièce est un élément critique, où les facteurs déterminants sont la géométrie de coupe, la position de la fraise et sa taille (figure 2.29).

Le diamètre d'une fraise à surfacer doit être au moins supérieur de 25 % que la largeur de la pièce et le choix prioritaire doit être le fraisage en avalant. On choisit un engagement immédiat à pleine profondeur de coupe pour éliminer les problèmes dus aux copeaux trop épais en fin de coupe. Il est en effet toujours préférable d'avoir ici des copeaux plus minces qui imposent de moindres contraintes à l'arête de coupe.

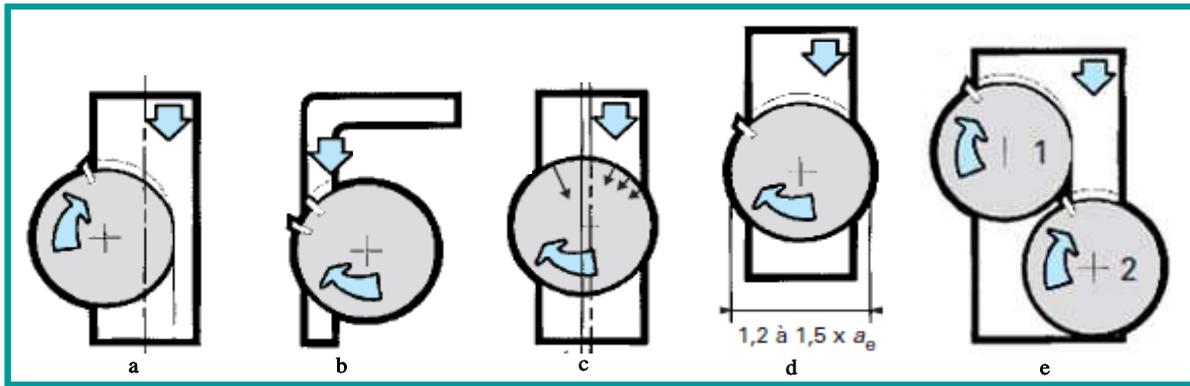


Figure 2.29 Les positionnements préférables de la fraise en surfacage

3.4.3 Choix des efforts de coupe les plus pénalisant en intensité et direction

Les opérations d'usinage regroupées dans la même sous-phase sont généralement exécutées de manière séquentielle. Les actions exercées par l'outil sur chaque entité d'usinage engendrent des efforts de coupe qui sont modélisés par un torseur qui évolue en intensité et en direction le long de la trajectoire suivie par cet outil. La direction de ces efforts de coupe dépend de la trajectoire retenue. Les efforts de coupe des opérations d'ébauche sont retenus dans les calculs car ils génèrent des efforts plus importants que les opérations de finition. Aussi il faut tenir compte des efforts qui tendent à déstabiliser la pièce et à la déformer afin de prendre les précautions nécessaires de point de vue fixation de la pièce. Tous les efforts de faible intensité ne seront pas pris en considération comme les efforts engendrés par les opérations d'alésage à l'aide d'un alésoir ainsi que les efforts de taraudage s'ils sont appliqués au même point et avec la même direction.

3.4.4 Détermination des efforts de bridage à appliquer sur la pièce

Après avoir calculé les efforts de coupe engendrés par les outils de coupe dans les différentes opérations d'usinage, il faut déterminer les efforts de bridage réalistes qui vont s'appliquer sur la pièce pour assurer sa stabilité durant tout le processus d'usinage.

L'équilibre de la pièce dans le référentiel de la machine-outil est assuré avant et pendant l'usinage. Cette condition est traduite par l'équation 2.6. Nous recherchons l'intensité de l'effort de bridage minimal qui garanti l'équilibre de la pièce.

$$\{\tau_{posage}\} + \{\tau_{bridage}\} + \{\tau_{coupe}\} = \{0\} \quad (2.6)$$

Cet effort minimal est déjà calculé pendant la génération de la prise de pièce. Il garantit l'équilibre limite sous certaines conditions. Dans la pratique l'intensité de serrage demeure dans une marge entre une valeur minimale et une valeur maximale. La restriction de la force de bridage à une valeur minimale aide à réduire la possibilité du bridage insuffisant. D'autre part, la limite maximale aide à réduire le risque du serrage excessif. Par conséquent la déformation de la pièce peut être réduite au minimum en limitant les forces de serrage. Les forces de bridage

minimales et maximales fourniraient une directive pour les opérateurs au moment du serrage de la pièce sur le montage d'usinage.

L'effort minimal qui garanti l'équilibre de la pièce est donné, mais ce n'est pas cet effort qu'on doit utiliser dans nos calculs mais plutôt l'effort maximal qui sera appliqué sur la pièce à travers le dispositif de bridage.

L'effort pratique qui sera appliqué réellement est déterminé en fonction des brides utilisées car chaque bride à un effort de serrage qu'elle peut appliquer. La résultante des efforts de bridage est la somme des efforts de l'ensemble des brides utilisées.

3.5 Stratégie globale de résolution retenue

Après avoir découplé le problème de la conception du montage d'usinage et estimé qu'il peut exister un espace solution suffisant sans trop de chevauchement entre les différentes tâches de la sous-phase, et après avoir prédit les efforts de coupe en intensité et direction et déterminer les efforts de bridage capable d'assurer l'équilibre de la pièce avant et pendant l'usinage, il faut trouver une stratégie globale qui englobe les différentes approche afin d'avoir une méthodologie de conception du montage d'usinage.

Notre démarche générale de conception du montage d'usinage modulaire pour le fraisage passe par trois étapes qui sont montrés dans l'organigramme de la figure 2.30.

Nous avons les données issues de l'architecture de la gamme d'usinage comme la cinématique de la machine outil, l'orientation de la pièce dans le repère de la machine-outil, la liste des opérations d'usinage à effectuer et l'entité de la prise de pièce avec tous ses attributs. De plus, nous disposons d'une base de données comportant l'ensemble des informations sur les éléments modulaires. Ces informations vont nous permettre de prédire les efforts de coupe qui agissent sur la pièce au cours de l'usinage et ainsi évaluer les efforts de bridage à appliquer sur la pièce.

En sortie, nous désirons obtenir un montage d'usinage complètement conçu dans un environnement CFAO. De plus, nous souhaitons générer l'ensemble des informations concernant l'utilisation du montage d'usinage.

Pour passer des informations d'entrées aux résultats de sorties on doit dans un premier temps choisir les éléments technologiques qui assurent le posage et le bridage tout en respectant les contraintes de qualité et d'accessibilité.

Puis dans un deuxième temps procéder au placement de ces éléments technologiques sur la pièce en respectant toujours les contraintes de qualité, de stabilité et d'accessibilité.

Finalement il faut choisir les éléments technologiques de liaison avec la plaque de base et assembler le tout pour avoir le montage d'usinage prêt à l'utilisation.

Cette stratégie à trois niveaux est justifiée par le fait que le contact ou bien la liaison entre la pièce et le montage d'usinage se fait au niveau des points d'appui et de bridage. Car d'après Siebenaler [Sieo6], 98% de la déformation du système pièce-montage se produit au niveau des points d'appui. Le calcul de l'équilibre de la pièce prend en compte les éléments en contact avec la pièce. Ainsi les calculs de déplacement de la pièce se font par rapport aux éléments en contact avec la pièce car les éléments de liaison et la plaque de base sont toujours considérés comme rigides n'est supposée que supportée l'ensemble. Donc elle ne subit pas de déformation. Le choix et le placement des éléments en contact avec la pièce a une influence directe sur la qualité et sur le comportement mécanique de la pièce. Une fois les éléments en contact avec la pièce choisis et placés, il faut les maintenir dans cette position grâce aux éléments de liaison et à la plaque de base pour former un ensemble rigide et cohérent.

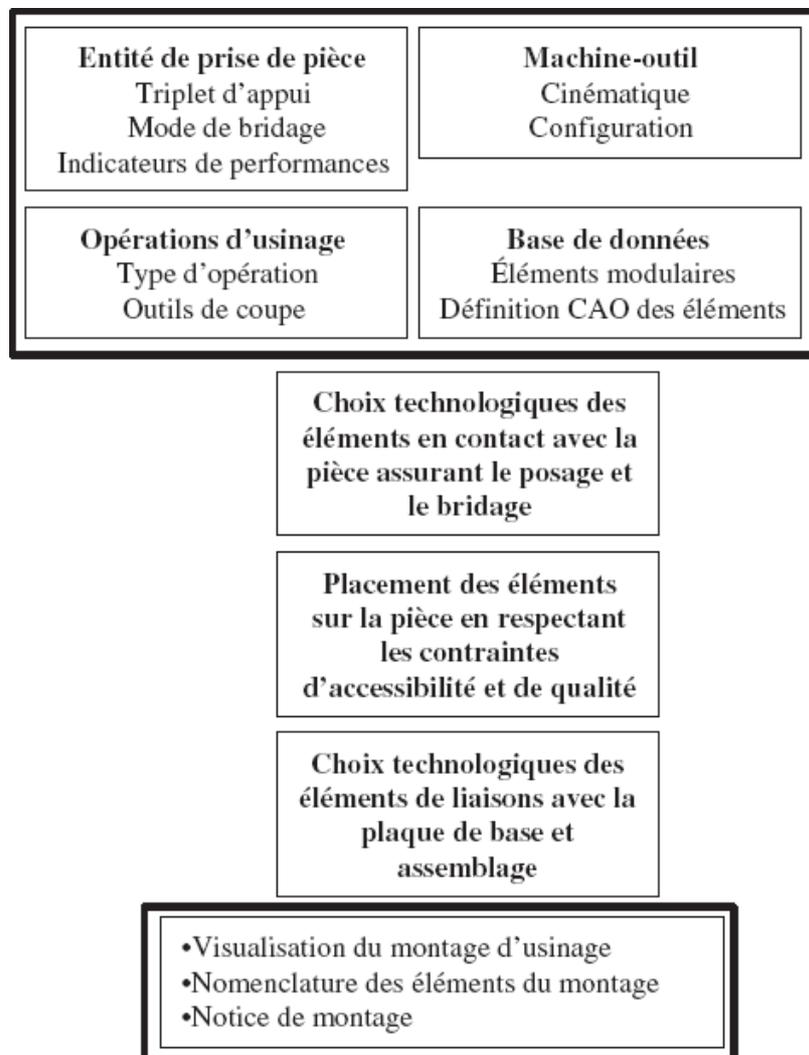


Figure 2.30 Les différentes étapes de conception d'un montage d'usinage. [Zir07]

3.5.1 Les sorties de notre système

Après calculs, notre système doit être capable de fournir les éléments de sorties suivantes :

- Matérialisation du montage d'usinage. A la sortie on aura le montage d'usinage complet prêt à l'utilisation sur la machine outil.
- Visualisation du montage d'usinage. On pourra visualiser l'ensemble du montage d'usinage avec la pièce sur l'interface CAO.
- Nomenclature des éléments modulaires du montage. La liste des éléments modulaires sélectionnés pour le montage d'usinage en question.

3.5.2 Validation de la solution finale

La validation de la solution de conception du montage d'usinage retenue est nécessaire pour s'assurer qu'elle est pertinente et qu'elle ne sera pas remise en cause par la suite. Il faut vérifier que les déformations locales et globales de la pièce restent dans le domaine toléré et s'assurer que la qualité est bien respectée après usinage par un calcul de déplacement de la pièce sur ses appuis. Un calcul d'équilibre permet de s'assurer de la stabilité de la pièce au cours de l'usinage. Aussi avec une simulation de la trajectoire des outils, il faut s'assurer que les outils n'entrent pas en collision ni avec la pièce, ni avec les éléments du montage d'usinage. Il faut noter qu'au moment de la simulation de la trajectoire d'outil, il faut que l'outil soit bien défini avec les dimensions réelles. En dernier lieu une validation sur un logiciel adéquat de simulation permet de valider la solution finale.

CHAPITRE 3 :

DEMARCHE DE CONCEPTION DU MONTAGE D'USINAGE

1 Introduction

Après avoir défini la méthodologie de conception du montage d'usinage et retenu une stratégie de résolution dans le deuxième chapitre, ce troisième chapitre sera consacré à la concrétisation de cette méthodologie de point de vue pratique. Dans la première partie de ce chapitre on va traiter la sélection des éléments technologiques en contact avec la pièce tandis que dans la deuxième partie on va concrétiser la stratégie pour placer ces éléments technologiques sur la pièce. La dernière partie sera consacrée au choix des éléments technologiques de liaison avec la plaque de base et à l'assemblage de l'ensemble constituant le montage d'usinage prêt à l'utilisation.

2 Sélection des éléments technologiques en contact avec la pièce

2.1 Sélection de la plaque de base

Selon la technologie utilisée, la plaque de base peut être à trous (ex : Norelem) utilisée dans notre cas (figure 3.1) ou à rainure utilisée dans d'autres technologies (ex : Halder). Elle peut aussi être sous forme d'une équerre ou d'un cube. Le type de machine outil ou du centre d'usinage utilisé conditionne le choix de la plaque de base pour quelle soit horizontale ou verticale (équerre). La plaque de base à trous est caractérisée par le diamètre D_1 de ses trous taraudés (M6, M10, M16, ...etc.) et l'intervalle T qui existe entre les trous de la trame ainsi que les autres dimensions

comme la longueur A, largeur B et l'épaisseur E_b . Pour le même diamètre des trous taraudés on trouve plusieurs dimensions en longueur, largeur et épaisseur.

La plaque de base est d'abord choisie selon la taille de la pièce, les éléments du montage d'usinage et la machine outil utilisée. Elle doit être assez grande pour supporter la pièce et toutes les composantes du montage d'usinage. Une fois la plaque de base choisie, tous les autres éléments du montage sont automatiquement déterminés en fonction de leurs caractéristiques dimensionnelles qui doivent être compatibles avec ceux de la plaque de base choisie.

2.2 Orientation et positionnement de la pièce sur la plaque de base

Deux systèmes de coordonnées sont utilisés pour représenter la position et l'orientation de la pièce [Dai97] ainsi que n'importe quel autre élément du montage d'usinage par rapport à la plaque de base (figure 3.1). Le système de coordonnées locales $O_p(X_p, Y_p, Z_p)$ associé à la pièce ou bien $Oe_i(Xe_i, Ye_i, Ze_i)$ associé aux éléments du montage d'usinage et le système de coordonnées global $O_b(X_b, Y_b, Z_b)$ associé à la plaque de base. Si on ne considère que la rotation autour de l'axe Z, la matrice de rotation est exprimée par M_R (3.1). La translation par rapport à la plaque de base est exprimée par la matrice M_T (3.2). La position et l'orientation peuvent être réalisées dans le repère global par la matrice de passage $M_p = M_R \cdot M_T$ (3.3).

α est l'angle de rotation du repère locale lié à la pièce ou à un élément du montage par rapport au repère globale lié à la plaque de base.

$$M_R = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$M_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & t_z & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$M_p = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & t_z & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & t_z & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

t_x , t_y et t_z sont les déplacements du repère local suivant les axes X, Y et Z du repère global.

Pour exprimer les coordonnées locales de la pièce ou d'un élément du montage dans le repère global, il suffit de passer par la matrice de passage M_p (3.4).

$$M_p = [X_b \ Y_b \ Z_b \ 1]^T = [x_p \ y_p \ z_p \ 1]^T \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & t_z & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

La pièce est orientée sur la plaque de base selon le posage considéré. Le plan de l'appui prépondérant doit être parallèle à la face supérieure de la plaque de base.

Le positionnement et l'orientation de la pièce sur la plaque de base dépendent en grande partie de la configuration de la machine outil et de sa cinématique. Elles dépendent aussi de la direction d'approche de l'outil pour usiner chaque entité. On doit aussi tenir compte des courses de la machine. Il est souhaitable de placer la pièce au plus près de la plaque de base. Il est cependant nécessaire de penser aux risques de collision entre la broche ou l'outil de coupe et le montage d'usinage. De plus, les éléments ne coïncident pas toujours avec les trous de la plaque de base. Il est donc nécessaire de laisser un espace suffisant pour les éléments de liaison entre les éléments en contact avec la pièce et la plaque de base.

Dans un premier temps, il faut déterminer la hauteur de la pièce par rapport à la plaque de base. Cette hauteur n'est pas définitive, elle peut être ajustée par la suite. Le positionnement exact dans le plan $X_b O Y_b$ vient par la suite une fois les éléments d'appui et de bridage en contact avec la pièce sont choisis et placés.

La pièce peut être montée directement sur la plaque de base ou soulevé par des supports d'appui ou par des consoles carrée pour une hauteur plus importante.

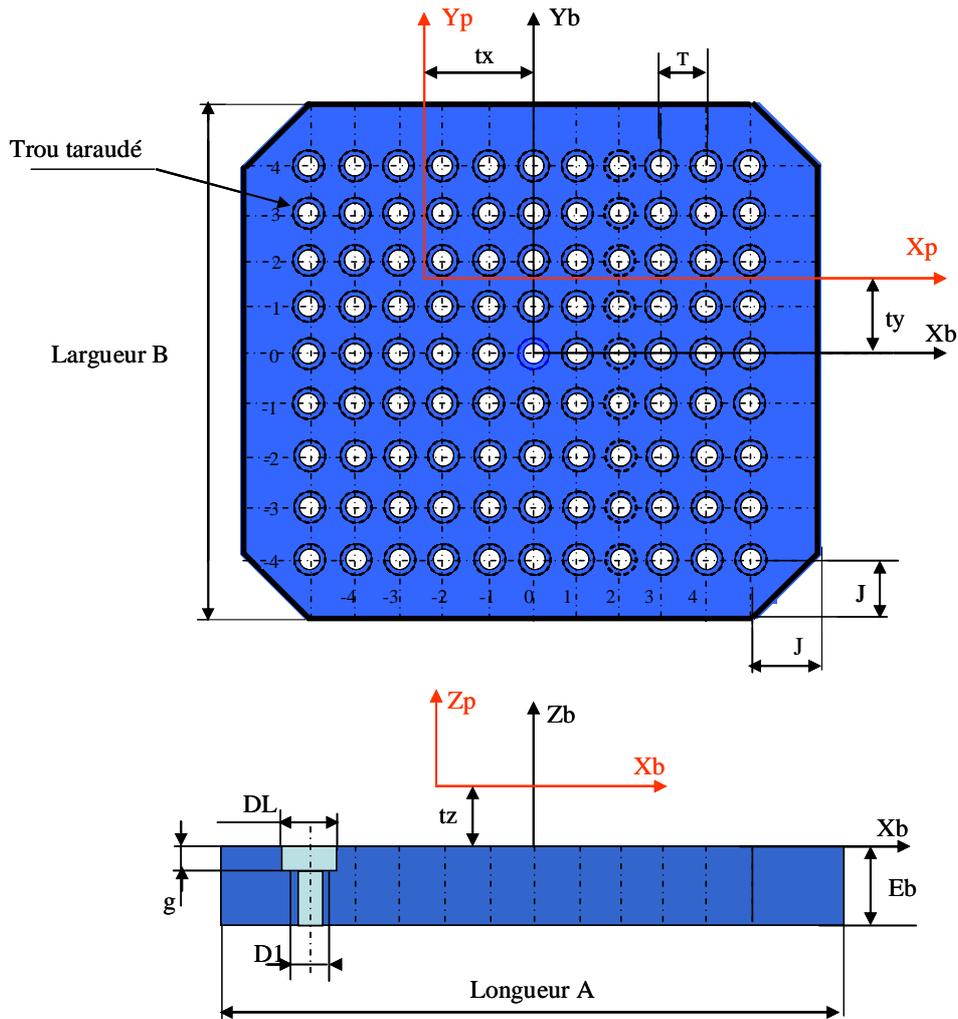


Figure 3.1 Plaque de base à trous.

2.2.1 Positionnement de la pièce en hauteur

Pour positionner la pièce en hauteur par rapport à la plaque de base, il faut considérer quatre aspects :

- Le type d'usinage (3 axes, 4 axes),
- La direction d'usinage,
- La direction de posage de l'appui prépondérant par rapport à la direction d'usinage,
- La géométrie de l'appui prépondérant.

Pour l'usinage sur machine 3 axes, si la direction de posage de l'appui prépondérant est parallèle à la direction d'usinage, la pièce peut être placée directement sur la plaque de base car les usinages se font sur la partie supérieure à l'appui prépondérant. Par contre si la direction de posage de l'appui prépondérant est perpendiculaire à la direction d'usinage, la pièce doit être soulevée d'une distance suffisante afin de respecter l'espace de travail des outils de coupe et de la broche de la machine.

Pour l'usinage sur machine 4 axes, la direction de posage de l'appui prépondérant est perpendiculaire à la direction d'usinage et de ce fait la pièce doit être distante de la plaque de base afin de respecter l'espace de travail des outils de coupe et de la broche de la machine.

En ce qui est de la géométrie de l'appui prépondérant, il peut être composé soit d'une seule surface, soit de plusieurs surfaces qui se trouvent à des niveaux différents par rapport à l'origine du repère de posage mais de normales parallèles (figure 3.2). En plus la surface d'appui peut être totalement libre ou bien encombrée dans la direction perpendiculaire à la direction d'appui. Pour le savoir un plan de référence de la pièce par rapport aux surfaces d'appui de l'appui prépondérant doit être établi afin de déterminer la hauteur des éléments d'appui et estimer la hauteur par rapport à la plaque de base. Ce plan de référence n'est que le plan de la surface inférieure d'une boîte qui englobe la pièce.

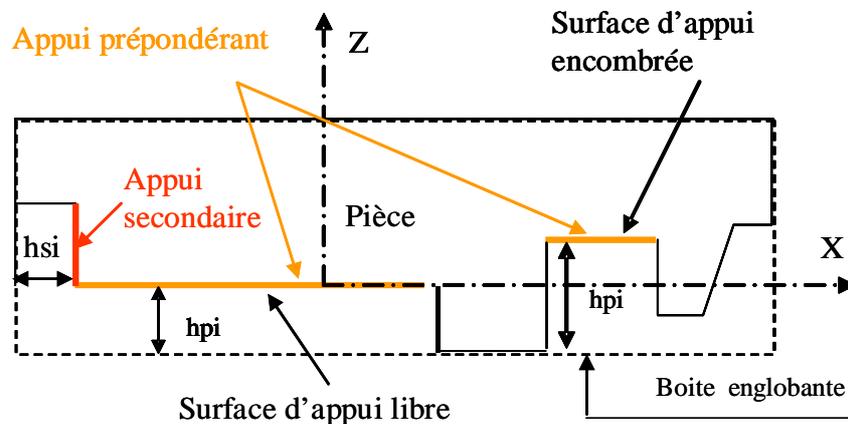


Figure 3.2 Géométrie de l'appui.

Si l'appui est totalement libre ($h_{pi} = 0$), la pièce peut être posée directement sur la plaque de base sans support d'appui si rien n'empêche. Si l'appui est encombré dans la direction perpendiculaire à la direction d'appui ($h_{pi} \neq 0$), on utilise soit des touches d'appui seules si leur hauteur est supérieure à h_{pi} sinon avec des supports d'appui. Si la valeur de h_{pi} est très grande on utilise des consoles carrées pour augmenter la rigidité du montage d'usinage.

2.2.2 Positionnement de la pièce sur le plan XOY de la plaque de base

Le positionnement de la pièce sur le plan X_bOY_b de la plaque de base dépend du type de la machine outil utilisée, des directions d'usinage, des entités d'usinage et des courses de la machine outil. Pour l'usinage 3 axes, si la direction de posage de l'appui prépondérant est parallèle à la direction d'usinage la pièce peut être positionnée de telle manière que les entités d'usinage soient à l'intérieur des courses de la machine outil (figure 3.3a). Par contre si la direction de posage de l'appui prépondérant est perpendiculaire à la direction d'usinage, la pièce peut être positionnée le plus proche possible du bord de la plaque de base du côté de l'entité d'usinage (figure 3.3b). Pour

l'usinage 4 axes, la pièce peut être positionnée au milieu de la plaque de base si toutes les faces vont être usinées, sinon on positionne par rapport aux entités d'usinage qui vont être exécutées (figure 3.4).

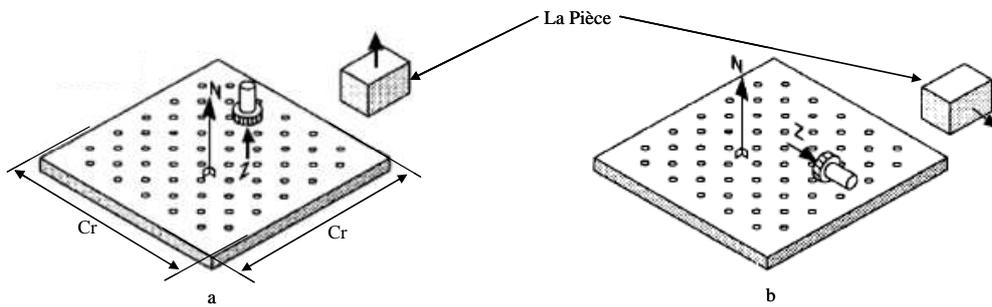


Figure 3.3 Positionnement de la pièce pour l'usinage 3 axes.

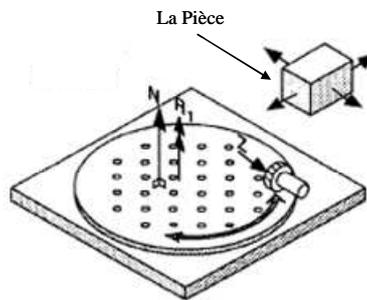


Figure 3.4 Positionnement de la pièce pour l'usinage 4 axes.

2.3 Choix des éléments d'appui en contact avec la pièce

Selon le type de la surface d'appui, il existe plusieurs types d'éléments technologiques modulaires pour positionner la pièce. Pour les surfaces d'appui cylindriques on utilise les vés et les centreurs, pour les surfaces d'appui planes on utilise les réglettes d'appui, et pour les surfaces d'appui brutes ou de mauvaise qualité on utilise les appuis localisés. Dans ce travail, nous nous intéressons au cas des points d'appui localisés avec le mode de bridage de type bride. Durant cette étape, nous devons choisir les éléments technologiques en contact avec la pièce qui doivent assurer l'appui prépondérant puis les éléments technologiques qui doivent assurer les appuis secondaires et tertiaires. Dans certains cas, il est judicieux d'utiliser des éléments assurant partiellement l'appui prépondérant et l'appui secondaire.

2.3.1 Les différents types de contact pour les éléments technologiques d'appui

Il existe les touches d'appui à contact plan qui sont utilisées généralement lorsque la surface d'appui est une surface de bonne qualité (surface laminée, surface étirée, surface usinée ou surface finie) et les efforts de bridage sont assez importants. Les touches d'appui à contact bombées sont utilisées quand la surface d'appui est de mauvaise qualité (surface moulée, surface forgée, surface ébauchée).

Les touches striées sont utilisées en générale lorsqu'il est nécessaire d'améliorer le coefficient de frottement par création d'obstacle au glissement par déformation plastique de la surface d'appui de la pièce au droit de la touche striée. Cette solution peut être retenue si les déformations générées par les appuis n'influent pas sur la qualité ou disparaissent ensuite par usinage.

Pour les touches planes et striées (figure 3.5a et 3.5b), la partie en contact avec la pièce est caractérisée par le diamètre D tandis que pour les touches bombées (figure 3.5c), la partie en contact avec la pièce est caractérisée par le rayon R de la partie supérieure de la touche. La forme et les autres dimensions des touches dépendent essentiellement de l'étendue de l'appui ainsi que de l'accessibilité aux surfaces d'appui.

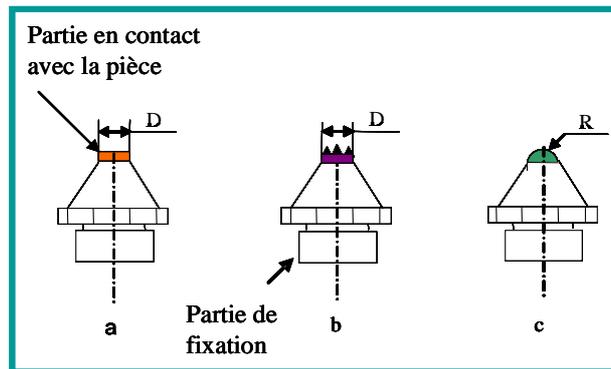


Figure 3.5 Les différents types de contacts utilisés pour les appuis.

2.3.2 Formalisation des connaissances pour le choix des éléments technologiques d'appui

Le choix des éléments technologiques en contact avec la pièce est essentiellement issu de règles expertes. Ces règles sont formalisées pour répondre aux contraintes de qualité, d'accessibilité et de comportement mécanique. Le résultat final repose sur un compromis entre ces différentes contraintes. Il est essentiellement fonction :

- De la qualité de la surface d'appui,
- Du type d'opérations d'usinage,
- De l'état de la surface d'appui (brute, ébauchée ou finie),
- De l'accessibilité,
- Des caractéristiques mécaniques de la matière de la pièce,
- De la rigidité de la pièce,
- De la direction des efforts encaissés par les points d'appui,
- Du défaut d'orientation de la surface d'appui.

Nous faisons l'hypothèse que la pièce est considérée comme un solide indéformable. On ne considère que les déformations dites locales dues à la pression de contact entre la pièce et le montage d'usinage sous l'influence des efforts de coupe et de bridage. En ce qui concerne les déformations globales de la pièce dues aux efforts de coupe on les considère comme locales et n'affectent pas la totalité de la pièce et reste au voisinage de la surface usinée.

2.3.2.1 La qualité de la surface d'appui

Le contact entre la pièce et les éléments de mise en position n'est pas parfait. En effet, les différents défauts (état de surface, défaut de forme) des surfaces d'appui perturbent la position de la pièce dans le référentiel de la machine-outil.

Il faut que toutes les déformations subies par la pièce au droit des points d'appui sous l'action des efforts de bridage restent dans l'espace toléré par les indicateurs de qualités. Si les indicateurs de qualité sont très larges, la qualité sera forcément respectée sans problème. Dans le cas contraire il faut choisir des éléments d'appui qui minimisent le défaut de positionnement qui sera illustré par la suite.

Les appuis peuvent être réalisés sur une surface brute de mauvaise qualité : moulée, forgée, laminée ou sur une surface de bonne qualité : usinée ou étirée. Pour respecter les règles de l'isostatisme en éliminant les six degrés de liberté de la pièce dans le référentiel de la machine outil et pour respecter la qualité et éviter les déformations, il est préférable de localiser les points d'appui lorsque les surfaces d'appui sont de mauvaise qualité. De plus lorsque l'appui est obtenu à l'aide de plusieurs géométries de la pièce, il est difficile de réaliser un appui sur toute l'étendue de la surface d'appui.

2.3.2.2. Le type d'opérations d'usinage

Au sein d'une sous-phase il peut y avoir plusieurs opérations différentes. Chaque opération est typée (ébauche, 1/2 finition et finition). De plus, la surépaisseur de matière à enlever est connue. Cette information nous permet de prédire avec un degré de certitude suffisant les efforts de coupe exercés par l'outil sur la pièce. On considère l'opération qui génère les plus grands efforts de coupe à condition que ces efforts soient opposés aux appuis.

2.3.2.3 L'état de la surface d'appui

Le choix des éléments technologiques d'appui dépend du type de surface d'appui si elle est brute, ébauchée ou finie. Pour les surfaces ébauchées ou finies, si le marquage n'est pas toléré, on ne peut pas utiliser les touches bombées si la pression de contact est supérieure à la pression admissible de la surface de contact. De même les touches striées ne peuvent pas être utilisées car ils laissent des marques assez importantes sur les surfaces même si la pression de contact est inférieure à la pression admissible.

2.3.2.4 L'accessibilité

Le type de contact n'est pas pris en compte dans l'accessibilité mais plutôt la forme de la touche et ses dimensions. Car pour le même type de contact on trouve plusieurs configurations de point de vue géométrique et dimensionnel (tête d'appui (figure 3.6a), tête d'appui à embase (figure 3.6b), pied fileté (figure 3.6e, figure 3.6g), colonne d'appui femelle (figure 3.6c, 3.6d), appui (figure 3.6f), pied de position (figure 3.6i), support d'appui réglable (figure 3.6h).

La sélection de la touche d'appui est fonction de l'accessibilité suivant la direction d'appui et suivant la direction perpendiculaire à la direction d'appui ainsi que suivant l'étendue de la surface d'appui [Li99a]. Lorsque la surface d'appui est totalement libre ($h_{pi} = 0$), le choix de la touche est conditionné uniquement par la hauteur de la

De la même façon, pour l'appui secondaire et tertiaire, lorsque l'appui fait appel à une surface plane et que cette surface n'est pas du tout encombrée par une surface de direction perpendiculaire à la direction d'appui ($h_{si} = 0$), il est possible d'utiliser des pieds de position qui se montent directement sur la plaque de base. Par contre si l'appui est encombrés par une surface de direction perpendiculaire à l'appui et en fonction de l'étendue de l'appui, il est possible d'utilisent des butées à vis réglable.

2.3.2.5 La rigidité de la pièce

La pression de contact au droit des points d'appui doit rester compatible avec les caractéristiques mécaniques du matériau pour éviter les déformations permanentes. Ces déformations ne sont pas rédhibitoires si la surface d'appui est usinée par la suite. Par contre, les déformations devront dans tous les cas être compatibles avec la qualité d'appui demandée.

Pour le calcul de la pression de contact, la théorie de Hertz est couramment utilisée en mécanique.

Avant le calcul de la pression de Hertz, il faut déterminer les dimensions des éléments d'appui pour avoir le rayon de courbure du contact bombé.

La théorie de Hertz permet de déterminer :

- les dimensions de la surface de contact,
- le rapprochement des deux solides en contact,
- la pression de contact maximale,
- les contraintes engendrées en surface et en profondeur.

Pour la théorie de Hertz, deux solides sont en contact ponctuel (figure 3.8) lorsqu'ils sont tangents en un point ou suivant un segment de droite [Aub92], [Aga86].

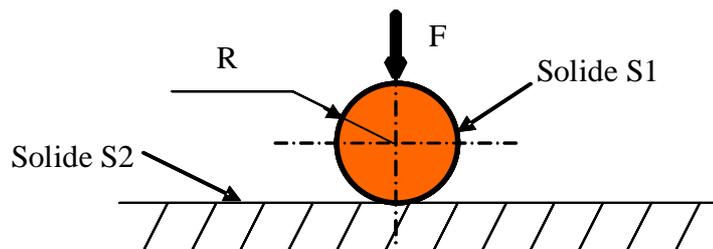


Figure 3.8 Deux solides en contact ponctuel.

Les hypothèses associées à la théorie de Hertz suppose que :

- L'aire de contact est très petite par rapport aux surfaces latérales respectives des solides en contact ;
- Les corps sont semi-infinis ;
- Les rayons de courbure sont connus au point de contact ;
- Les corps sont élastiques, homogènes et isotropes ;
- La surface de contact est plane ;
- Le contact se fait sans frottement, et les solides sont sans mouvement relatif ;

- Les matériaux composant les corps sont caractérisés par : E_{young_1} , E_{young_2} modules d'élasticité longitudinale, ν_1 , ν_2 coefficients de poisson.

En surface, les contraintes normales sont égales à la pression de contact. Pour dimensionner et choisir les matériaux devant servir à réaliser les surfaces de contact, la première étape consiste à comparer la pression maximale à la pression admissible par le matériau.

$$p_{max} \leq p_{adm} \quad (3.5)$$

Pour effectuer le calcul de la pression de contact entre l'appui et la pièce, on doit prendre le cas du contact sphère / plan. La théorie de Hertz nous donne :

- Le rayon du cercle de l'empreinte sur le solide S_2

$$r = \sqrt[3]{\frac{3\pi}{4}(k_1 + k_2)R.F} \quad (3.6)$$

$$k_i = \frac{1 - \nu_i}{\pi E_{young_i}}$$

- le défaut de positionnement δ (figure 3.9) des deux surfaces S_1 et S_2 en contact et donné par l'équation (3.7)

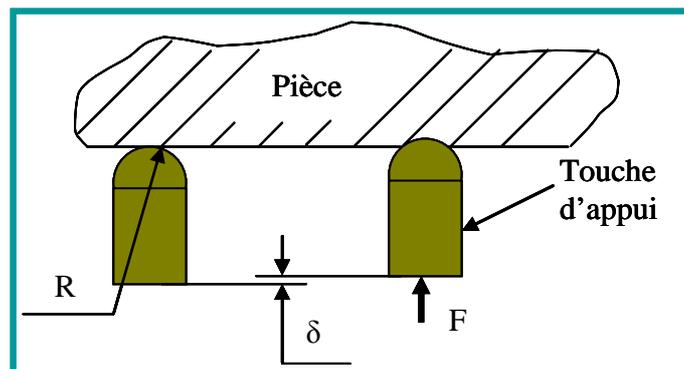


Figure3.9. Le défaut de positionnement.

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{9\pi^2}{16}(k_1 + k_2)^2 \frac{F^2}{R}} \quad (3.7)$$

On peut aussi utiliser la formule

$$\delta = 1,23 \cdot \sqrt[3]{\frac{F^2}{E_{young}^2 \cdot R}} \quad (3.8)$$

E_{young} est le module d'élasticité voir le tableau 3.1

Matière	E_{young} : daN/mm
Fonte	10000
Acier	24000
Bronze	6000
Allu	6750

Tableau 3.1. Tableau des modules d'élasticité pour les différents matériaux les plus utilisés.

La pression maximale

$$p_{max} = \frac{3}{2} \frac{F}{\pi \cdot r^2} \quad (3.9)$$

r est le rayon du cercle de l'empreinte sur le solide S_2 et F la force appliquée.

Pour limiter les déformations locales, la valeur de la pression aux contacts pièce-appui doit rester compatible avec les caractéristiques du matériau de la pièce.

Pour éviter les déformations locales dues à une pression incompatible avec les caractéristiques mécaniques du matériau de la pièce, il est nécessaire d'augmenter l'aire du contact **[Sato4]**. Les appuis plats disposent d'une surface de contact plus importante. Ils sont généralement employés pour assurer un contact sur une surface usinée ayant une orientation compatible avec l'appui pour assurer une pression de contact uniforme sur toute l'étendue de l'appui.

L'utilisation d'appuis bombés permet de respecter au mieux le modèle de posage car le contact est ponctuel, mais la pression au niveau du contact entre la pièce et l'appui est alors élevée. Ils sont utilisés lorsque les efforts exercés par les appuis sur la pièce sont de faible intensité et si la marque causée par les déformations locales sur la pièce ne pose pas de problème par la suite.

L'utilisation d'appuis auto-aligneurs permet une répartition uniforme de la pression de contact et une bonne localisation car la surface de l'appui sera entièrement en contact avec la surface de contact.

2.3.2.6 Direction des efforts encaissés par les points d'appui

On ne considère que les efforts de coupe et de bridage qui sont directement opposés à la direction d'appui car ce sont les efforts qui tendent à presser la pièce contre ses appuis.

2.3.2.7 Défaut d'orientation de la surface d'appui

Lorsque la direction de la normale de la surface d'appui n'est pas totalement parallèle à la direction de l'appui à cause d'une dépouille de la surface de la pièce (pièce provenant de la fonderie par exemple) et lorsque la pression de contact est assez élevée il est souhaitable d'utiliser des touches d'appui à rotules (figure 3.10) afin d'avoir un meilleur contact d'appui et une répartition uniforme de la pression de contact.

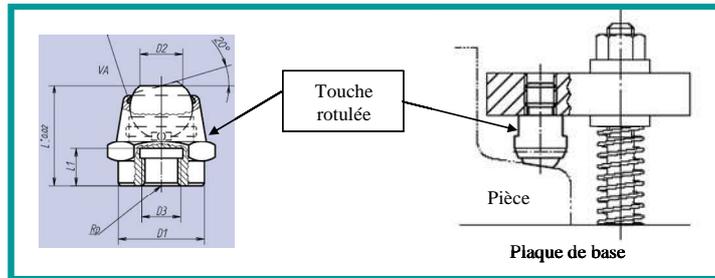


Figure 3.10 Touche oscillante. [Nor00]

2.3.2.8 Détermination du défaut d'orientation de la surface d'appui

Pour déterminer le défaut d'orientation de la surface d'appui par rapport à la surface de pose de l'appui on doit calculer le produit vectoriel entre la normale à la surface d'appui de la pièce et la normale à la surface de pose du montage d'usinage (figure 3.11). Si l'angle β est égal à zéro on utilise des éléments non orientables. Si β est différent de zéro on utilise des éléments d'appui orientable.

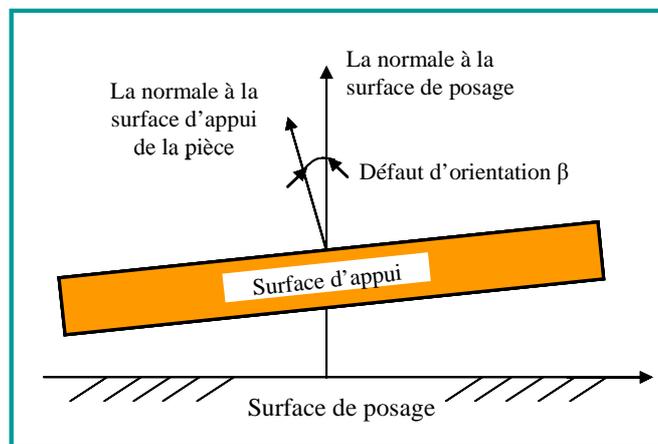


Figure 3.11 Le défaut d'orientation des surfaces d'appui.

2.3.3 Procédure de choix du type de technologies de contact des éléments technologiques d'appui en contact avec la pièce

Le choix du type de contact des éléments technologiques d'appui doit satisfaire les contraintes de qualité et de comportement mécanique. Il s'agit de trouver un compromis pour décider quel type de contact d'appui il faut choisir. Le choix doit se faire par restriction progressive du domaine. La figure 3.12 montre l'algorithme de choix du type de contact des éléments technologiques d'appui.

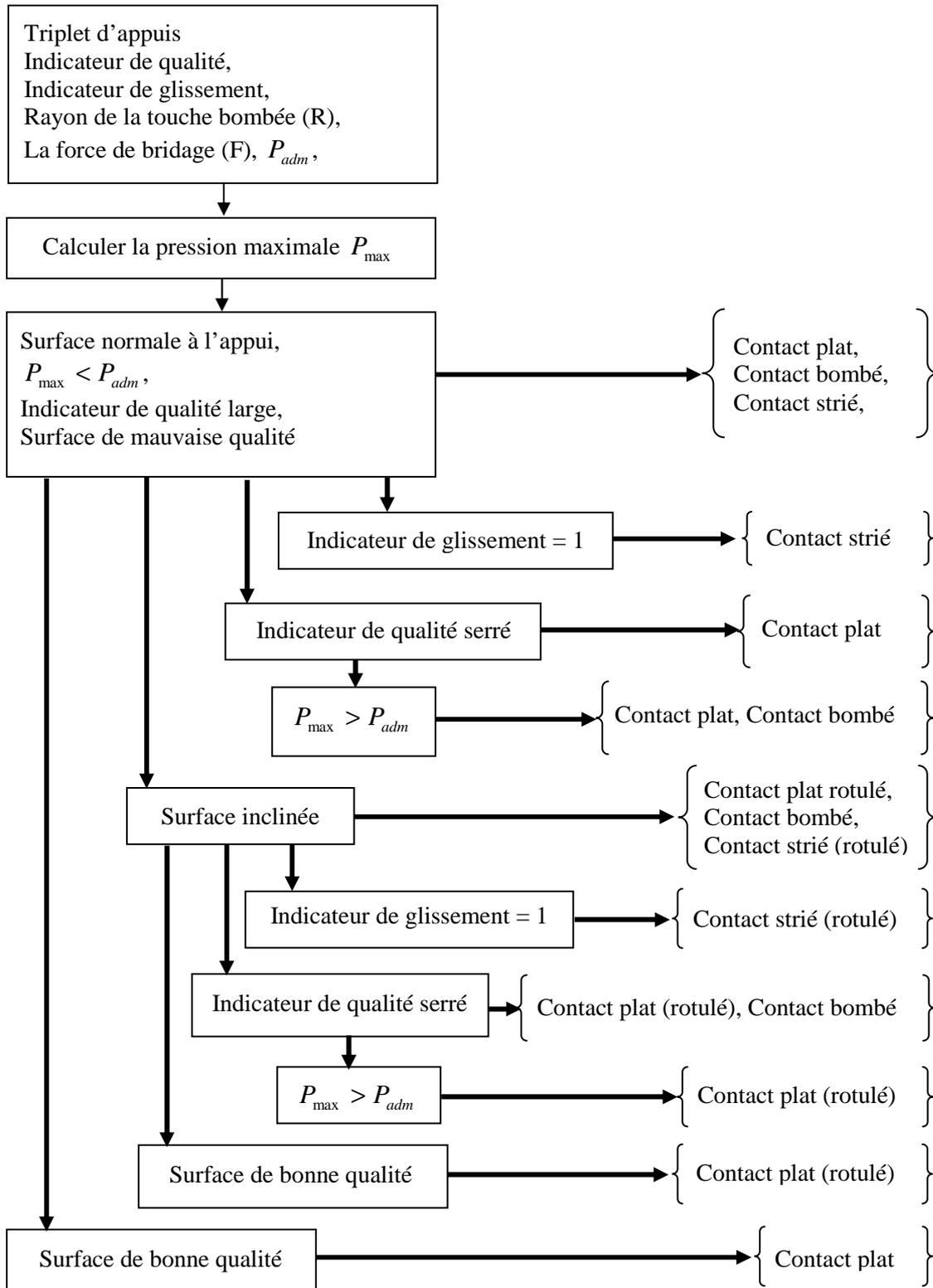


Figure 3.12 Algorithme de choix du type de technologies de contact des éléments d'appui en contact avec la pièce. [Zir07]

2.4 Choix des éléments technologiques de bridage en contact avec la pièce

Le dispositif de bridage, de type bride, est composé d'une bride, d'un tirant assurant le serrage, d'un pied de bride et d'un ressort permettant de maintenir la bride en position haute pendant le chargement/déchargement de la pièce (figure 3.13a). Les brides peuvent être plates (figure 3.13a), coudée (figure 3.13b), ouverte ou bien dite à fourche (figure 3.14a) et à bille avec plat pour les surface inclinées (figure 3.14b).

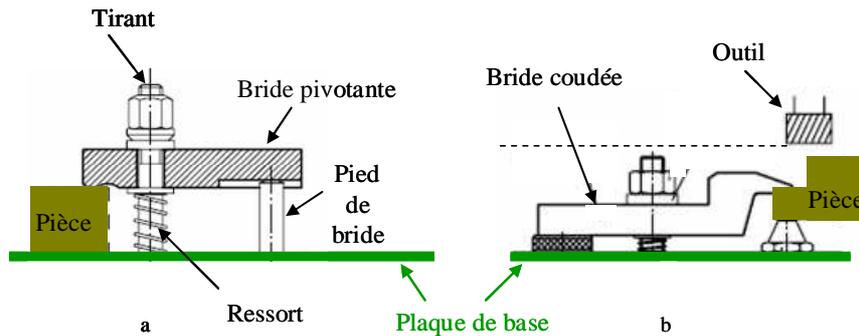


Figure 3.13 a) Bride droite et b) Bride coudée. [Nor00]

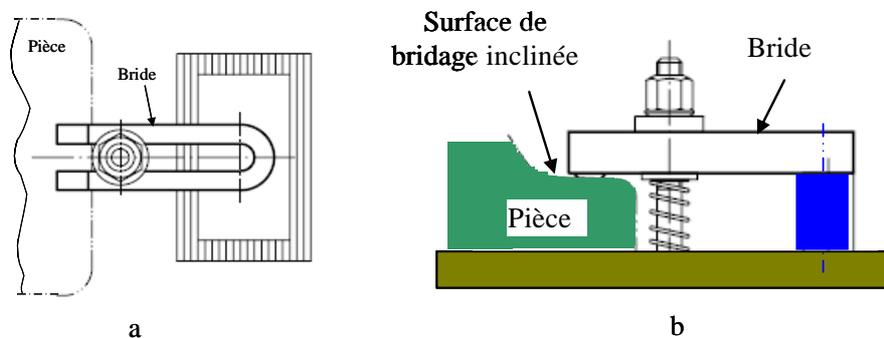


Figure 3.14 (a) Bride ouverte ou à fourche, (b) bride à bille avec plat. [Nor00]

Les brides sont essentiellement choisies en fonction de la forme de leur partie en contact avec la pièce, de leur dégagement et de l'effort qu'elles doivent exercer sur la pièce. Pour la partie en contact avec la pièce, il existe plusieurs formes de bride:

- Bride droite utilisée pour les surfaces plane et entièrement libre (figure 3.15a),
- Bride droite utilisée pour les surfaces encombrées (figure 3.15b),
- Bride crénelée (figure 3.15c),
- Bride coudée pour limiter l'encombrement en hauteur si il y'a un risque de collision de l'outil dans son déplacement au dessus de la pièce (figure 3.16a),
- Bride coudée à nez utilisée pour les pièces de petites dimensions avec un petit effort de serrage (figure 3.16b),

- Bride ouverte à tourillon utilisée pour les surfaces de bridage formées d'un trou ou d'une rainure (figure 3.17),
- Bride ouverte pour les surfaces de bridage entièrement libre et qui se trouvent vers le milieu de la pièce (figure 3.18a),
- Bride ouverte à nez pour les surfaces de bridage encombrées (figure 3.18b).

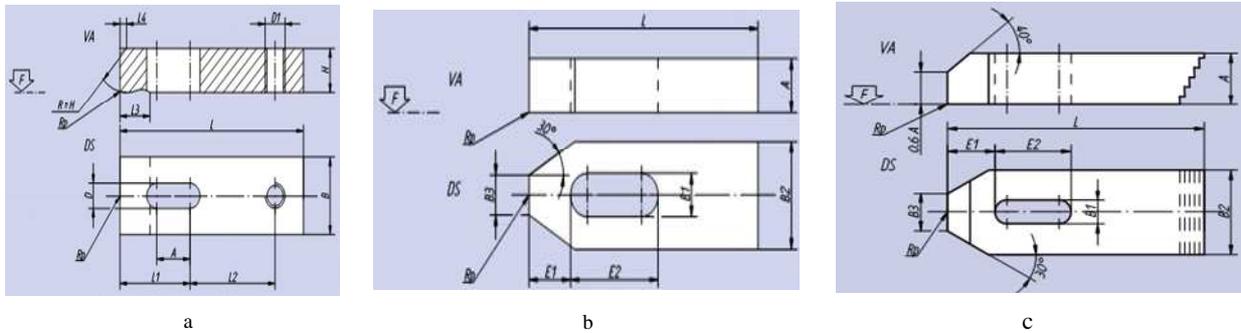


Figure 3.15 (a) Bride droite (b) Bride coudée. [Nor00]

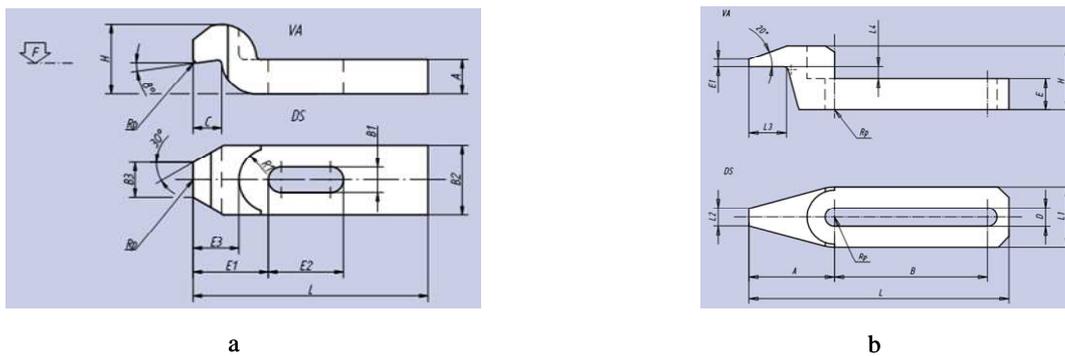


Figure 3.16 (a) Bride coudée (b) Bride coudée à nez. [Nor00]

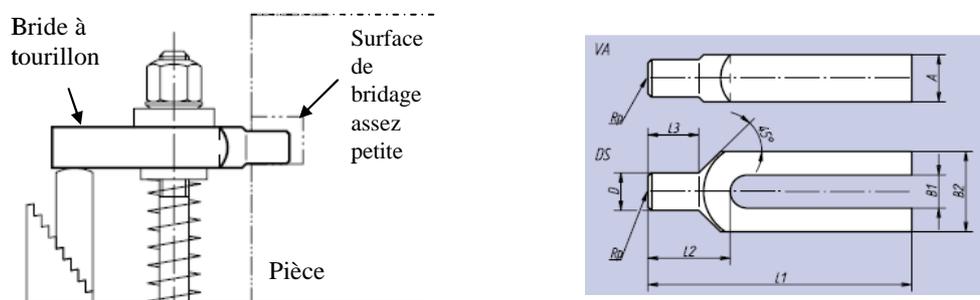


Figure 3.17 Brides à tourillon. [Nor00]

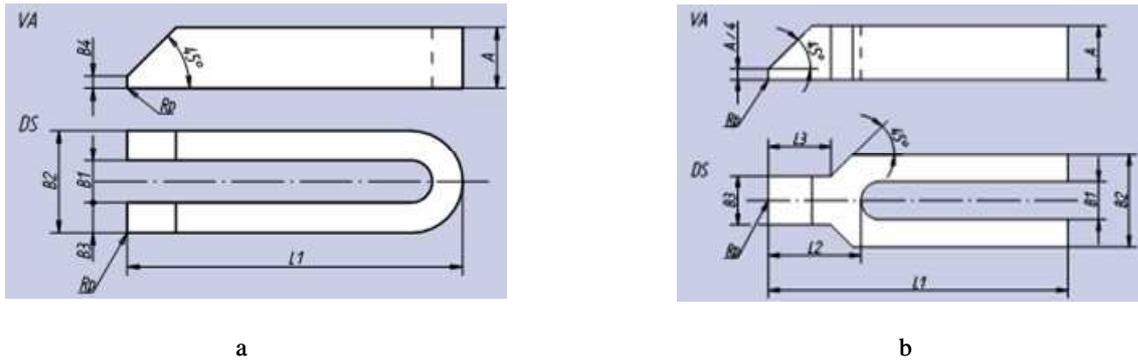


Figure 3.18 (a) Bricolage ouvert (b) Bricolage ouvert à nez. [Nor00]

2.4.1 Formalisation des connaissances pour le choix des éléments technologiques de bridage

Le choix des éléments technologiques de bridage en contact avec la pièce est essentiellement issu de règles expertes. Ces règles doivent répondre aux contraintes de qualité [Lio1b], d'accessibilité et de comportement mécanique.

Le choix technologique des brides dépend essentiellement des paramètres suivants :

- L'étendue et la géométrie de la surface de bridage,
- L'intensité de l'effort de bridage [Cec01a],
- L'espace disponible pour le chargement/déchargement de la pièce,
- Le défaut d'orientation de la surface de bridage.

2.4.1.1 L'étendue et la géométrie de la surface de bridage

La partie de la bride en contact avec la pièce (figure 3.19) doit être compatible avec l'étendue et la forme de la surface de bridage qui la reçoit. Si la surface est plane et entièrement libre, toutes les brides peuvent être choisies en fonction de l'étendue de la surface de bridage et en fonction de l'espace de travail des outils de coupe. Si la surface de bridage représente une géométrie qui encombre la surface de bridage dans les directions perpendiculaires à la direction de bridage, on utilise les brides à nez ou les brides à tourillon selon l'étendue et la géométrie de la surface de bridage.

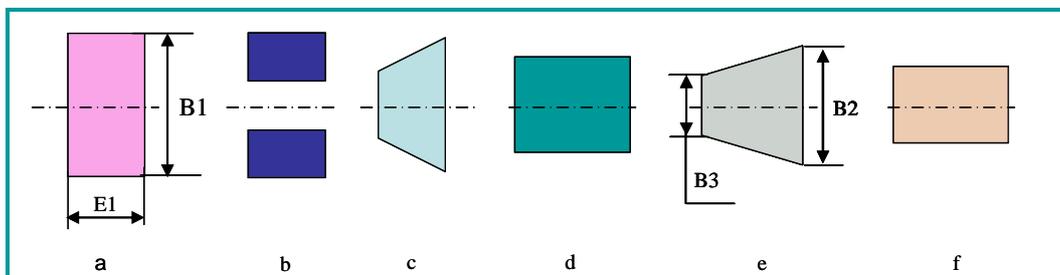


Figure 3.19 Les différentes formes de la partie de bride en contact avec la pièce

2.4.1.2 L'intensité de l'effort de bridage

La position relative entre le pied de bride et le tirant exerçant l'effort de bridage doit être optimisé de façon à obtenir le meilleur rendement de bridage (figure 3.20). Il faut avoir la distance X2 supérieur à la distance X1 et la distance X2 la plus grande possible. Le respect de ces conditions nous oblige à choisir les brides dans l'ordre suivant : bride ouvert, bride à tourillon, bride coudée, bride droite et à la fin bride pivotante.

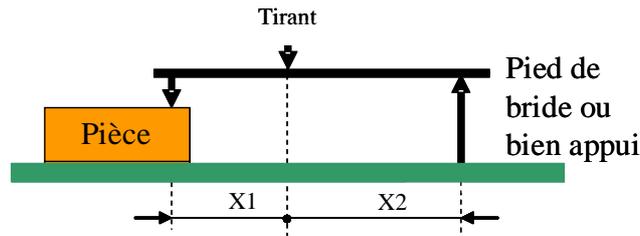


Figure 3.20 La position relative tirant-pied de bride

2.4.1.3 L'espace disponible pour le chargement/déchargement de la pièce

Le dégagement de la bride après desserrage pour le chargement et le déchargement facile de la pièce est un facteur très important dans le choix du type de bride. La bride doit être dégagée pour ne pas entrer en collision avec la pièce et empêcher son dégagement. Au moment du desserrage et du démontage de la pièce, elle doit rester solidaire du montage d'usinage. Elle doit avoir une trajectoire de dégagement pour faciliter l'extraction de la pièce. Trois cas sont possibles :

Cas 1 : bride ouverte (figure 3.21). Dans ce cas il n'y a pas de problème de dégagement de la bride. Ce type de bride est utilisé lorsque la distance X1+X2 est assez grande.

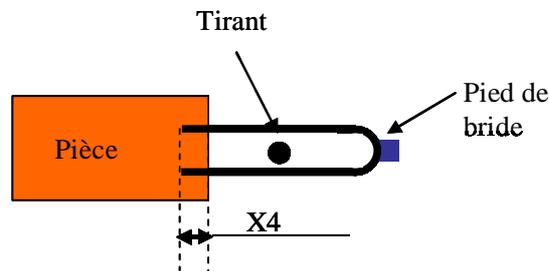


Figure 3.21 Bride ouverte

Cas 2 : bride coulissante (Figure 3.22). Elle est utilisée lorsque la rainure de la bride permet son dégagement et que la relation (3.10) est respectée.

$$X1 - X4 \geq N + 1 \quad (3.10)$$

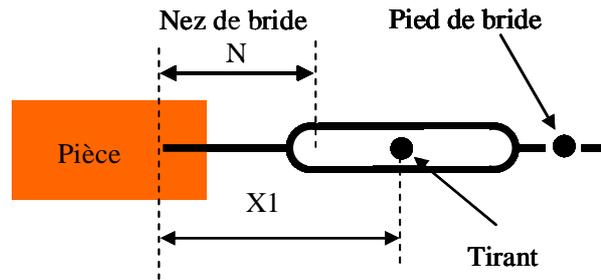


Figure 3.22 Bride coulissante

Cas 3 : bride pivotante (Figure 3.23). Elle est utilisée pour avoir un bon rendement de serrage car X_1 est petit et X_2 est le plus grand possible. Son choix est conditionné par la relation (3.11).

$$X_1 - X_4 \geq \frac{l}{2} + 1 \quad (3.11)$$

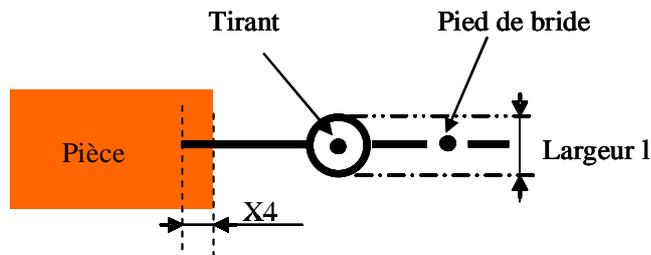


Figure 3.23 Bride pivotante

Les distances X_1 , X_2 , X_4 et N sont à déterminer en fonction de la position de la pièce sur la plaque de base, des caractéristiques dimensionnelles de la bride, de la position du tirant de la bride par rapport à la pièce, de la surface de bridage, de l'effort de serrage à exercer et de la distance entre les trous de la plaque de base.

2.4.1.4 Le défaut d'orientation de la surface de bridage

Dans certains cas où la surface de bridage est inclinée il est préférable d'utiliser des brides orientables pour orienter les efforts de bridage en opposition aux appuis.

2.4.2 Procédure de choix des éléments technologiques de bridage en contact avec la pièce

Le choix réel de la partie en contact avec la pièce et du type de dégagement de la bride ne sera fait qu'après avoir déterminé le lieu de placement exact de la bride sur la pièce pour savoir l'étendue et la géométrie de la surface qui doit la recevoir ainsi que sa position par rapport aux trous de la plaque de base.

Une fois le lieu de placement de la bride est déterminé, les informations suivantes seront disponibles :

- L'étendue de la surface de bridage,
- La nature de cette surface (encombrée ou non dans les directions perpendiculaires),
- La position de cette surface par rapport au repère de posage.

2.4.3 Stratégie retenue pour le choix des éléments technologiques de bridage

L'algorithme de choix des éléments de bridage est montré dans la figure 3.24.

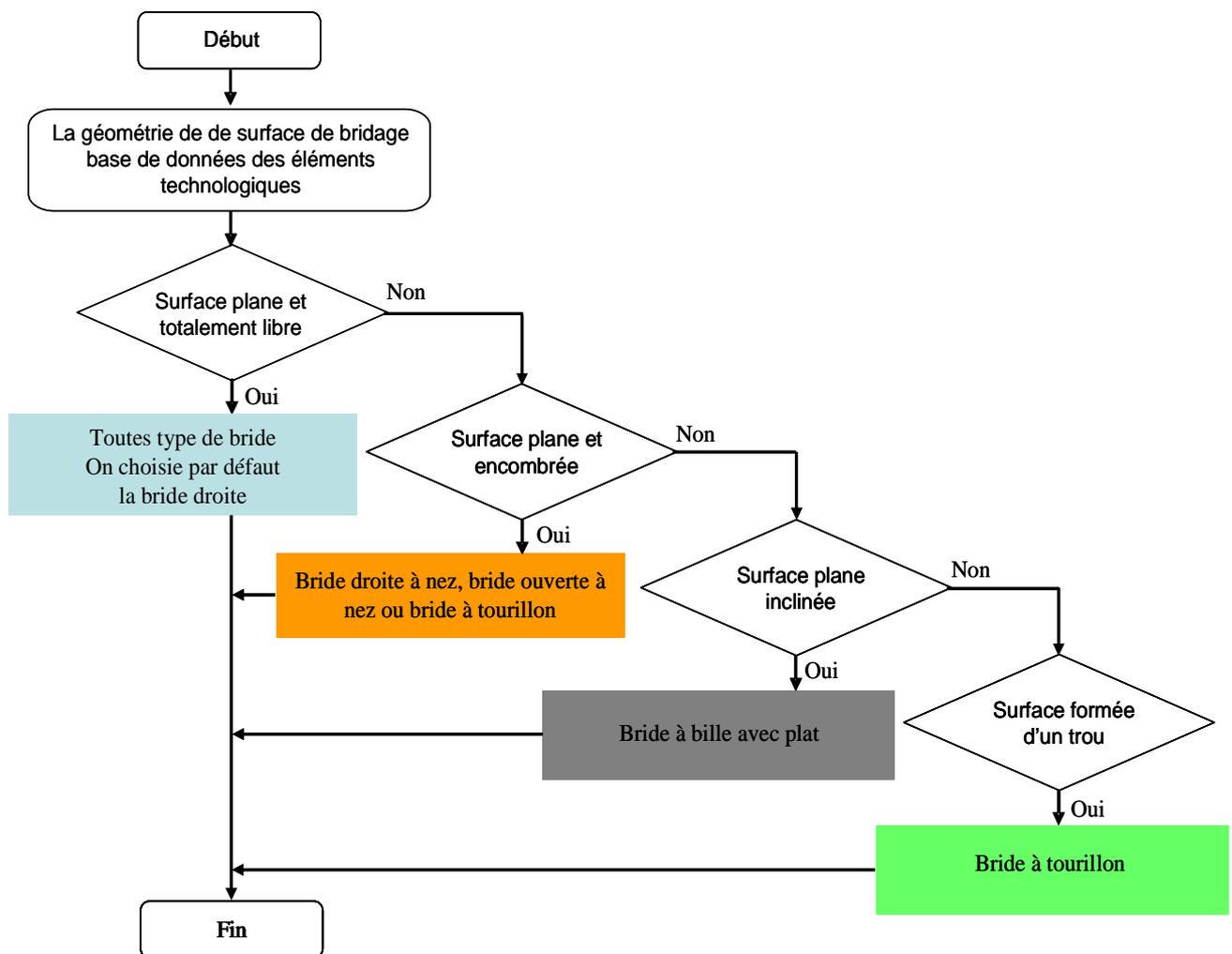


Figure 3.24 Algorithme de choix des éléments de bridage.

3 Placement des éléments technologiques en contact avec la pièce

Après avoir choisi les éléments technologiques d'appui en contact avec la pièce, il faut les placer. Ce placement est optimisé de manière à répondre aux contraintes de qualité, d'accessibilité, de stabilité et de déformation. Pour la qualité, il est en effet déconseillé de se positionner sur les zones où les défauts de la pièce sont importants comme par exemple les bavures issues du plan de joint de fonderie ou de forge. Aujourd'hui on ne dispose pas de ces informations. Pour la contrainte de stabilité, il faut chercher les meilleurs endroits dans la mesure du possible pour les points d'appui de l'appui prépondérant, de l'appui secondaire de l'appui tertiaire et les brides pour avoir une meilleure stabilité toute en évitant les déformations de la pièce. Il est très difficile de répondre à toutes ces contraintes en même temps mais la recherche d'un compromis est possible.

3.1 Hypothèses de travail

Pour le placement des éléments technologiques en contact avec la pièce, deux cas se présentent :

- Le cas des pièces considérées comme rigide ou on peut découpler le placement des appuis de l'appui prépondérant et le placement des brides c'est-à-dire on place les éléments d'appui sans se soucier du placement des éléments de bridage.
- Le cas des pièces considérées comme déformables. Là, il faut gérer le placement des appuis de l'appui prépondérant et le placement des brides d'une façon couplée. C'est-à-dire en même temps pour éviter les déformations dues aux efforts de bridage.

Dans ce travail, on traite le cas des pièces rigides. Les pièces déformables seront considérées comme un cas particulier du traitement des pièces rigides. Aussi on traite le posage du type 3-2-1R et 3-2-1C.

3.2 Formulation du problème d'optimisation pour le placement des éléments d'appui prépondérant

Notre stratégie pour résoudre le problème de placement des éléments technologiques d'appui consiste à placer les trois éléments technologiques de l'appui prépondérant en effectuant une optimisation [Cull94], [Bero1], [Rou04]. Ensuite les deux éléments de l'appui secondaire seront placés et finalement l'appui tertiaire sera placé.

La stabilité de la pièce dépend en grande partie de l'appui prépondérant. Le placement des éléments technologiques sur cet appui de type plan doit répondre à la contrainte de stabilité. Pour cela il faut avoir le plus grand étendu de d'appui possible. Cette stabilité est encore améliorée par l'appartenance du centre de gravité, de la résultante de l'effort de bridage et l'ensemble des efforts de coupe suivant la verticale au domaine intérieur du triangle de sustentation formé par les trois points (figure 3.25). La stabilité est maximale si pour une étendue maximale du triangle de sustentation, la distance entre le centre du triangle et le point d'application de ces trois grandeurs est minimale.

Cependant notre fonction objective n'est autre que la maximisation de la surface du triangle de sustentation tout en assurant l'appartenance de la résultante des efforts de bridage, les efforts de coupe ainsi que le centre de gravité de la pièce à au domaine intérieur du triangle de sustentation avec un bon contact des touches d'appui avec la pièce.

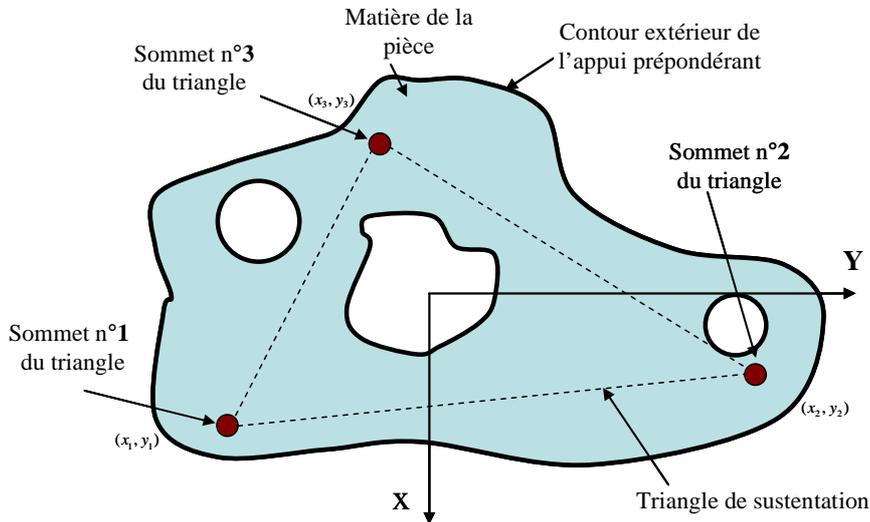


Figure 3.25 Les trois sommets du triangle de sustentation qui représente les trois points d'appui de l'appui prépondérant.

3.2.1 Stratégie de résolution

1. Détermination des lieux potentiels de placement

Il est évident que la distance maximale sur une surface quelconque se trouve toujours vers le périmètre extérieur de cette surface. Donc pour avoir l'aire maximale d'un triangle sur une surface quelconque, les sommets de ce triangle doivent nécessairement être auprès du périmètre extérieur de cette surface. De cela on peut affirmer que les lieux potentiels des sommets du triangle de sustentation et qui sont les points de placement des éléments technologiques d'appui pour l'appui prépondérant doivent se trouver sur un contour parallèle au contour extérieur de la surface d'appui mais décalé vers l'intérieur d'une distance e (équation 3.12) égale au rayon de la touche d'appui (figure 3.26). Cette distance peut être modifiée selon le besoin.

$$e = \frac{D}{2} \quad (3.12)$$

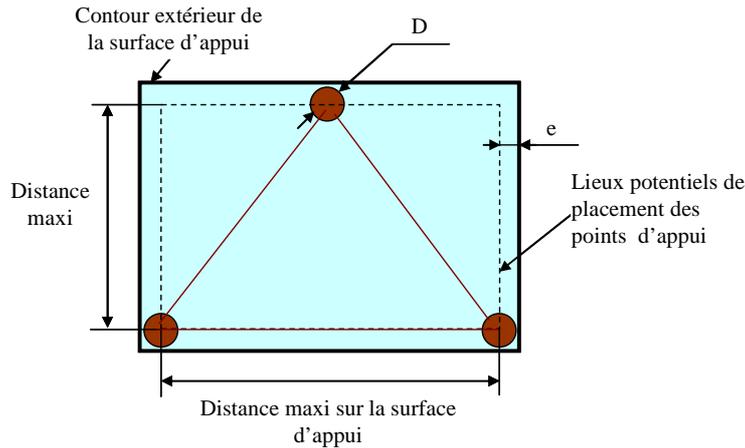


Figure 3.26 Lieux potentiels de placements des points d'appui sur l'appui prépondérant.

2. Les touches d'appui doivent être en contact avec la matière de la pièce

Les surfaces des pièces mécaniques ne sont pas toujours de géométrie uniforme, où on trouve partout de la matière, ils peuvent avoir des trous, des rainures, des irrégularités de formes quelconque ne contenant pas de matière venant par exemple du moulage ou de la forge ou bien usinées auparavant (figure 3.27).

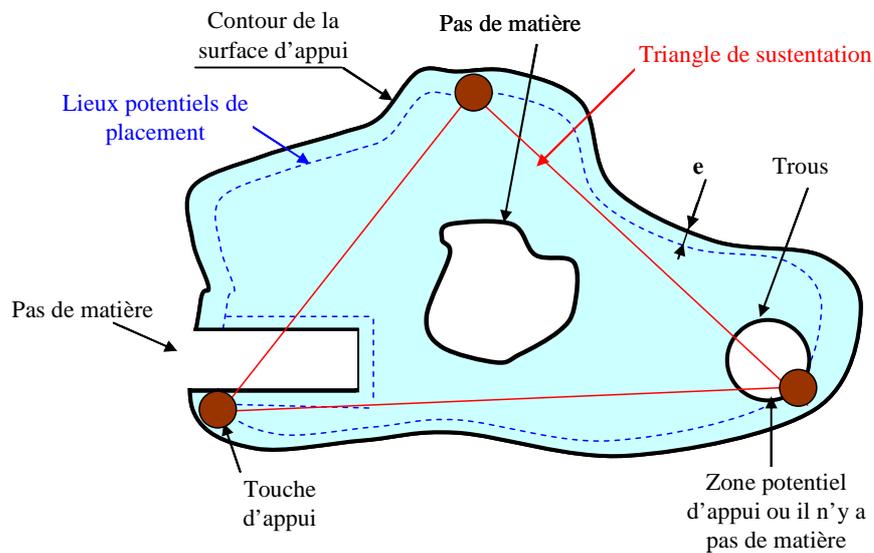


Figure 3.27 Zones qui ne contiennent pas de matière.

Les zones où il n'y a pas de matière peuvent se situer près des lieux potentiels de placement des points d'appuis ou vraiment appartenir à ces dernières. Lors de la recherche des endroits de placement des points d'appui il y'a un fort risque de tomber sur un endroit potentiel de placement mais qui ne contient pas de matière d'où on ne peut pas placer l'élément technologique sur ce lieu qui appartient à l'ensemble des lieux potentiels. Pour les zones qui ne contiennent pas de matière mais qui sont loin de la périphérie de la surface d'appui c'est-à-dire vers l'intérieur, on les considère pas car ils ne seront jamais des lieux potentiels de placement des éléments d'appuis.

Plusieurs cas peuvent se présenter et pour surmonter ce problème, on propose la stratégie de détermination des lieux potentiels de placement décrite par la suite.

3.2.1.1 Les différents cas

Cas 1. La distance entre la zone qui ne contient pas de matière et les frontières de la surface d'appui permettent de placer l'élément d'appui (figure 3.28). Dans ce cas on considère tous les lieux potentiels de placement sans restriction.

$$d - e \geq \frac{D}{2} \quad (3.13)$$

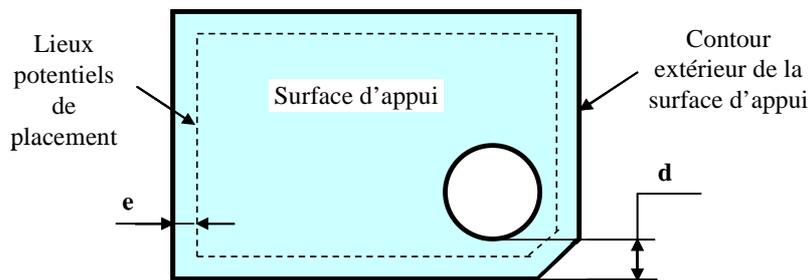


Figure 3.28 Cas possible de placer l'élément d'appui.

Cas 2. La distance entre la zone qui ne contient pas de matière et les frontières de la surface d'appui ne permettent pas de placer l'élément d'appui (figure 3.29). Dans ce cas on doit éliminer les lieux où on ne peut pas placer les éléments d'appui (figure 3.29).

$$d - e < \frac{D}{2} \quad (3.14)$$

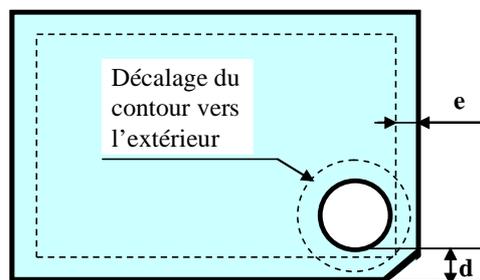


Figure 3.29 Zone qui ne peut pas supporter l'élément d'appui.

Élimination des lieux non potentiels de placement des appuis et obtention des nouveaux lieux potentiels de placement (figure 3.30).

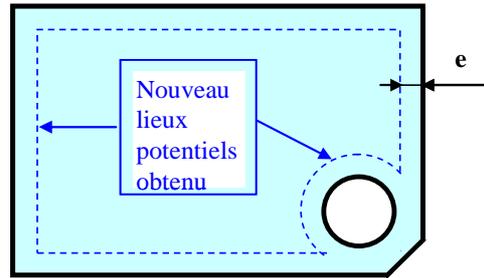


Figure 3.30 Nouveaux lieux potentiels de placement.

Cas 3. Dans la plupart des cas, l'appui est constitué de plusieurs surfaces de normales parallèles et qui participent toutes à cet appui (figure 3.31). Les surfaces participant à cet appui peuvent même être dans des niveaux différents. Donc il faut chercher à placer les points d'appui sur les surfaces appartenant à l'appui tout en maximisant la surface du triangle de sustentation. On procède de la même façon comme si notre surface d'appui est constituée d'une seule surface, on cherche l'étendue de la totalité des surfaces participant à cet appui, puis on fait le décalage de chaque surface qui appartient à l'appui et qui se trouve vers la périphérie de la pièce. Les surfaces qui se trouvent vers l'intérieur de la pièce ne seront pas considérées.

Une fois on fait le décalage de l'étendue de l'appui, on constate que ce contour contient des zones où il n'y a pas de matière qu'il faut les éliminer pour n'avoir que les lieux où il est possible réellement de placer les points d'appui (figure 3.32). Nos points d'appui vont appartenir aux surfaces qui représentent les lieux potentiels de placement. Finalement, on ne considère que les frontières de ces surfaces dans nos calculs.

3.2.2 La fonction objectif

Dans le plan, si les coordonnées des sommets du triangle sont données par $A_T(x_1, y_1)$, $B_T(x_2, y_2)$ et $C_T(x_3, y_3)$, alors l'aire S_{tr} de ce triangle est égale à :

$$S_{tr} = \frac{1}{2} |(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)| \quad (3.15)$$

La fonction objective [Bilo7], [Cha96] pour l'appui prépondérant qui est la maximisation de la surface du triangle de sustentation est :

$$f_{obj} = \text{Max } S_{tr}(x_i, y_i) \quad i=1, \dots, 3 \quad (3.16)$$

(x_i, y_i) appartenant aux lieux potentiels de placement de la surface de l'appui prépondérant.

3.2.3 Les contraintes du problème

Parmi les contraintes qu'il faut respecter :

- Le centre de gravité $G_p(x_{GP}, y_{GP})$ de la pièce et la résultante des efforts de bridage $R_B(x_B, y_B)$ doivent être au pire des cas à l'intérieur du triangle de sustentation. Pour être plus précise ils doivent être à l'intérieur d'un cercle concentrique au cercle inscrit dans le triangle de sustentation de rayon égale au rayon du cercle inscrit divisé par une valeur expert λ . La solution idéale est que le centre de gravité de la pièce ainsi que la résultante des efforts de bridage passent tous les deux par le centre du triangle de sustentation.
- L'ensemble des efforts de coupe suivant la verticale $R_C(x_C, y_C)$ doivent être si c'est possible à l'intérieur du cercle inscrit dans le triangle de sustentation dans le cas idéal, sinon à l'intérieure de ce dernier.

L'ensemble des efforts de coupe agit à des points différents de la pièce et à des moments différents. Pour cela il est parfois impossible d'avoir tous les efforts de coupe à l'intérieur du triangle de sustentation. La recherche de la meilleure stabilité oblige à faire passer les efforts les plus pénalisants à l'intérieur du triangle de sustentation sinon au plus près possible des points d'appuis. On entend par efforts les plus pénalisants ceux qui ont une forte intensité et qui agissent plus loin du domaine intérieur du triangle de sustentation.

3.2.4 Formulation des contraintes

3.2.4.1 Le centre de gravité $G_p(x_{GP}, y_{GP})$ est à l'intérieur du triangle de sustentation

Il existe plusieurs façon pour vérifier si un point est à l'intérieur d'un triangle quelconque, parmi lesquelles le produit vectoriels des vecteurs constituant ce triangle. Un point M est à l'intérieur d'un triangle (figure 3. 33) si est seulement si les trois conditions suivantes sont vérifiées :

$$\begin{aligned} &(\text{Vecteur (AB)} \wedge \text{Vecteur (AM)}) \bullet (\text{Vecteur (AM)} \wedge \text{Vecteur (AC)}) \geq 0 \\ &(\text{Vecteur (BA)} \wedge \text{Vecteur (BM)}) \bullet (\text{Vecteur (BM)} \wedge \text{Vecteur (BC)}) \geq 0 \\ &(\text{Vecteur (CA)} \wedge \text{Vecteur (CM)}) \bullet (\text{Vecteur (CM)} \wedge \text{Vecteur (CB)}) \geq 0 \end{aligned}$$

où \wedge désigne le produit vectoriel de deux vecteurs et \bullet désigne le produit scalaire.

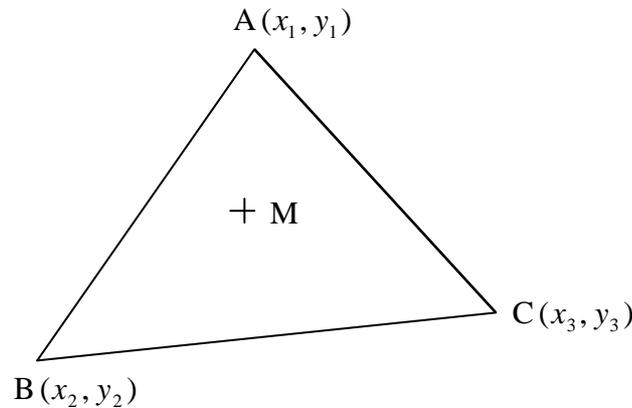


Figure 3.33 Un point M quelconque à l'intérieur du triangle ABC.

Les équations obtenues pour que le centre de gravité de la pièce soit à l'intérieur du triangle de sustentation sont :

$$[(x_2 - x_1)(y_G - y_1) - (x_G - x_1)(y_2 - y_1)][(x_G - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_G - y_1)] \geq 0 \quad (3.17)$$

$$[(x_1 - x_2)(y_G - y_2) - (x_G - x_2)(y_1 - y_2)][(x_G - x_2)(y_3 - y_2) - (x_3 - x_2)(y_G - y_2)] \geq 0 \quad (3.18)$$

$$[(x_1 - x_3)(y_G - y_3) - (x_G - x_3)(y_1 - y_3)][(x_G - x_3)(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)(y_G - y_3)] \geq 0 \quad (3.19)$$

x_1, y_1, x_2, y_2 et x_3, y_3 sont les coordonnées des sommets du triangle de sustentation et x_G, y_G les coordonnées du centre de gravité de la pièce.

3.2.4.2 La résultante des efforts de bridage $R_B(x_B, y_B)$ est à l'intérieur du triangle de sustentation

De la même façon, pour que le point d'application de la résultante des efforts de bridage soit à l'intérieur du triangle de sustentation il faut que ces trois équations soient vérifiées :

$$[(x_2 - x_1)(y_B - y_1) - (x_B - x_1)(y_2 - y_1)][(x_B - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_B - y_1)] \geq 0 \quad (3.20)$$

$$[(x_1 - x_2)(y_B - y_2) - (x_B - x_2)(y_1 - y_2)][(x_B - x_2)(y_3 - y_2) - (x_3 - x_2)(y_B - y_2)] \geq 0 \quad (3.21)$$

$$[(x_1 - x_3)(y_B - y_3) - (x_B - x_3)(y_1 - y_3)][(x_B - x_3)(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)(y_B - y_3)] \geq 0 \quad (3.22)$$

x_1, y_1, x_2, y_2 et x_3, y_3 sont les coordonnées des sommets du triangle de sustentation et x_B et y_B , les coordonnées de la résultante des efforts de bridage.

3.2.4.3 L'effort de coupe $R_c(x_c, y_c)$ est à l'intérieur du triangle de sustentation

$$[(x_2 - x_1)(y_c - y_1) - (x_c - x_1)(y_2 - y_1)][(x_c - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_c - y_1)] \geq 0 \quad (3.23)$$

$$[(x_1 - x_2)(y_c - y_2) - (x_c - x_2)(y_1 - y_2)][(x_c - x_2)(y_3 - y_2) - (x_3 - x_2)(y_c - y_2)] \geq 0 \quad (3.24)$$

$$[(x_1 - x_3)(y_c - y_3) - (x_c - x_3)(y_1 - y_3)][(x_c - x_3)(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)(y_c - y_3)] \geq 0 \quad (3.25)$$

x_1, y_1, x_2, y_2 et x_3, y_3 sont les coordonnées des sommets du triangle de sustentation et x_c et y_c les coordonnées de l'efforts de coupe.

3.2.4.4 Le centre de gravité $G_p(x_{GP}, y_{GP})$ est à l'intérieur du cercle concentrique au cercle inscrit dans le triangle de sustentation

- La contrainte est satisfaite si la relation (3.26) est vérifiée.

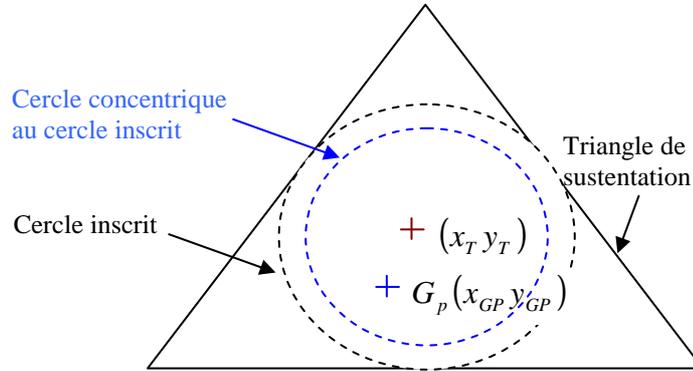


Figure 3.34 Cercle inscrit dans le triangle de sustentation.

$$(x_{GP} - x_T)^2 + (y_{GP} - y_T)^2 \leq \frac{R_T^2}{\lambda} \quad (3.26)$$

x_T, y_T et R_T sont respectivement les coordonnées du centre du cercle inscrit dans le triangle de sustentation et son rayon.

λ est un coefficient expert qui détermine le rayon du cercle concentrique au cercle inscrit dans le triangle de sustentation. Si λ est égale à zéro on obtient le rayon du cercle inscrit dans le triangle de sustentation.

3.2.4.5 La résultante des efforts de bridage est à l'intérieur du cercle concentrique au cercle inscrit dans le triangle de sustentation

La contrainte est satisfaite si la relation (3.27) est vérifiée.

$$(x_B - x_T)^2 + (y_B - y_T)^2 \leq \frac{R_T^2}{\lambda} \quad (3.27)$$

3.2.4.6 La résultante des efforts de coupe est à l'intérieur du cercle concentrique au cercle inscrit dans le triangle de sustentation

- La contrainte est satisfaite si la relation (3.28) est vérifiée.

$$(x_c - x_r)^2 + (y_c - y_r)^2 \leq \frac{R_r^2}{\lambda} \quad (3.28)$$

3.2.5 Choix de la meilleure solution

Notre problème d'optimisation n'est pas totalement résolu car lors de la recherche de la surface maximale du triangle de sustentation, l'algorithme peut nous donner plusieurs solutions qui ont la même surface maximale mais de disposition des sommets du triangle différentes comme montré dans la figure 3.35. Il faut ajouter des critères pour orienter la solution dans le bon sens et avoir la meilleure disposition du triangle de sustentation pour une solution pertinente.

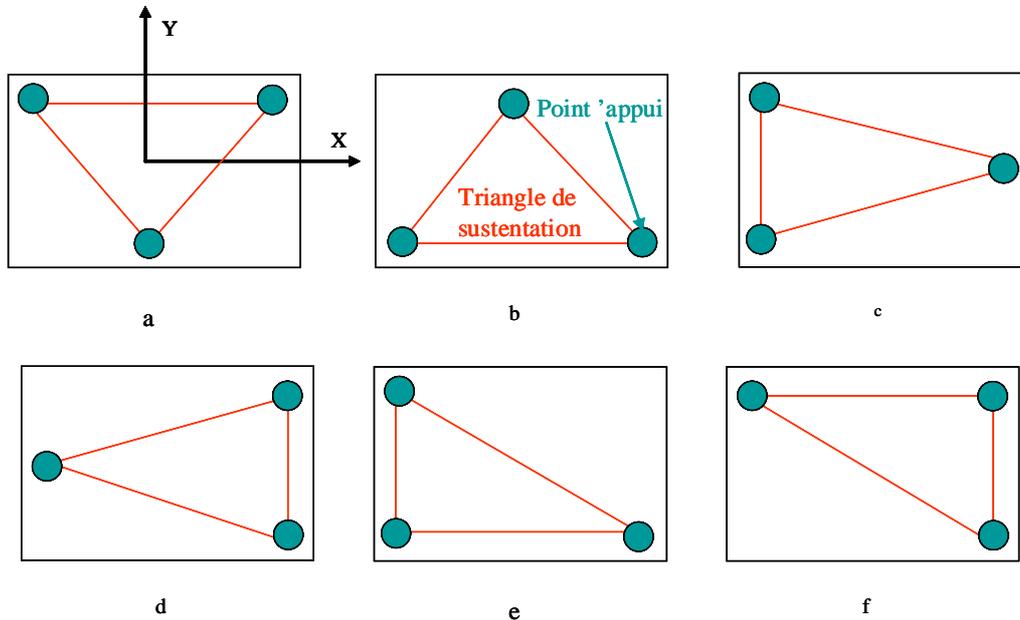


Figure 3.35 Différente dispositions du triangle de sustentation pour la même surface maximale.

3.2.5.1 Choix de la solution en fonction des efforts de coupe

Le choix de la solution pertinente doit tenir compte des efforts de coupe qui sont opposées à l'appui prépondérant et qui sont de forte intensité, d'où ils peuvent déséquilibrer la pièce par rapport à ses appuis ou bien la déformer. L'idéal serait d'avoir tous ces efforts de coupe à l'intérieur du triangle de sustentation mais ce n'est pas toujours possible car les efforts de coupe évoluent le long de la trajectoire d'outil de coupe. Même pour les efforts concentrés, comme pour le cas du perçage, les trous à percer peuvent être dispatchés sur toute l'étendue de la pièce. Dans cette situation on essaye de positionner le triangle de sustentation d'une façon à avoir une meilleure stabilité de la pièce en rapprochant le plus possible les points d'appui des efforts les plus pénalisant comme montré dans la figure 3.36. La première disposition du

triangle (figure 3.36a) n'est pas la bonne du point de vue efforts de coupe. La disposition de la figure 3.36b est meilleure du point de vue stabilité.

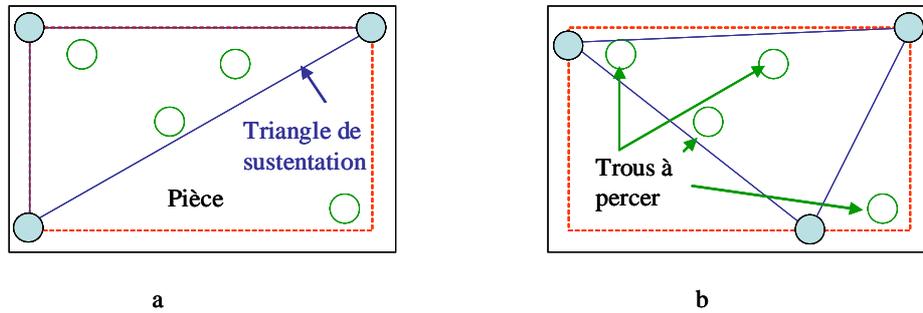


Figure 3. 36 Recherche de la meilleure disposition du triangle de sustentation.

3.2.5.2 Choix de la solution en fonction des séquences de bridage

Lors du serrage de la pièce [Che06], [Ceco1a], il faut que cette dernière soit en équilibre et reste tous le temps en contact avec ses points d'appui. Pour cela il faut que les efforts de bridage soit à l'intérieur du triangle de sustentation. Le triangle de sustentation doit être positionné de telle manière à avoir toujours l'équilibre de la pièce au moment du serrage si rien ne l'empêche bien sûr. Les cas de la figure 3.37d, la figure 3.37e et de la figure 3.37f sont à éviter.

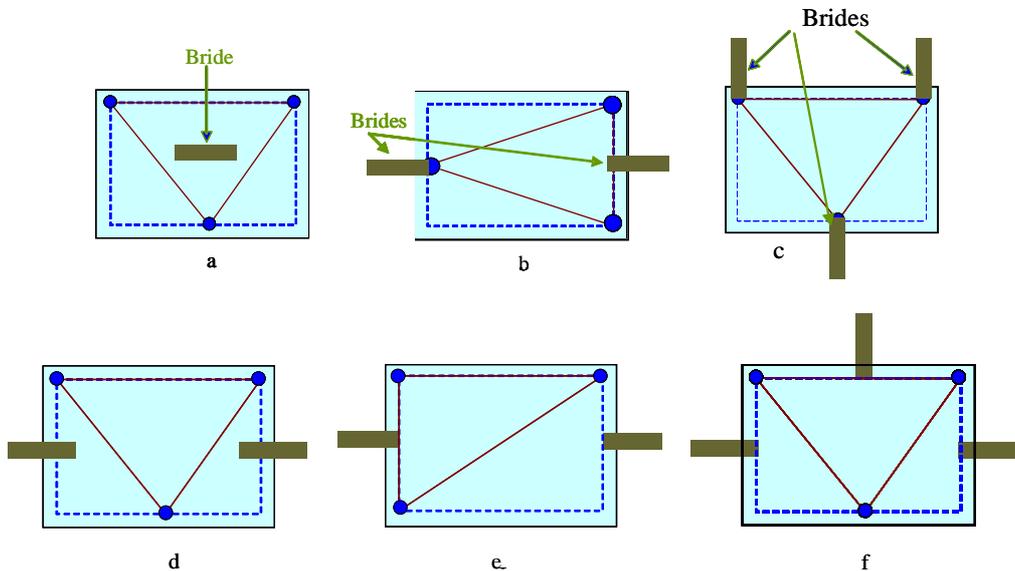


Figure 3.37 Disposition du triangle en fonction du séquençage de bridage.

3.2.6 Classification du problème d'optimisation

Notre problème d'optimisation de placement des points d'appui de l'appui prépondérant pour les pièces rigides se formule mathématiquement de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } f_{Obj}(x_i, y_i) \quad x_i, y_i \in R^n, \quad f_{Obj}(x_i, y_i) \in R^n, \quad i = 1,3 \\ \text{sous contraintes} \\ C_{n_j}(x_i, y_i) \geq 0 \in X \quad j = 1,9 \quad \text{et } i = 1,3 \end{array} \right. \quad (3.29)$$

C'est un problème d'optimisation non linéaire mono-critères sous contraintes d'inégalité non linéaire [Bero3].

3.2.7 Algorithme de placement des points d'appui de l'appui prépondérant

L'algorithme de placements des points d'appui de l'appui prépondérant est montré dans la figure 3.38.

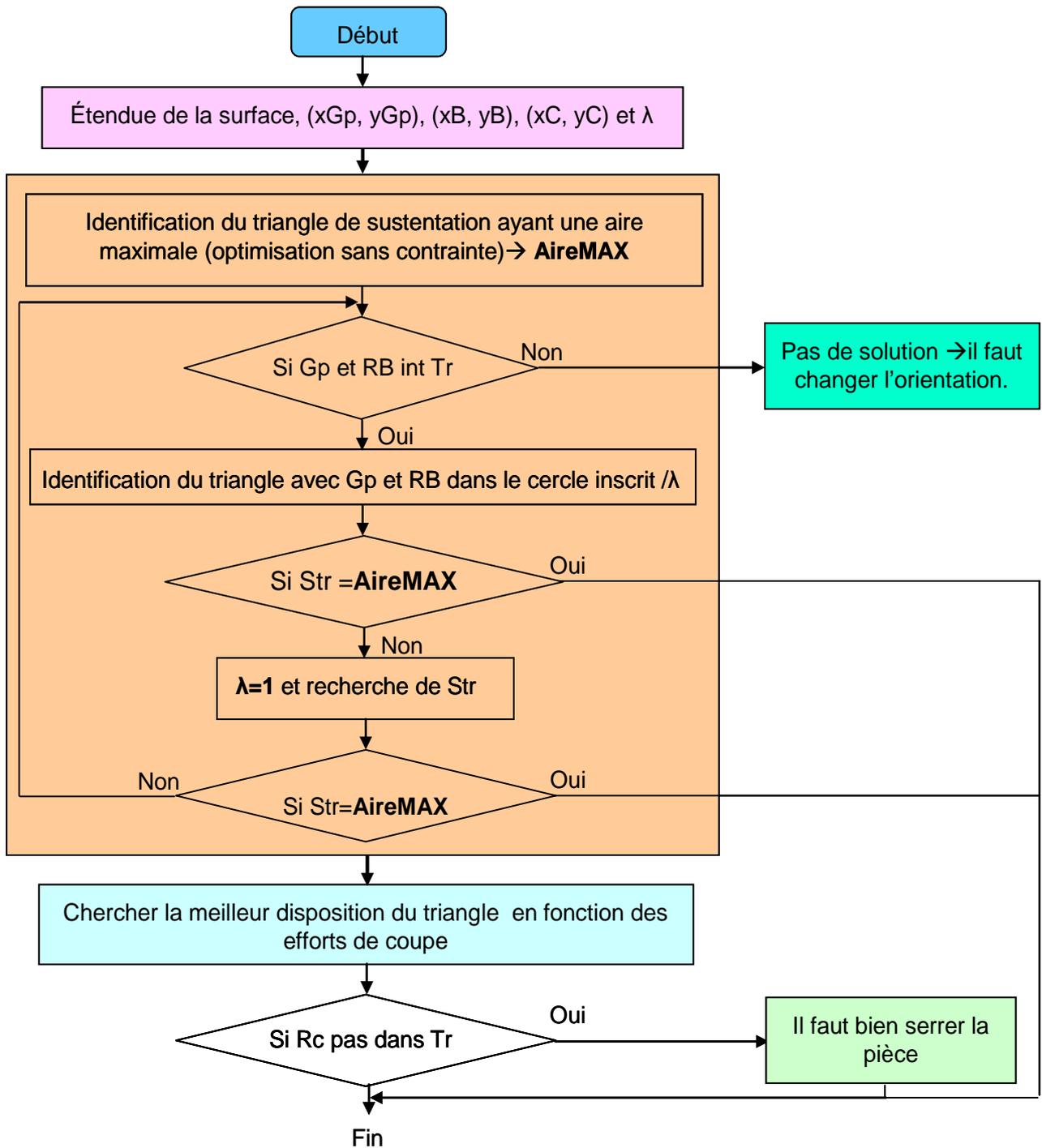


Figure 3.38 Algorithme de placement des points d'appui de l'appui prépondérant.

3.3 Cas des pièces déformables

Le dispositif de bridage exerce sur la pièce un effort d'intensité souvent élevée. Cet effort risque de déformer la pièce. Le dispositif de bridage est placé de manière à contrôler les déformations générées par l'effort de bridage (figure 3.39). Dans ce cas, l'incidence du bridage sur les déformations reste faible car l'effort de bridage est directement encaissé par l'appui. Dans la pratique, les brides sont placées en face des points d'appui pour éviter les déformations. Les constructeurs proposent un

dispositif qui assure à la fois un appui et un bridage opposés. Ce dispositif est composé d'une semelle sur laquelle sont montés l'appui, le tirant de serrage et le pied de bride et d'une bride qui exerce un effort parfaitement opposé à l'appui (figure 3.40).

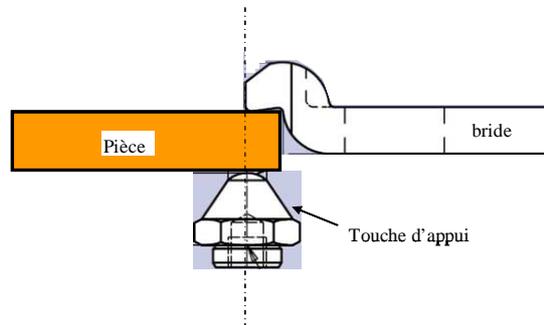


Figure 3.39 Bridage en face de l'appui.

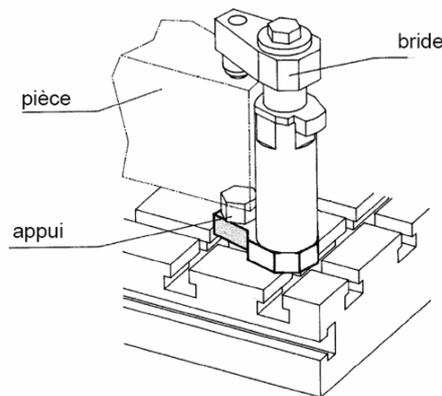


Figure 3.40 Dispositif intégrant l'appui et le bridage.

La stratégie retenue consiste donc pour les pièces déformables à trouver les points d'appui de l'appui prépondérant et à partir de là placer les points de bridage en face de ces points d'appui ou le plus près possible. Les points d'appui trouvés sont projetés vers le haut à la hauteur de chaque face de bridage qui se trouve en face de ces points d'appui.

3.4 Placement des éléments technologiques en contact avec la pièce pour l'appui secondaire de type appui linéaire rectiligne

L'appui secondaire de type linéaire rectiligne comprend deux points d'appui qui doivent être placés aussi loin que possible l'un de l'autre pour avoir une meilleure stabilité de la pièce. L'appui secondaire peut faire appel soit à une seule surface, soit à plusieurs surfaces de normale parallèle et qui peuvent être décalées les une par rapport aux autres dans la direction X du repère de pose.

Il faut dans un premier temps chercher les lieux potentiels de placement des éléments technologiques de l'appui secondaire et ensuite essayer de les placer sur ces lieux en adoptant une stratégie de placement qui respecte au mieux les contraintes de qualité,

d'accessibilité et de comportement mécanique tout en restant en contact avec la pièce (figure 3.41).

Comme pour l'appui prépondérant on fait le décalage de chaque surface appartenant à l'appui secondaire de la valeur du rayon de la touche de l'appui secondaire et s'il existe des zones où il n'y a pas de matière proche des frontières des surfaces on les traite comme pour l'appui prépondérant (figure 3.41). Dans le cas de plusieurs surfaces constituant l'appui on ne tient compte que des surfaces qui sont vers l'extérieur de l'appui.

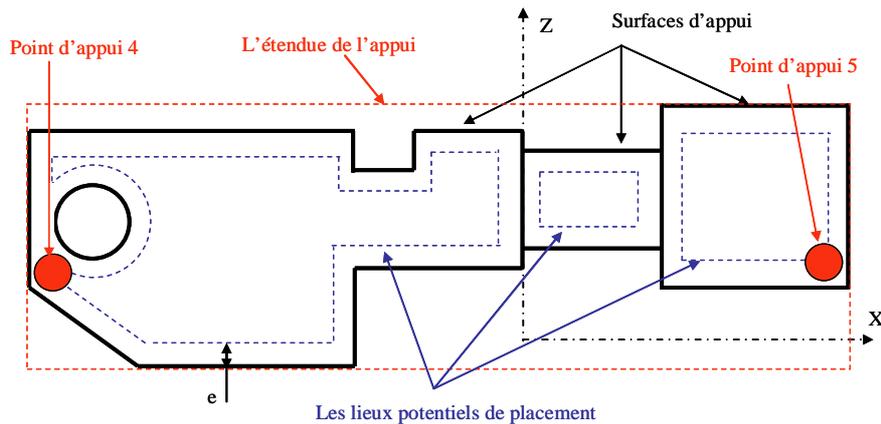


Figure 3.41 Placement des éléments sur l'appui secondaire.

3.4.1 Stratégie de placement

Une fois les lieux potentiels de placement déterminés, il faut maintenant placer les points d'appui sur ces lieux en essayant d'avoir la distance maximale entre les deux points d'appui. Pour se faire on propose une stratégie de placement qui consiste à tracer deux lignes droites verticales décalées chacune vers l'intérieur d'une valeur qui dépend de l'élément d'appui et qui passe par les lieux potentiels de placement (figure 3.42). À raison de la compacité, en commençant par le plus bas suivant la direction z^+ et on cherche le point d'intersection de la droite verticale avec l'un des points appartenant aux lieux potentiels de placement. La solution retenue sera le premier point d'intersection de la droite verticale avec les lieux potentiels de placement de part et d'autre. Les deux points peuvent ne pas être sur le même niveau.

Une vérification d'accessibilité peut s'avérer nécessaire si les touches d'appui sont près de l'espace de travail des outils de coupe, car il faut tenir compte des autres dimensions de la touche d'appui [Hu00]. Dans ce cas, il suffit juste de faire décaler la touche d'appui vers l'intérieur de la valeur voulue (figure 3.43).

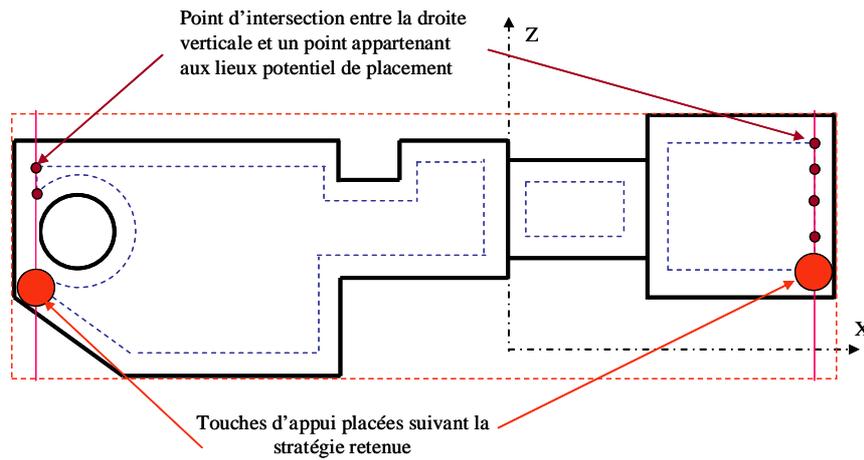


Figure 3.42 Les lieux potentiels de placement retenus.

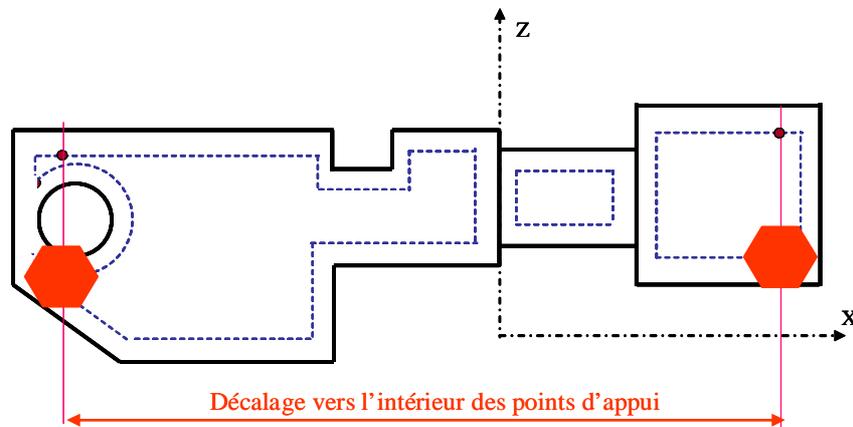


Figure 3.43 Décalage vers l'intérieur des points d'appui.

3.4.2 Algorithme de placement des points d'appui de l'appui secondaire

- (1) Données d'entrée : l'étendue de la surface d'appui secondaire, les deux touches d'appui de l'appui secondaire,
- (2) Génération des lieux potentiels de placement de l'appui secondaire,
- (3) Traçage des deux droites selon la verticale, décalé vers l'intérieur de la surface d'appui de la valeur de l'élément technologique d'appui et calcul des points d'intersections de ces deux droites avec les lieux potentiels de placement et qui se trouve le plus bas possible,
- (4) Ajustement si c'est possible des points d'appui trouvés avec la grille des trous de la plaque de base sinon on garde les points trouvés.

3.5 Placement des éléments technologiques pour l'appui secondaire type appui linéaire annulaire

Dans le cas de l'appui secondaire de type linéaire annulaire on utilise un centreur (figure 3.44). Il faut le choisir en fonction de l'alésage de la pièce et de la facilité de l'opération d'assemblage.

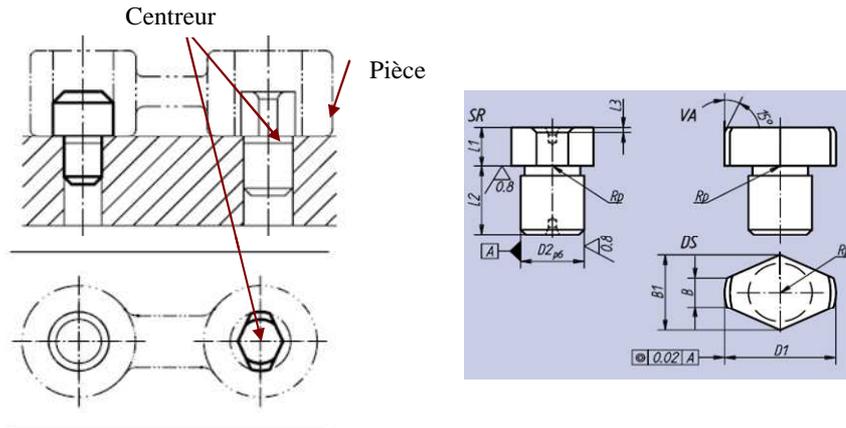


Figure 3.44 Centreur dégagé. [Nor00]

3.6 Placement des éléments technologiques pour l'appui tertiaire type buté

L'appui tertiaire peut être placé au milieu de l'appui si aucun obstacle ne l'empêche. Sinon si les efforts de coupe suivant la direction X sont concentrés dans une zone déterminée comme par exemple pour le perçage ou le rainurage on peut placer l'appui butée le plus près possible de cette zone pour minimiser les déformations, si l'étendue de l'appui le permet. La stratégie de placement de l'appui tertiaire consiste à construire les lieux potentiels de placement à partir du décalage du contour inférieur de la pièce et puis placer l'appui sur ces lieux potentiels. Pour garantir l'accessibilité et avoir un montage d'usinage compact et rigide, l'appui sera placé le plus bas possible, ce qui implique son placement sur un point qui appartient aux lieux potentiels de placement qui se trouvent à la partie inférieure de l'appui tertiaire. (Figure 3.45).

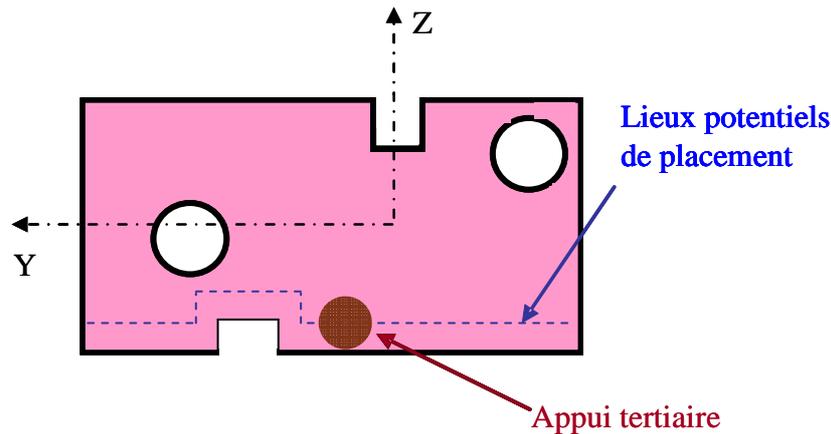


Figure 3.45 Placement de l'appui tertiaire.

3.6.1 Stratégie de placement de l'appui tertiaire

- (1) Données d'entrée : l'étendue de la surface d'appui tertiaire, la touche d'appui de l'appui tertiaire,
- (2) Génération des lieux potentiels de placement de l'appui tertiaire,
- (3) Placement du point d'appui tertiaire sur le contour des lieux potentiels de placement qui est décalé à partir de la frontière inférieure. Le point d'appui est placé au milieu de la pièce, sinon au point le plus proche des efforts les plus pénalisant,
- (4) Ajustement si c'est possible du point d'appuis trouvés avec la grille des trous de la plaque de base sinon on garde le point trouvé.

3.7 Ajustement des points d'appui en fonction des trous de la plaque de base

Afin d'éviter l'utilisation des supports réglables et diminuer le nombre d'éléments de liaison pour rendre le montage d'usinage plus rigide et plus compact, on essaye de faire coïncider les points d'appui trouvés avec les trous de la plaque de base par des petits ajustements [Kumoo] (figure 3.46). Pour cela on considère pour l'appui prépondérant, le premier point d'appui qui est l'un des sommets du triangle de sustentation comme point de référence et on vérifie d'abord si les deux autres points coïncident ou non avec les trous de la plaque de base par les relations (3.30) et (3.31).

$$\frac{x_{\text{point_reference}} - x_i}{T} = n_x, \quad i=2,3 \quad (3.30)$$

$$\frac{y_{\text{point_reference}} - y_i}{T} = n_y, \quad i=2,3 \quad (3.31)$$

$x_point_reference$ et $y_point_reference$, sont les coordonnées du point d'appui de référence considéré. x_i et y_i , sont les coordonnées des autres points d'appui trouvés et T est l'intervalle entre les trous de la plaque de base.

Si les résultats n_x et n_y sont tous les deux des nombres entiers, le point d'appui vérifié coïncide avec l'un des trous de la plaque de base, si non il ne coïncide pas.

Pour ajuster le point d'appui avec le trou de la plaque de base le plus proche qui convient, il faut décaler le point d'appui suivant les deux axes x et y ou suivant l'un des axes x ou y en multipliant T par le nombre juste supérieur ou juste inférieur à n_x ou n_y .

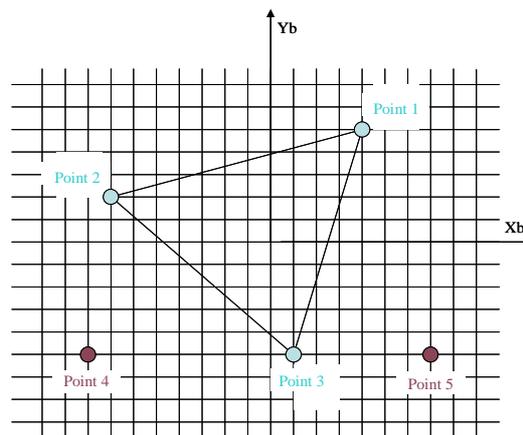


Figure 3.46 Ajustement des points d'appui par rapport aux trous de la plaque de base.

Pour l'appui secondaire, l'ajustement peut se faire uniquement suivant l'axe X , car suivant l'axe Y on peut faire un réglage lors de l'assemblage du montage d'usinage.

Suivant l'axe X on peut vérifier la coïncidence des points d'appui avec les trous de la plaque de base par la relation (3.32).

$$\frac{x_point_reference - x_i}{T} = n_x \quad i=4,5 \quad (3.32)$$

$x_point_reference$ est le point pris comme référence de l'appui prépondérant. Si n_x est un nombre entier la coïncidence est vérifiée, sinon on peut ajuster les positions des points d'appui comme pour l'appui prépondérant grâce aux supports réglable d'ajustement.

3.8 Placement des éléments de bridage en contact avec la pièce

Avant de placer les éléments de bridage sur la pièce, il faut savoir déterminer le nombre de brides à utiliser.

3.8.1 Détermination du nombre de brides

En pratique le nombre de bride varie entre 1 et 3 pour les pièces de petite et moyenne dimension ou l'effort de bridage reste limité. L'utilisation de plus de 3 brides est réservée pour les pièces de grandes dimensions et pour les efforts de bridage assez élevés. Dans notre cas et puisque on traite des pièces de petites et moyennes dimension, le nombre de brides est généralement limité à 3. En pratique, on utilise fréquemment deux brides pour faciliter le serrage et le desserrage de la pièce et pour minimiser le temps non productif.

Le nombre de bride est fonction de l'intensité de la résultante de l'effort de bridage et des indicateurs de stabilité. Si l'effort de bridage est faible ou si les efforts de coupe plaquent la pièce sur ses appuis, on peut utiliser 2 brides. Si l'effort de bridage est très important et si les efforts de coupe tendent à arracher la pièce de ses appuis ou bien à la faire basculer autour de ses axes, il est préférable d'utiliser 3 brides. Il est fonction aussi des dimensions et de la géométrie de la pièce, de l'espace disponible pour placer ces brides, et de la répartition des lieux potentiels de bridage sur la pièce. Si ces lieux sont concentrés dans un même lieu et s'ils sont très rapprochés on peut calculer leur barycentre.

On utilise une seule bride si le centre de bridage passe par le centre de gravité de la pièce ou plus près de ce dernier et si la pièce présente un trou par ou passe le tirant de la bride. Dans ce cas la pièce présente le pied de bride. On peut utiliser une bride à double action de serrage.

On utilise deux brides dans le cas où les lieux potentiels de bridage sont opposés par rapport à l'axe de la pièce car le placement de 2 brides doit être symétrique. Dans ce cas aussi on peut utiliser une bride à double action si la géométrie de la pièce le permet.

L'utilisation de trois brides est le cas le plus souhaitable car on peut brider en face des points d'appui. On utilise trois brides dans le cas où les lieux potentiels de bridage sont répartis sur toute l'étendue de la pièce.

3.8.2 Algorithme de choix du nombre de bride

- (1) Calcul du barycentre de l'ensemble des lieux de bridage,
- (2) Si la résultante des efforts de bridage est de faible intensité et si cette résultante passe par le centre de la pièce et si la géométrie de la pièce présente un trou qui passe par le centre de cette pièce et qui permet de faire passer le tirant de la bride, on utilise une seule bride,
- (3) Si les lieux potentiels de bridage sont opposés par rapport à l'axe X ou l'axe Y, on utilise deux brides opposées,
- (4) Si les efforts de coupe tendent à arracher ou à basculer la pièce autour de ses axes et si la répartition des lieux potentiels de bridage le permet, on utilise trois brides.

3.8.3 Placements des brides sur la pièce

Le choix des lieux de bridage est fortement contraint par le choix des surfaces de posage et les efforts exercés par les outils de coupe pendant l'usinage. Aussi le placement des éléments technologiques de bridage est contraint par l'espace de travail des outils de coupe. Il dépend aussi du nombre de bride à utiliser. Les indicateurs de stabilité nous aident à placer les brides pour avoir une bonne stabilité de la pièce au cours de l'usinage.

L'exploitation des lieux potentiels de bridage représentés par les petits cônes dans le modèle de prise de pièce, qui est donnée dans les informations d'entrée, nous aide à placer le système de bridage sur la pièce. On peut estimer la résultante de bridage en calculant le barycentre de l'ensemble de ces lieux. Ce calcul est valable même si on n'utilise finalement pas tous les lieux de bridage. Dans la pratique, si une seule bride est utilisée, elle est placée sur le barycentre. Si on utilise plusieurs brides, elles sont alors réparties de manière symétrique sur la pièce. L'action de bridage peut passer par le barycentre.

Une fois que les positions d'appui de l'appui prépondérant sont déterminées, les positions des brides sont alors choisies parmi l'ensemble des lieux admissible reconnus sur la prise de pièce. Selon le nombre de bride et selon les points d'appui de l'appui prépondérant, les brides seront placées comme c'est indiqué dans les sections précédentes.

Le placement des brides doit aussi tenir compte du placement des éléments de l'appui secondaire et tertiaire.

3.8.4 Algorithme de placement des éléments de bridage en contact avec la pièce

- (1) Les données d'entrée : le nombre de brides N_b , la position de chaque point d'appui, les lieux admissibles de bridage,
- (2) Si $N_b = 1$ le tirant de la bride sera vers le milieu de la pièce,
- (3) Si $N_b = 2$ les brides seront diamétralement opposées,
- (4) Si $N_b = 3$, le lieu de placement de chaque bride sera en face de chaque point d'appui de l'appui prépondérant,
- (5) Fin.

4 Éléments de liaison

Les éléments de liaison ont pour fonction de supporter et de relier les éléments d'appui et de bridage en contact avec la pièce avec la plaque de base. La formalisation des règles experts nous permet de les choisir en fonction de la position de l'éléments en contact avec la pièce par rapport à la direction de posage de l'appui prépondérant (la plaque de base), en fonction des distances entre les éléments en contact avec la

pièce et la plaque de base et en fonction de la contrainte d'accessibilité. Le choix des éléments de liaison doit respecter aussi la contrainte de rigidité pour diminuer les déformations et ainsi éviter les risques de vibration durant l'usinage de la pièce. Pour cela, il faut minimiser le nombre d'éléments de liaison.

La position des éléments d'appui par rapport à la direction de posage de l'appui prépondérant peut être parallèle ou perpendiculaire. La position inclinée n'est pas prise en compte dans nos travaux (figure 3.47). Parfois il faut combiner plusieurs éléments de liaison entre eux pour former la tour d'appui ou de bridage et lier l'élément en contact avec la pièce à la plaque de base.

Le choix des éléments de liaison se fait aussi selon l'information spatiale de l'élément du montage par rapport à la plaque de base et par rapport à la pièce. Pour l'appui prépondérant on considère les hauteurs h_{pi} et H . pour l'appui secondaire et tertiaire on considère les distances de l'endroit de liaison sur la plaque de base à la face d'appui de la pièce qui sont h_{si} , q et h_3 . Ces informations sont comparées aux paramètres géométriques des éléments du montage dans la base de données des éléments technologiques de sorte que l'élément le plus approprié soit choisi.

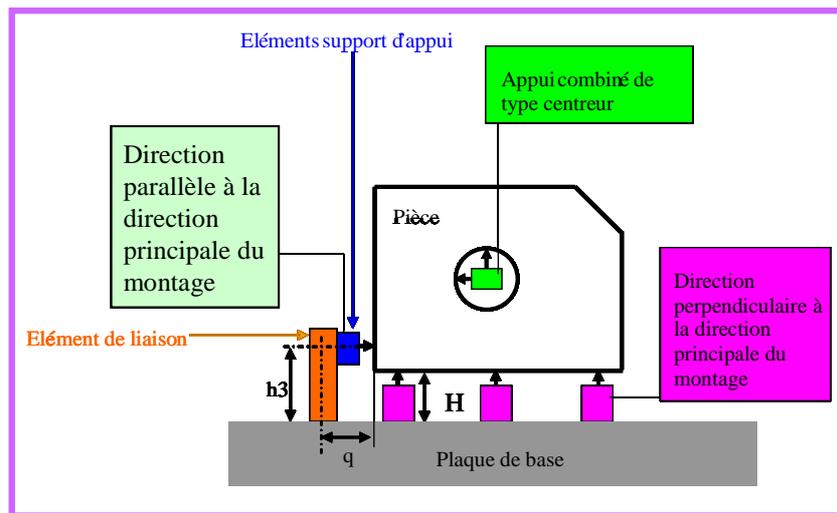


Figure 3.47 Position des appuis par rapport à la plaque de base.

4.1 Choix des éléments de liaison pour les éléments d'appui

4.1.1 Choix des éléments de liaison par rapport à la direction de posage de l'appui prépondérant

Si la direction d'appui est perpendiculaire à la direction de posage de l'appui prépondérant (cas de l'appui secondaire et tertiaire), dans ce cas la fonction du support est d'orienter et de mettre à distance l'appui (empilage h_{si}). L'orientation se fait à l'aide d'une équerre coulissante 2256 (figure 3.48a), d'une console support 4 faces 2044 (figure 3.48b), d'une console carrée 2041 (figure 3.48c), d'une butée de position 2128 (figure 3.48d), d'une butée à vis réglable 03082-12060 (figure 3.48e) ou 03085-10 (figure 3.48f), d'une butée à vis 03084-08032 (figure 3.48j) ou d'une butée réglable 03083-16063 (figure 3.48k).

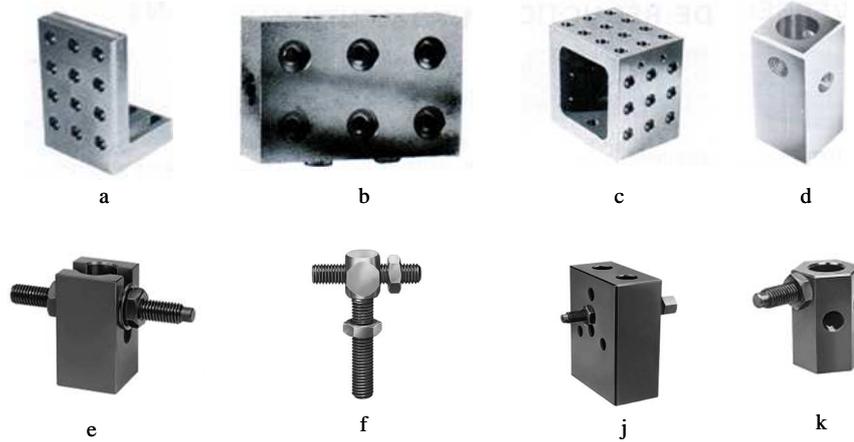


Figure 3.48 Eléments d'orientation. [Nor00]

La mise à distance (hsi) se fait sans support pour $h_{si}=0$. Par contre si $h_{si}\neq 0$ et si la position de l'appui est donnée par le pas des modules, la mise à distance se fait avec empilage d'un appui cylindrique fixe 2111 (figure 3.49a), d'une entretoise 2116 (figure 3.49b), d'un vérin d'appui réglable 2136 (figure 3.49c) ou d'une rallonge 02035-120750 (figure 349d).



Figure 3.49 Eléments de mise à distance. [Nor00]

Si la direction d'appui est parallèle à la direction de posage de l'appui prépondérant (cas de l'appui prépondérant), dans ce cas la fonction du support est de mettre à hauteur l'appui (empilage h_{pi}). Plusieurs cas sont à envisager : lorsque $h_{pi}=0$, on monte l'élément d'appui directement sans support. Lorsque $h_{pi} \leq h_{max}$, on a empilage d'un appui cylindrique fixe 2111, d'une entretoise 2116, d'un vérin d'appui réglable 2136 ou d'une rallonge 02035-120750. Lorsque $h_{pi} \geq h_{max}$, on peut utiliser soit une console support 4 faces 2044 tous simplement une console carrée 2041 avec un empilage d'un appui cylindrique fixe 2111, d'une entretoise 2116 ou d'un vérin d'appui réglable 2136.

4.1.2 Correction pour le cas où la position de l'appui est différente de celle donnée par le pas du module

Si la position de l'appui est différente de celle donnée par le pas du module, c'est à dire différent du pas donné par la grille des trous de la plaque de base, alors dans ce cas on utilise un support réglable 2146 (figure 3.50) avec un empilage d'un appui cylindrique fixe 2111, d'une entretoise 2116 ou d'un vérin d'appui réglable 2136.

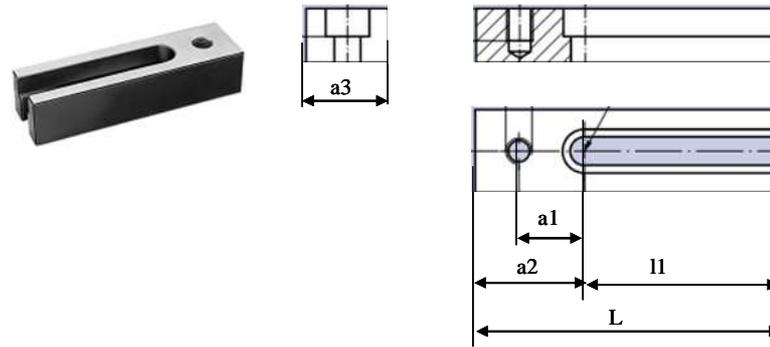


Figure 3.50 Support réglable utilisé pour la correction. [Nor00]

4.2 Choix des éléments de liaison pour le bridage

Lorsque la hauteur de la surface de bridage est inférieure à la longueur du tirant de la bride, on peut utiliser soit le tirant plus le pied de bride pour lier la bride avec la plaque de base ou bien utiliser un bloc de bridage 2306 (figure 3.51) ou une entretoise de bridage 2316 (figure 3.52) selon la hauteur. Pour soulever la bride on peut utiliser aussi une entretoise de bridage 2316 (figure 3.53). Ces éléments peuvent aussi être utilisés dans le cas de l'appui et le bridage combiné (figure 3.54).



Figure 3.51 Bloc de bridage. [Nor00]

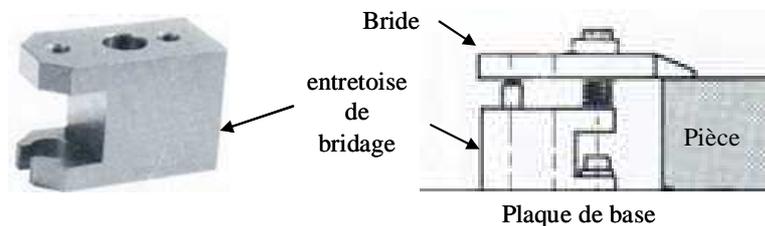


Figure 3.52 Entretoise de bridage. [Nor00]

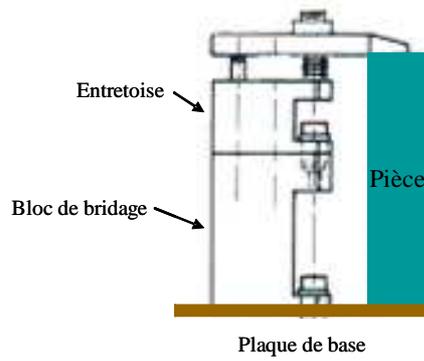


Figure 3.53 Exemple de bridage avec entretoise de bridage en supplément. [Nor00]

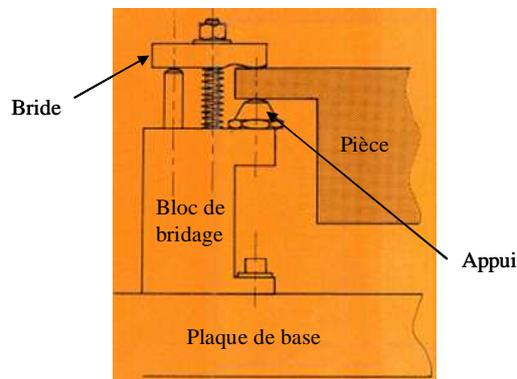


Figure 3.54 Exemple de bridage combiné. [Nor00]

4.3 Construction des tours du montage d'usinage

Les tours du montage peuvent être construites en ajoutant le nombre nécessaire d'éléments pour avoir la hauteur de l'élément du montage. On a les tours d'appui et les tours de bridage. Logiquement on a 6 tours d'appui, 3 tours pour l'appui prépondérant, 2 tours pour l'appui secondaire et une tour pour l'appui tertiaire. Pour ce qui est du bridage on a autant de tour de bridage qu'il y a de brides sur la pièce. Les tours d'appui sont constituées des éléments d'appui plus les supports d'appui tandis que les tours de bridage sont constituées de la bride plus le tirant plus le support qui soulève la bride (figure 3.58). Si on utilise le dispositif intégrant l'appui et le bridage la tour sera constitué de l'appui plus la bride plus s'il ya lieu un support pour avoir la hauteur voulu (figure 3.59). La tour d'appui peut être constituée de la touche d'appui seule qui peut se fixer directement sur la plaque de base sans élément intermédiaire (Figure 3.55) ou bien constituées de plusieurs éléments (figure 3.56, 3.57).

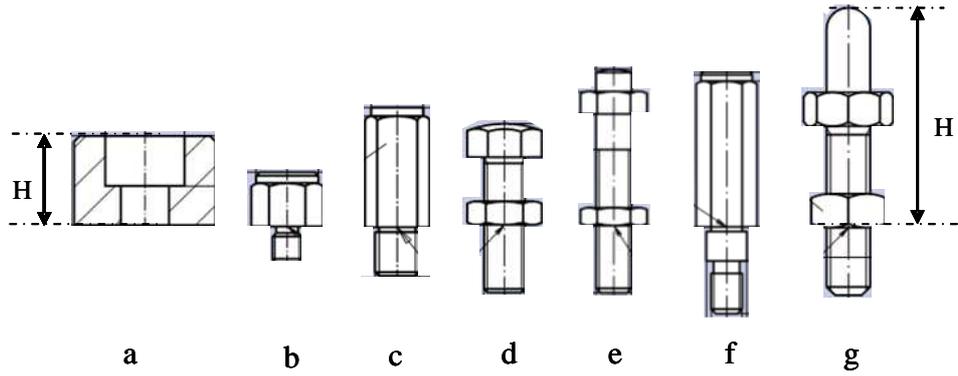


Figure 3.55 Tours d'appui constituées uniquement par une touche d'appui.

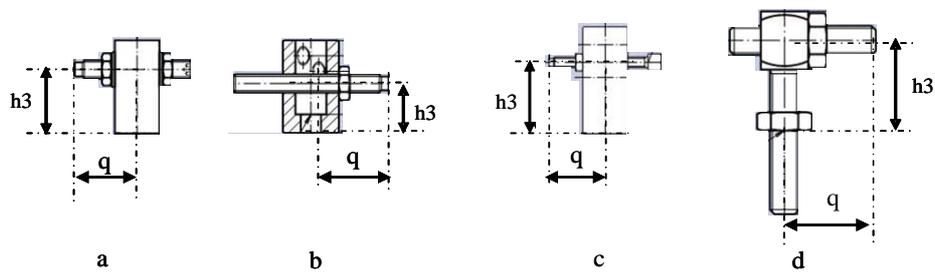


Figure 3.56 Tours d'appui secondaires et tertiaires constituées uniquement de butée d'appui.

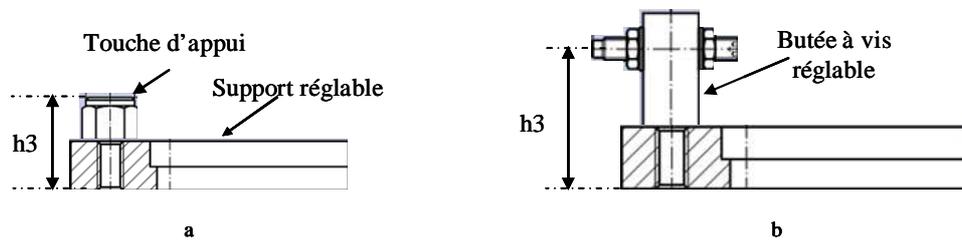


Figure 3.57 Tours d'appuis constituées du support réglable avec élément d'appui.

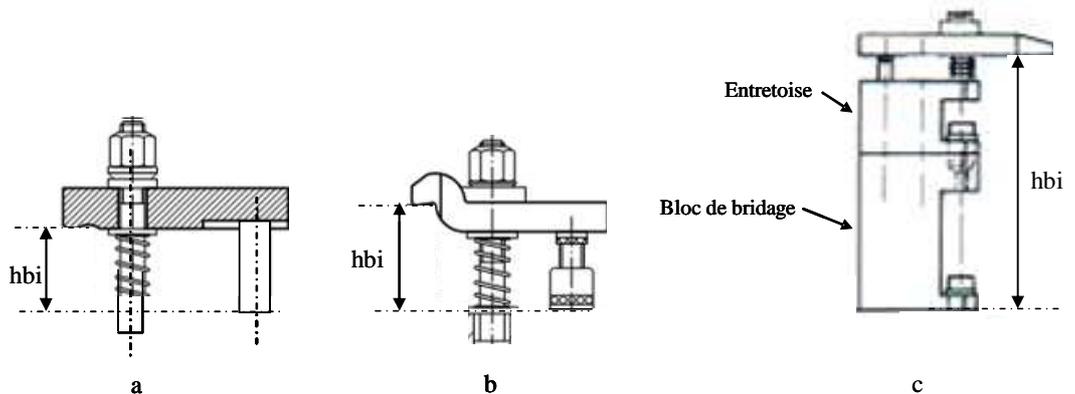


Figure 3.58 Tours de bridage.

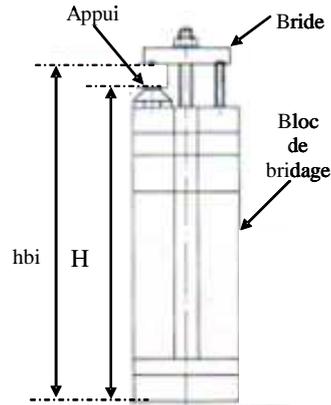


Figure 3.59 Tours d'appui et de bridage combinés.

4.3.1 Les éléments accessoire

Généralement on a dans les éléments accessoire les goujons qui sont caractérisés par leur diamètre, leur longueur total, la longueur des parties filetés et leur résistance, les écrous caractérisés par leur type (écrou H, écrou Hm, écrou à embase, écrou à porté sphérique), leur diamètre, leur hauteur et leur résistance, les rondelles caractérisés par leur type (type M.U, Rondelle autobloquante, Rondelle ressort, Rondelle concave ou bien convexe, ...,etc.), leur diamètre et leur épaisseur, les ressorts caractérisé par leur diamètre, leur force et leur flèche.

4.3.2 Choix des éléments accessoire

Le diamètre des goujons est choisi compatible avec le diamètre des trous de la plaque de base. Les écrous sont choisis pour le même diamètre des goujons ainsi que le diamètre des rondelles. La longueur des goujons pour les tours de bridage est facile à déterminé car c'est la longueur h_{bi} plus l'épaisseur de la plaque de base plus l'épaisseur de la bride plus l'épaisseur de l'écrou.

Les écrous sont choisis surtout pour leur résistance. La classe de résistance d'un écrou devra toujours être égale ou supérieure à celle de la vis. Exemple: pour une vis classe de résistance 8.8, choisir systématiquement un écrou classe de résistance 8 (ou plus, mais jamais moins).

Généralement on utilise les rondelles type M.U. Les rondelles autobloquantes empêchent le desserrage des vis exposées à des contraintes radiales, des oscillations ou des vibrations. Les rondelles ressort sont aussi utilisées pour empêcher le desserrage. Les rondelles concaves et convexes sont utilisées pour caler avec précision des surfaces d'appui obliques, jusqu'à un angle d'inclinaison d'environ 4° .

4.4 Stratégie de choix des éléments de liaisons

(1) Si la direction d'appui est parallèle à la direction du posage de l'appui prépondérant, Plusieurs cas sont à envisager :

- $h_{pi} = 0$ et H ne dépasse pas la hauteur des touche d'appui : la touche d'appui est montée directement sur la plaque de base sans support,
- $H+h_{pi} \leq h_{max}$: Empilage de : appui cylindrique fixe (2111), entretoise (2116), vérin d'appui réglable (2136),
- $H+h_{pi} > h_{max}$: Utilisation de consoles support 4 faces (2044) ou console carrée (2041) avec un empilage de : appui cylindrique fixe (2111), entretoise (2116) ou vérin d'appui réglable (2136).

Si la position de l'appui est différente de celle donnée par le pas du module alors on utilise un support réglable 2146 avec un empilage d'appui cylindrique fixe (2111), une entretoise (2116) ou un vérin d'appui réglable (2136).

(2) Si la direction d'appui est perpendiculaire à la direction du posage de l'appui prépondérant, L'orientation se fait à l'aide d'un des modules :

Equerre coulissante nervuré (2256), console support 4 faces (2044), console carrée (2041) ou une butée de position (2128),

La mise à distance $q+h_{si}$ se fait : pour $h_{si} = 0$: montage direct sans support, pour $h_{si} \neq 0$: avec empilage d'appui cylindrique fixe (2111), entretoise (2116), vérin d'appui réglable (2136) ou butée de position (2128) si la position de l'appui est donnée par le pas des modules.

Si la position de l'appui est différente de celle donnée par le pas du module alors on utilise un support réglable (2146) avec un empilage d'appui cylindrique fixe (2111), une entretoise (2116) ou un vérin d'appui réglable (2136).

5 Assemblage

Après avoir choisi tous les éléments du montage et après avoir formées les tours d'appui et de bridage, il s'agit maintenant de réaliser l'assemblage pour obtenir le montage d'usinage complet, prêt à l'utilisation.

L'assemblage consiste à trouver la position et l'orientation exacte de chaque tour du montage pour la fixer à sa place sur la plaque de base. Ce module consiste à déterminer les points d'assemblage qui sont les points de référence des tours du montage. Les séquences du montage sont également déterminées dans cette partie. Premièrement, on monte les tours d'appui de l'appui prépondérant sur la plaque de base, puis les tours de l'appui secondaire, puis tertiaire et en fin les tours de bridage pour maintenir la pièce en position.

L'assemblage obéit à des règles de connaissances et des règles expertes modélisées par les spécialistes du montage d'usinage. Ces règles tiennent compte du bon fonctionnement du montage d'usinage car durant son utilisation le montage d'usinage est dans un environnement fortement pollué par les copeaux et le fluide de coupe. La conception du montage d'usinage devra permettre une bonne évacuation de ces éléments de manière à éviter de perturber le fonctionnement du système d'échange du porte-pièce. De plus, durant le chargement et déchargement de la pièce les surfaces en contact avec la pièce doivent rester propres de manière à éviter une erreur de mise en position de la pièce dans le repère d'usinage. Pour cela il faut essayer d'avoir une répartition des éléments du montage qui ne retient pas les copeaux et le fluide de coupe.

5.1 Positionnement et orientation des tours d'appui sur la plaque de base

Dans cette première partie d'assemblage, on doit d'abord placer les 3 tours de l'appui prépondérant, puis les 2 tours de l'appui secondaire et finalement la tour de l'appui tertiaire. Deux cas se présentent pour le montage des tours d'appui, le cas où les tours se montent directement sur les trous de la plaque de base sans éléments d'ajustement et le cas avec éléments d'ajustement. Pour le premier cas il n'y a pas de problème, on fixe les tours d'appui directement sur leurs trous de coordonnées déterminées auparavant. Le deuxième cas nécessite un traitement pour le placement des supports réglables.

5.1.1 Placement des tours de l'appui prépondérant

A partir des coordonnées des trois points d'appui dans le repère global de la plaque de base, on essaye de placer les tours d'appui de l'appui prépondérant sur la plaque de base. Si les coordonnées des trois tours d'appui coïncident avec la grille des trous de la plaque de base, on n'orient pas les tours mais, on les place directement sur la plaque de base. Dans le cas contraire on doit placer et orienter les supports universels d'ajustement dans le bon sens pour qu'il n'entre pas en collision avec les autres éléments du montage d'usinage.

5.1.2 Positionnement et orientation des tours de l'appui secondaire

Une fois les tours d'appui de l'appui prépondérant placés, les tours d'appui secondaire peuvent être placés et orientés dans le sens adéquat. Comme pour les tours de l'appui prépondérant, si les coordonnées des tours d'appui de l'appui secondaire coïncident avec la grille des trous de la plaque de base, on fixe directement les tours d'appui sur la plaque de base avec l'orientation de l'axe de l'appui perpendiculairement à la surface d'appui de l'appui secondaire de la pièce. Dans le cas contraire on doit placer et orienter les supports universels d'ajustement dans le bon sens pour qu'il n'entre pas en collision avec les autres éléments du montage d'usinage. Une fois le support réglable orienté et placé sur la plaque de base, il faut aussi orienter l'élément d'appui par rapport au support réglable.

5.1.3 Positionnement et orientation des tours de l'appui tertiaire

De la même façon pour l'appui tertiaire, si les coordonnées de l'appui coïncident avec la grille des trous de la plaque de base, on place directement la tour d'appui en orientant l'axe de l'appui perpendiculairement à la surface d'appui de l'appui tertiaire de la pièce. Dans le cas contraire on doit placer et orienter le support réglable d'ajustement dans le bon sens pour qu'il n'entre pas en collision avec les autres éléments du montage d'usinage.

5.1.4 Positionnement et orientation des supports réglables d'ajustement

Les supports universels réglables sont positionnés et orienter de tel sort qu'ils lient la tour d'appui avec le trou de la plaque de base si les coordonnées de la tour d'appui ne coïncident pas avec les coordonnées de la grille des trous de la plaque de base. Pour la rigidité du montage d'usinage, il faut essayer de fixer le support universel dans le trou le plus proche de la position du point d'appui si aucun obstacle n'empêche. Pour placer et orienter chaque support universel, on doit tenir compte de l'ensemble des tours d'appui et de bridage pour qu'elles n'entrent pas en collision entre elle. Il faut aussi penser à laisser des cavités pour l'évacuation des copeaux et du fluide de coupe. Si la plaque devrait se monter verticalement, il faut que les supports universel réglable soient les plus verticaux possible afin d'évacuer les copeaux et le fluide de coupe.

Une fois les coordonnées (X_m, Y_m) de l'élément d'appui sont définies, le support réglable peut être fixé sur n'importe quelle trou de la plaque de base qui se trouve dans la zone compris entre les deux cercle de rayon a_1 et (a_1+l_1) respectivement (figure 3.60).

Si on attributs les coordonnées (X_m, Y_m) au point d'appui dans le plan $X_b O Y_b$ et les coordonnées (X_i, Y_i) à chaque trous de la plaque de base, pour que le support réglable coïncide avec l'un des trous de la plaque de base, il faut que la condition (3.33) soit respectée.

$$a_1 \leq \sqrt{(X_i - X_m)^2 + (Y_i - Y_m)^2} \leq (l_1 + a_1) \quad (3.33)$$

Les coordonnées sont exprimées en coordonnées polaire (3.34).

$$\begin{cases} x = r \cos \alpha \\ y = r \sin \alpha \end{cases} \quad (3.34)$$

Maintenant qu'on a définie la zone de fixation du support réglable, il faut bien l'orienter et définir l'angle de rotation α du repère $O_e(X_e, Y_e, Z_e)$ du support réglable par rapport au repère global $O_b(X_b, Y_b, Z_b)$ de la plaque de base. L'orientation du support réglable doit tenir compte de la rigidité et de la compacité du montage, de l'évacuation des copeaux et du fluide de coupe et de l'accessibilité pour ne pas entrer en collision avec les autres éléments du montage d'usinage.

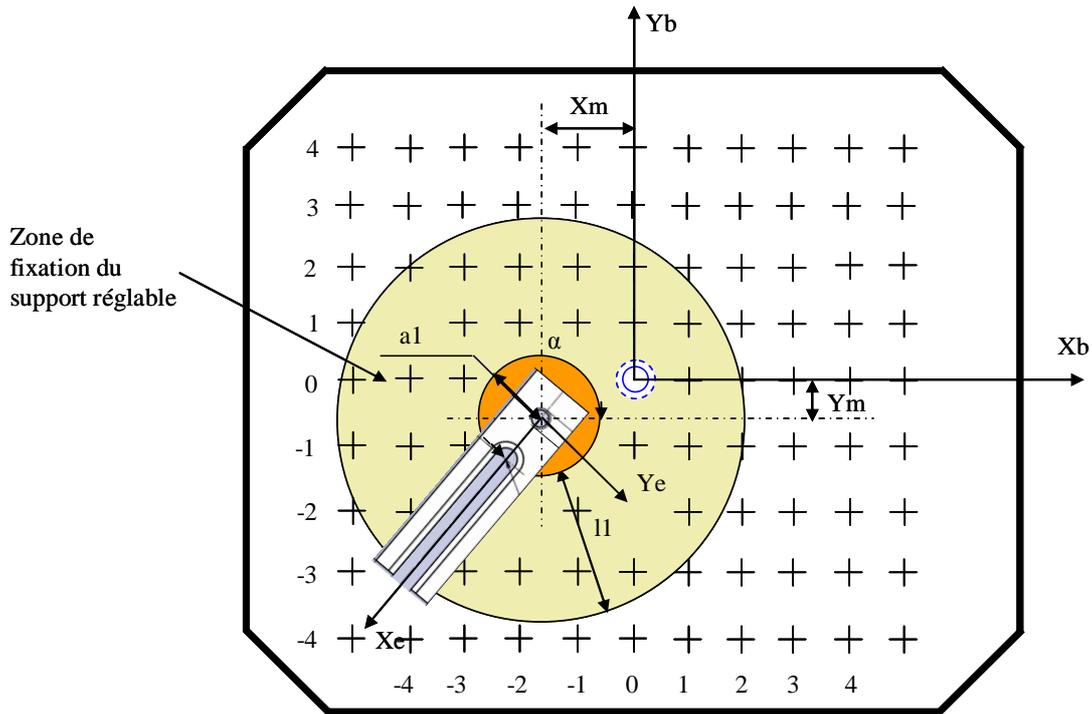


Figure 3.60 Zone de fixation du support réglable.

Pour ce qui est de la rigidité et pour l'appui secondaire et tertiaire, il est préférable que la direction de l'appui soit parallèle à l'axe X du support réglable. Pour la compacité du montage, il est aussi préférable que les supports réglables soit vers l'intérieur de la pièce. Pour l'évacuation des copeaux et du fluide de coupe, il est souhaitable de laisser des cavités formées par les éléments du montage pour ne pas avoir d'obstacles à l'évacuation des copeaux et du fluide de coupe. Enfin pour l'accessibilité, il faut vérifier chaque fois que les éléments du montage n'entrent pas en collision entre eux. Pour cela on adopte la stratégie suivante :

Avant de commencer l'assemblage, on délimite la zone admissible de fixation de chaque tour ou bien de chaque élément d'appui. Pour les tours simples qui vont se fixer directement sur la plaque de base, la zone admissible de fixation est un cercle de rayon la plus grande dimension par rapport au point de fixation qui est le centre du trou de la plaque de base où elle va se fixer. Pour les supports réglables, la zone admissible de fixation est un cercle de rayon (a_1+l_1) et de centre les coordonnées du point d'appui (figure 3.61). La distance entre deux cercles 1 et 2 est donnée par la relation (3.35).

$$Disc = \sqrt{(Xm_1 - Xm_2)^2 + (Ym_1 - Ym_2)^2} \quad (3.35)$$

Si $Disc$ est supérieure à la somme des deux rayons des deux cercles on n'a pas un problème de collision entre les deux supports réglables, dans le cas contraire il faut éviter le point de contact des deux supports qui se trouve dans la zone de contact qui se trouve diamétralement opposé aux deux cercles (figure 3.62).

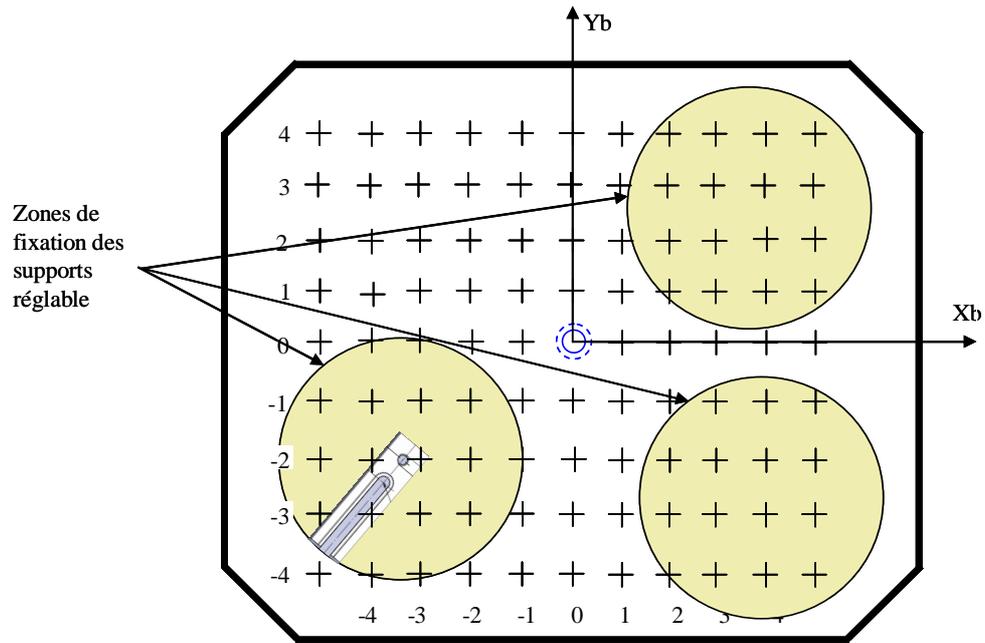


Figure 3.61 Zones de fixation des tours de l'appui prépondérant.

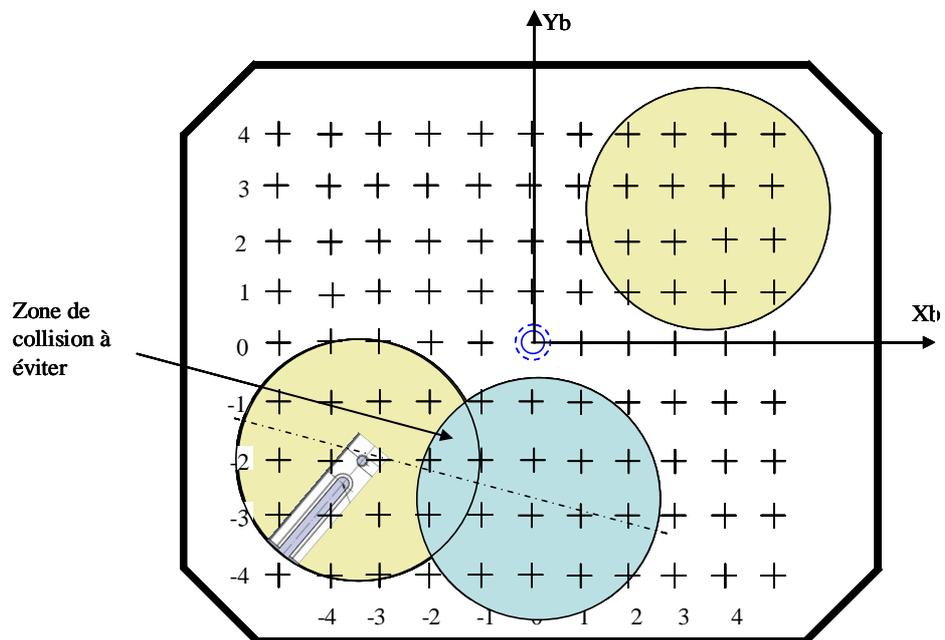


Figure 3.62 Zone de collision à éviter.

5.1.5 Positionnement et orientation des tours de bridage

Une fois tous les éléments d'appui fixés sur la plaque de base et la pièce positionnée sur ses points d'appui, les éléments de bridage doivent être placés et orientés sur la plaque de base et sur la pièce. Les tours d'éléments de bridage peuvent être constituées soit de brides avec leurs tirants, soit de support de bridage. Dans les deux cas on doit définir les trous de placement des tours de bridage et leurs orientations pour qu'ils n'entrent pas en collision ni avec la pièce ni avec les autres éléments du montage d'usinage. Pour les zones admissibles de placement des tours de bridage sur la plaque de base, ce sera un demi-cercle vers l'extérieur de la frontière de la pièce avec un rayon et un centre qui dépendent de la nature de l'élément de bridage utilisé (figure 3.63).

De la même façon on doit représenter les zones admissibles de placement des tours de bridage avec les zones des tours d'appui en même temps pour faire l'orientation de chaque tour et éviter ainsi toute collision.

Une fois tous les éléments orientés et positionnés sur leur place il reste à placer tous les rondelles et écrous sur les brides ainsi que les vis de fixation sur les tours d'appui.

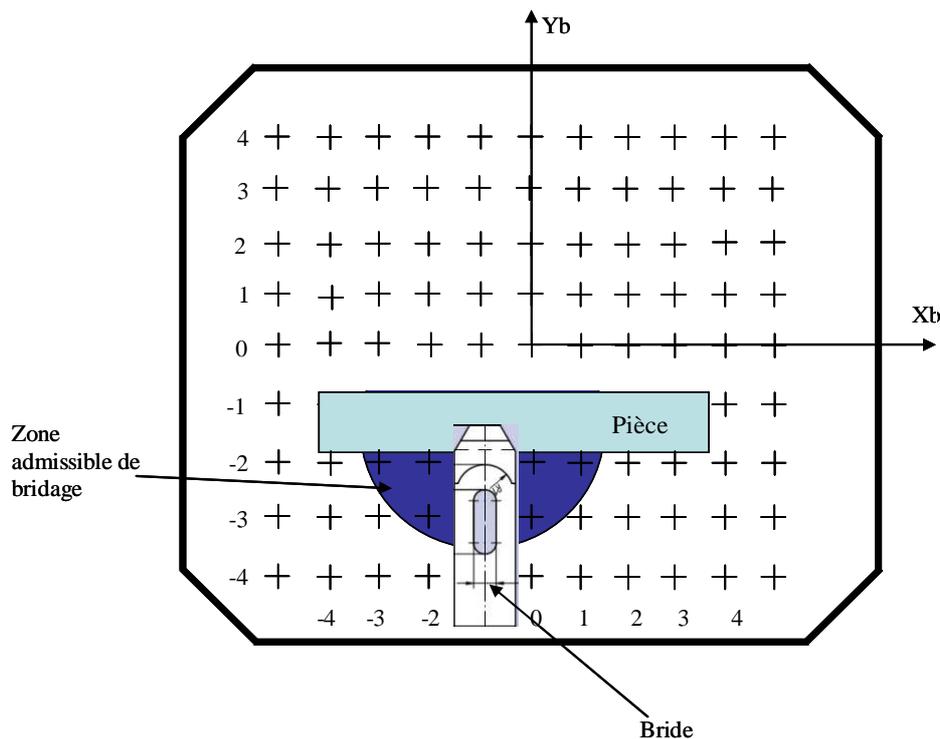


Figure 3.63 Zone admissible de placement de la bride sur la plaque de base.

5.1.6 Algorithme d'assemblage

- (1) Tracer la zone admissible d'assemblage de chaque tour d'appui et de bridage sur la plaque de base.
- (2) Si les coordonnées des trois tours de l'appui prépondérant coïncident avec les coordonnées de la plaque de base, l'assemblage se fait directement sans se soucier des autres éléments du montage sinon si l'assemblage se fait grâce aux supports réglables, il faut tenir compte des autres tours du montage,
- (3) Si les coordonnées des deux tours de l'appui secondaire coïncident avec les coordonnées de la plaque de base, on fixe directement les deux tours sinon si les supports réglables sont utilisés il faut les orienter vers l'intérieur de la pièce et éviter la collision avec les autres tours du montage,
- (4) Si les coordonnées de la tour de l'appui tertiaire coïncident avec les coordonnées de la plaque de base, on fixe la tour directement sur le trou de la plaque de base sinon, on l'oriente vers l'intérieur en évitant la zone de contact avec les autres éléments du montage,
- (5) Finalement les tours de bridage seront fixés sur leurs zones admissibles d'assemblage en évitant la collision avec les autres éléments du montage.
- (7) Si des tours combinés d'appui et de bridage sont utilisés, il faut les fixer dans leurs zones admissibles d'assemblage en évitant la collision avec les autres éléments du montage

5.2 Les éléments de soutien

Dans certains cas, il est nécessaire d'ajouter des éléments dits de soutien (figure 3.64) pour éviter les déformations et/ou les vibrations indésirables de la pièce durant son usinage. Le soutien est assuré par des éléments réglables afin de ne pas perturber la qualité de la mise en position. Les efforts de coupe génèrent eux aussi des déformations. Pour limiter ces déformations, il est nécessaire d'ajouter des supports qui sont placés aux endroits où l'amplitude de la déformation risque d'être importante.

Dans notre démarche nous proposons de découpler le choix des éléments de soutien du choix des éléments d'appui et de bridage et traiter le problème de soutien après avoir choisi les éléments d'appui et de bridage. Car on ne peut s'avoir s'il est nécessaire d'ajouter ces éléments de soutien qu'après avoir conçu le montage d'usinage et procédé au préalable à une vérification de la solution finale soit par simulation ou bien après avoir fait un essai réel sur le montage d'usinage.

Les points de placement des éléments de soutien sont définis par les lieux où il y a risque de déformations ou de vibrations avec le respect de la contrainte d'accessibilité de ces éléments à ces endroits.

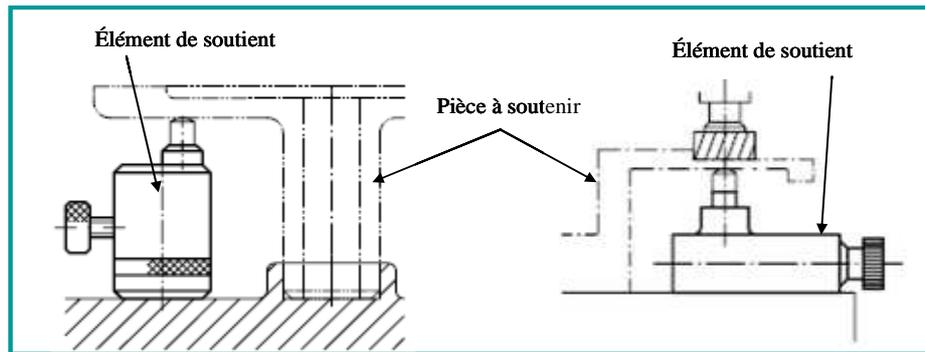


Figure 3.64 Eléments de soutien.

5.3 Vérification de la solution finale

Une fois le montage d'usinage assemblé sur la plaque de base avec tous les éléments d'appuis, de bridage et de liaison on peut faire une vérification finale de la solution retenue afin de valider notre choix. Cette vérification peut être réalisée par un calcul éléments finis en procédant au maillage de l'ensemble du montage d'usinage dans un logiciel de simulation et de calcul éléments finis comme ANSYS par exemple. Cette simulation nous permet de calculer les déformations subites par la pièce sous l'influence des efforts de coupe et de bridage et de vérifier la stabilité de la pièce durant l'usinage. On peut évaluer la qualité de la pièce. Par simulation de la trajectoire d'outil par un outil FAO, on peut vérifier la collision entre l'outil et les éléments du montage d'usinage pour valider la solution finale. Cette partie n'est pas concernée par notre travail.

CHAPITRE 4 :

IMPLEMENTATION

1 Introduction

Afin de valider la méthodologie et la démarche de conception du montage d'usinage proposées dans les chapitres 2 et 3, nous avons développé un module informatique appelé **ResGamme_MontageU**. L'architecture et le fonctionnement du module sont présentés dans ce chapitre. Dans la première partie on va présenter le module informatique, ses entrées, ses sorties et son fonctionnement. Dans la deuxième partie, un exemple d'application d'une pièce industrielle va être présenté et commenté pour montrer les résultats obtenus.

2 Présentation de notre module de conception du montage d'usinage

Pour valider notre démarche de conception du montage d'usinage présentée précédemment, nous avons développé un module informatique, appelé **ResGamme_MontageU**, Ressource **Gamme Montage** d'Usinage. Ce module permet de matérialiser le montage d'usinage à partir de la prise de pièce et des informations issues de l'architecture de la gamme d'usinage. Il est intégré dans un système de génération de gamme d'usinage qui s'appelle PROPEL implémenté dans un environnement CFAO Open Cascade version 5.1. Notre module (figure 4.1) travaille à partir des données de la sous-phase générées par PROPEL, il est constitué de quatre sous-modules principaux qui sont :

- sous-module de choix des éléments en contact avec la pièce,
- sous-module de placement des éléments en contact avec la pièce,
- sous-module de choix des éléments de liaison,
- sous-module d'assemblage.

La construction du module **ResGamme_MontageU** a nécessité une bonne compréhension des objets manipulés par Open Cascade et la connaissance de la structure de PROPEL ce qui nous à coûté beaucoup de temps vue que le code de PROPEL n'est pas assez commenté. Malgré toutes les difficultés on a pu apprendre à travailler avec Open Cascade, comprendre le fonctionnement de PROPEL et implémenter notre module.

Le module **ResGamme_MontageU** est entièrement automatique sauf le sous-module de placement des éléments en contact avec la pièce qui nécessite le recours à MatLab pour optimiser le placement des éléments de l'appui prépondérant. Une fois la liste des sous-phases générée, toutes les informations sont disponibles pour effectuer les calculs nécessaires à la conception du montage d'usinage pour une prise de pièce donnée.

2.1 Les entrées du module

Les entrées de notre module informatique **ResGamme_MontageU** sont principalement les résultats générés par PROPEL et qui sont récupéré par notre module. Ils sont essentiellement le modèle géométrique de la pièce finie et le modèle prise de pièce avec tous ses attributs. La base des éléments technologiques modulaires est dans un support informatique à part. Toutes ces données sont considérées comme données globales.

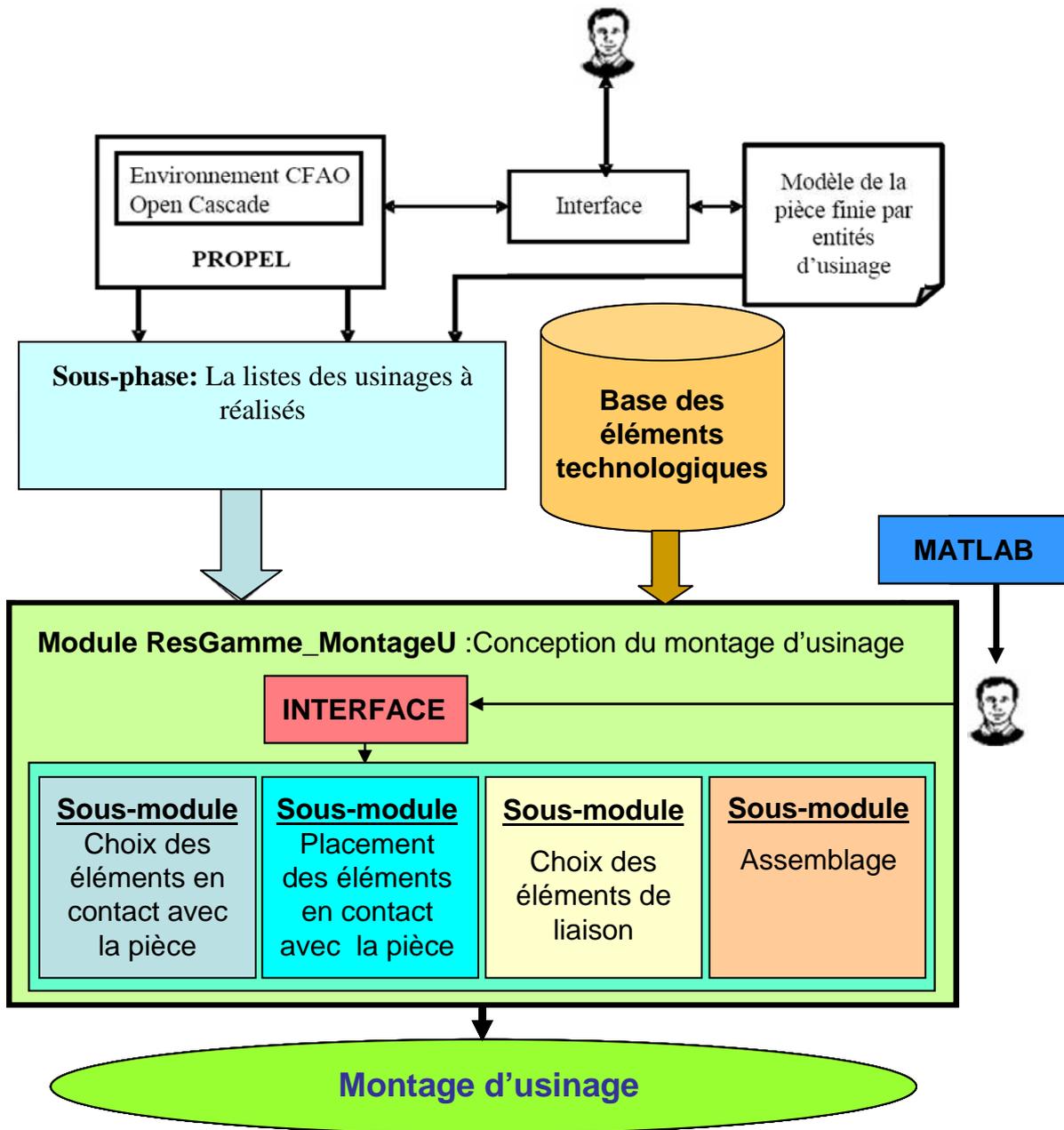


Figure 4.1 Organigramme du module informatique ResGamme_MontageU

2.1.1 La pièce

La pièce est représentée par ses modèles géométriques surfacique et volumique représentant le modèle de la pièce finie d'usinage et le modèle de la pièce par entités d'usinage ainsi que les données complémentaires comme le matériau de la pièce, ses dimensions, les dimensions de chaque surface,..., etc.

2.1.2 Le modèle prise de pièce

PROPEL qui est un générateur de gamme d'usinage génère la liste des sous-phases incluant la prise de pièce (figure 4.2). Notre module travaille à partir de ce modèle de prise de pièce et prend les attributs de ce modèle comme données d'entrées. Pour une pièce donnée et une fois l'atelier est créé par l'utilisateur avec la configuration des machines-outils, une liste de lien d'opération, machine-outil et prise de pièce est générée et chaque prise de pièce a ses propres attributs.

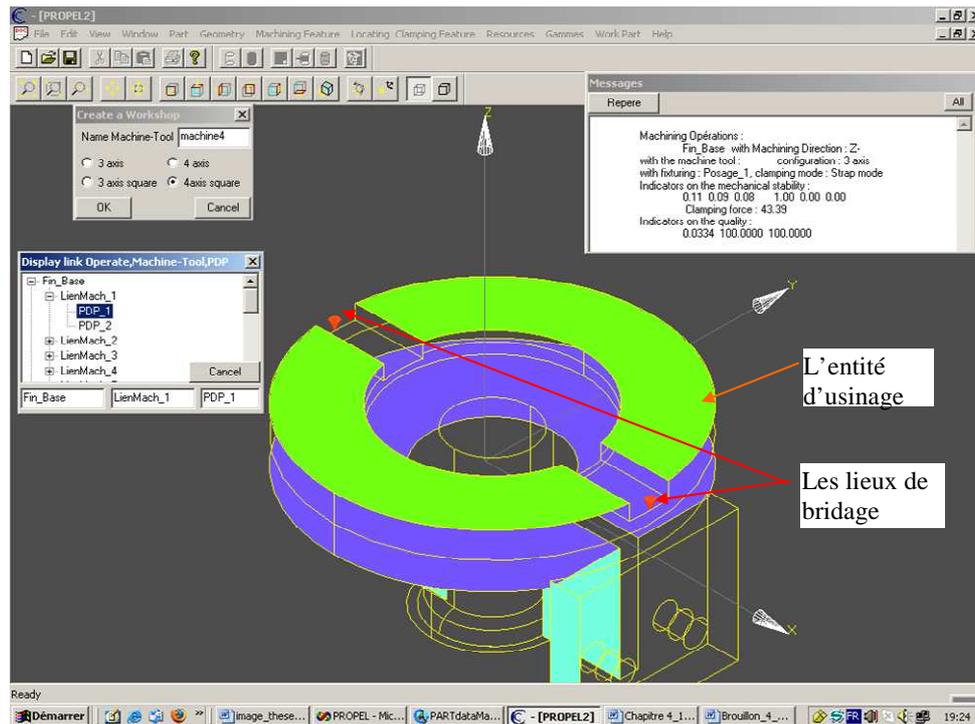


Figure 4.2 Modèle pris de pièce générée par PROPEL

2.1.3 La base des éléments technologiques

La base des éléments technologiques comporte l'ensemble des éléments technologiques modulaires en format STEP 3D et chaque élément peut être importé par l'interface CAO du système suivant un référentiel propre à chaque élément. On a structuré la base des éléments technologiques en cinq grandes parties (figure 4.3) selon le catalogue Norelem [Noroo], à savoir :

- Les éléments de base,
- Les éléments d'appui (figure 4.4),
- Les éléments de positionnement,
- Les éléments de bridage (figure 4.5),
- Les éléments accessoires qui comprennent les vis, les goujons, les écrous, les rondelles, ..., etc.

Chaque partie comporte l'ensemble des éléments qui remplissent la même fonction. Chaque élément est caractérisé par la dimension du diamètre de taraudage de la plaque de base (M6, M10, ..., etc.) et par sa référence, son type et ses dimensions.

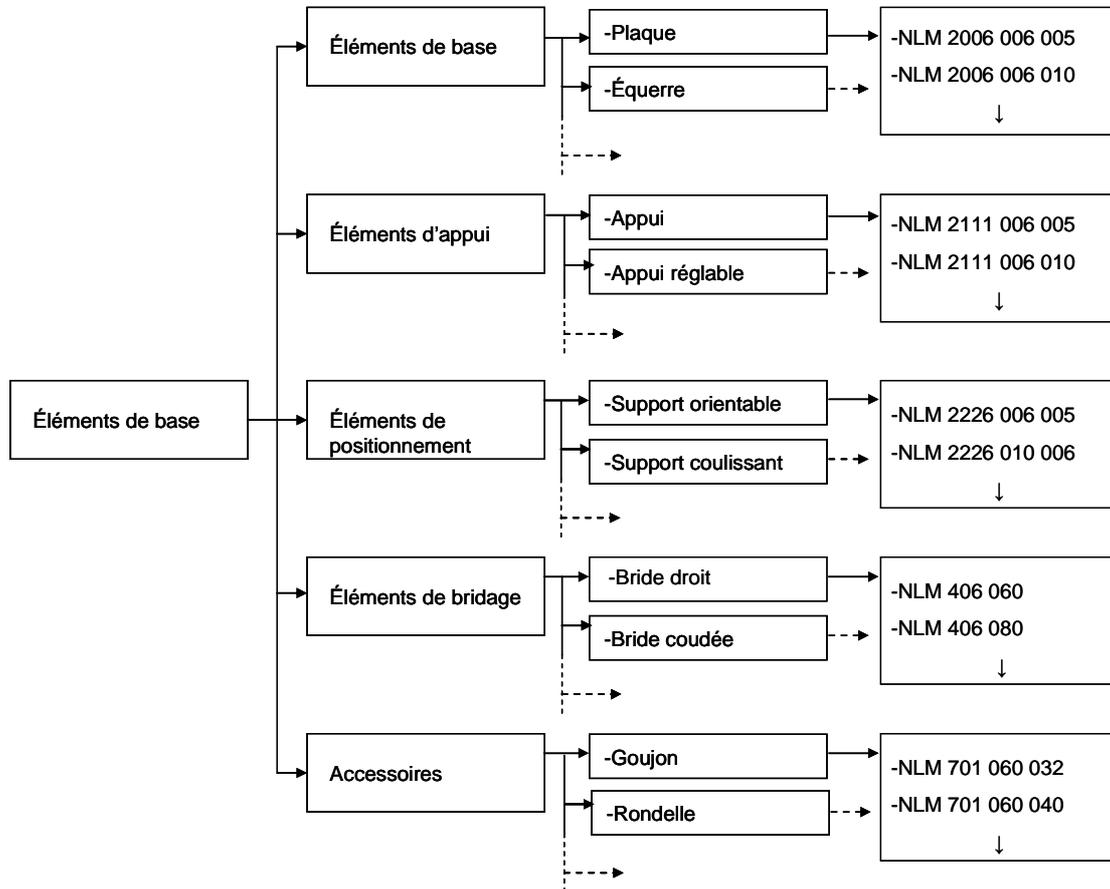


Figure 4.3 Structure de la base de données des éléments modulaires

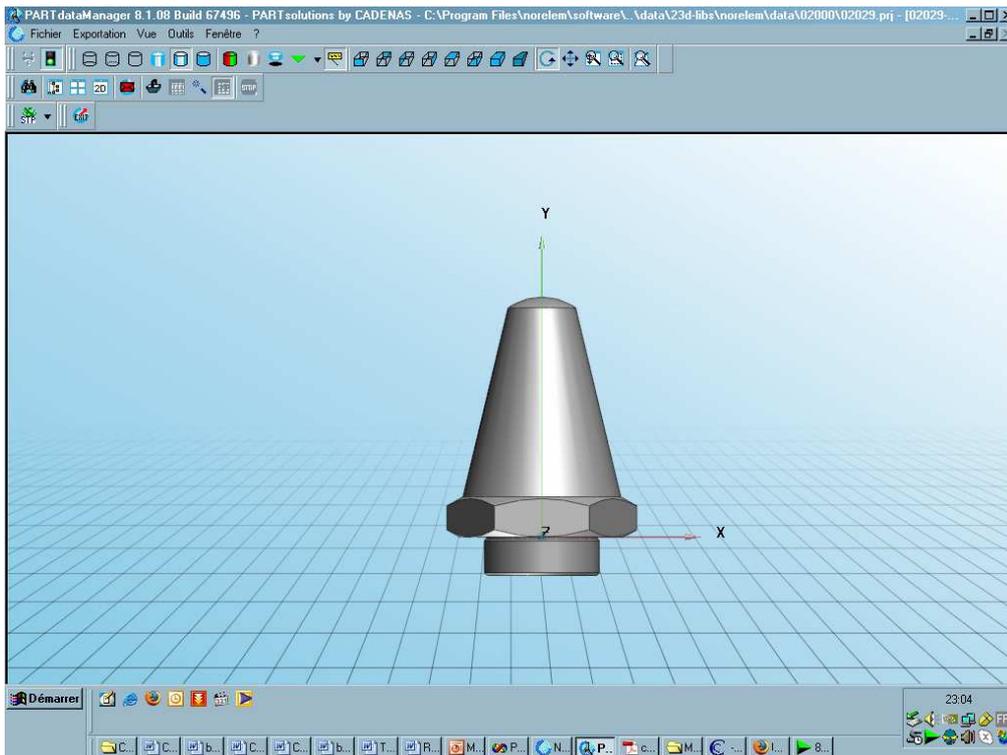


Figure 4.4 Elément d'appui extrait de la base modulaire (élément d'appui, appui plat, NLM 2111 006 005)

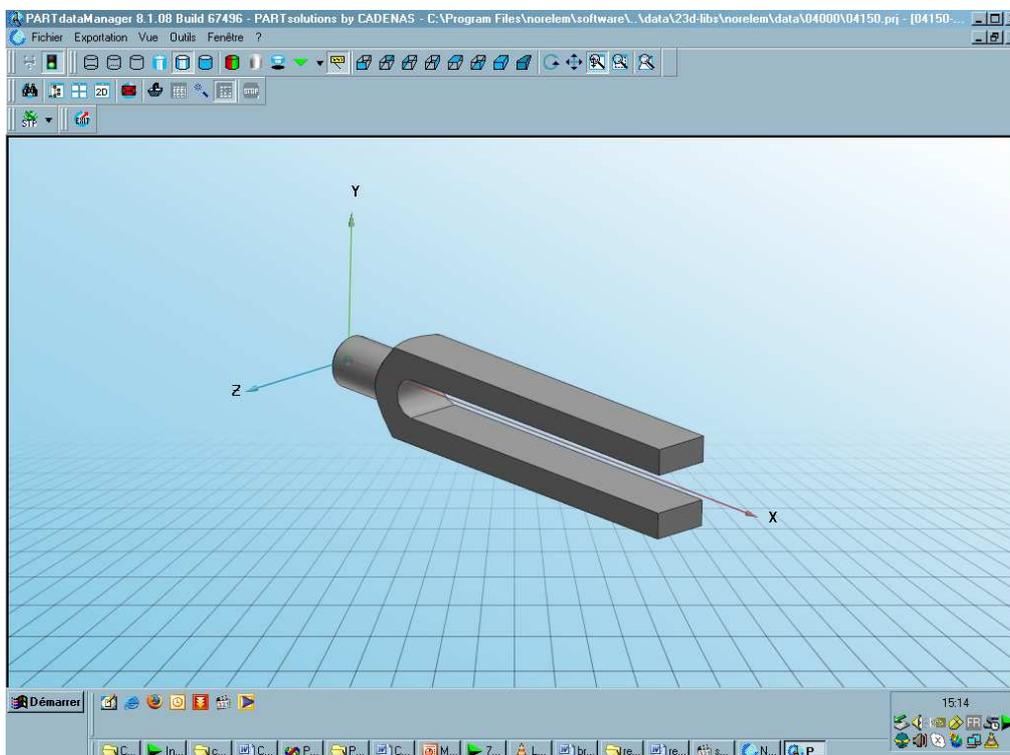


Figure 4.5 Elément de bridage extrait de la base modulaire (04150-301)

2.2 Les sorties du module

En sortie du module **ResGamme_MontageU**, Nous obtenons la liste des éléments technologiques modulaires participant au montage d'usinage, les coordonnées de positionnement de chaque élément dans le repère global et la visualisation du montage avec la pièce en 3D.

2.3 Les limites du module

Notre module de conception du montage d'usinage se limite aux posages de type 3-2-1R et 3-2-1C, le posage de type 4-1-1 n'est pas pris en considération. Le cas des éléments combiné n'est pas pris aussi en considération dans notre étude. Le bridage de type étai, mandarin ou le bridage combiné bride/étai ne sont pas pris en considération. Le traitement des pièces déformables n'est pas implémenté.

2.4 Le rôle de l'utilisateur

Le module **ResGamme_MontageU** peut être utilisé par un gammiste, spécialiste de la préparation de la fabrication, qui manipule couramment les données dans l'environnement CFAO. Le module est bien clair et facile d'utilisation et ne nécessite aucune compétence supplémentaire.

Après avoir téléchargé une session d'une pièce déjà exécutée pour générer sa gamme d'usinage, le gammiste doit créer un atelier en introduisant les configurations des machines-outils qu'il veut utiliser. Ensuite il peut sélectionner l'une des prises de pièce générée par PROPEL dans la liste des liens opération, machine-outil, prise de pièce. À partir de ce moment l'utilisateur peut concevoir le montage d'usinage à travers les sous-menus du menu principal "Work Part" en passant par une optimisation à l'aide de MatLab. Les résultats obtenus seront ensuite introduits à nouveau dans PROPEL, et le traitement sera poursuivi jusqu'à l'obtention du montage d'usinage prêt à l'utilisation.

2.5 Les informations disponibles après la sélection d'une prise de pièce

Après la sélection du lien opération, machine-outil et prise de pièce (figure 4.6), toutes les informations disponibles pour exécuter les commandes de conception du montage d'usinage sont :

- La liste des opérations d'usinage à réaliser avec le type (ébauche, demi-finition ou finition),
- La machine outil caractérisée par : le type de la machine-outil et sa configuration. On a quatre types de configurations de machine outil qui sont implémentés. (3 axes, 3 axes avec équerre, 4 axes et 4 axes avec équerre),
- Le posage : caractérisé par le nom du posage, le type de posage (3-2-1r, 3-2-1c ou 4-1-1). Chaque posage est constitué d'un triplet d'appui : appui prépondérant, appui secondaire et appui tertiaire. Chaque appui est caractérisé par son nom, son type (plan ou cylindrique), sa géométrie (la liste des surfaces qui le compose) et sa direction. Chaque surface est caractérisée par son nom, ces dimensions, sa direction et son type (brut ou usiné),
- La liste des entités d'usinage caractérisées par la direction d'usinage c'est-à-dire la direction d'accès des outils de coupe pour réaliser l'opération d'usinage, le type de

l'entité, la géométrie qui la compose, le défaut de planéité, la rugosité et le facteur de tolérance,

- Le bridage caractérisé par le mode de bridage et l'effort de bridage minimal, les lieux potentiels de placement des brides : caractérisés par la direction de bridage, la géométrie sur laquelle on applique le bridage, les coordonnées du point d'application du bridage et les entités d'usinage accessibles avec ce bridage.
- Les indicateurs de qualité : pour l'appui prépondérant, l'appui secondaire et l'appui tertiaire.
- Les indicateurs de stabilité (de glissement et de basculement) : pour l'appui prépondérant, l'appui secondaire et l'appui tertiaire.

3 L'intégration de notre système dans PROPEL

Notre système est intégré dans **PROPEL** comme c'est montré dans la figure 4.1. L'héritage commence de bas en haut. La classe mère « *Session* » contient l'objet **aPiece** qui contient tous les attributs de la pièce en termes de géométrie. **ResGammeEnU** représente les entités d'usinage avec leurs attributs. Après on trouve la classe **ResGamme_PdP** qui contient la prise de pièce avec ses attributs. **Ressource** représente les machines-outils et outils c'est-à-dire l'atelier utilisé. **ResGamme** comme son nom l'indique représente l'architecture de la gamme d'usinage et les sous-phases associées.

En sortie de **ResGamme**, une liste de liens opérations avec les liens machines ainsi que les prises de pièces associées sont données. **ResGamme_MontageU** est lié à **ResGamme** par le lien d'héritage et récupère le nom de la prise de pièce à considérer. L'objet **aMontage** contient tous les attributs du montage d'usinage qui vont être utilisés dans le traitement.

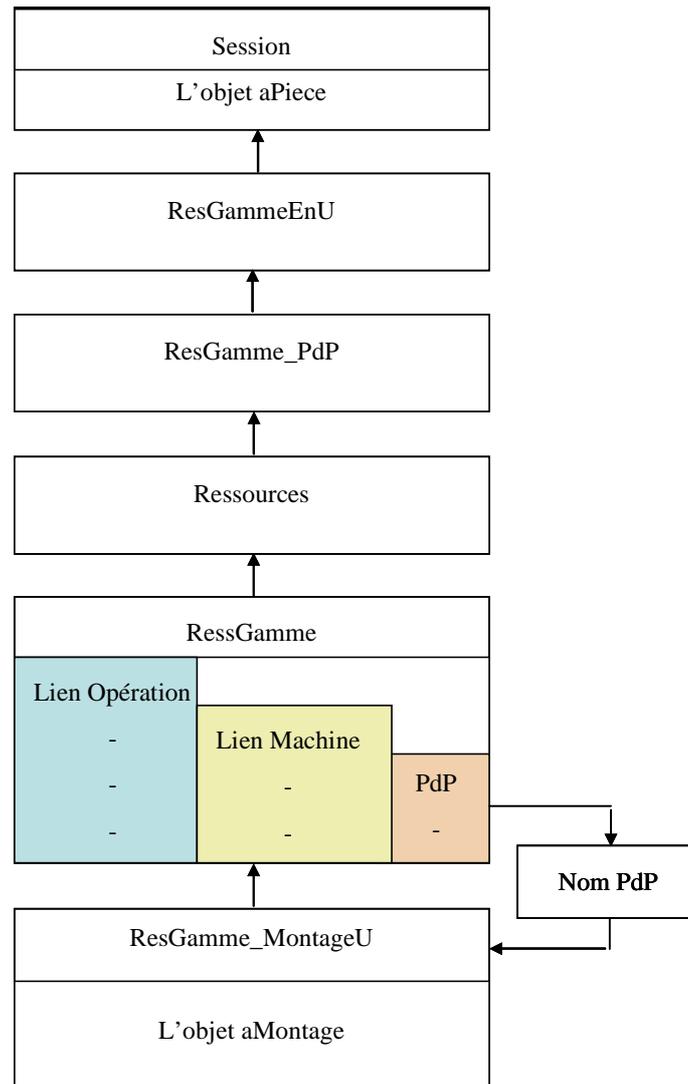


Figure 4.6 Structure du système

4 La structure du module *ResGamme_MontageU*

La structure du module **ResGamme_MontageU** s'articule autour de quatre principaux sous-modules (figure 4.7). Après avoir sélectionné une sous-phase générée par PROPEL on récupère toutes les informations sur cette prise de pièce qui vont être les données globales de notre module et qui sont reconnus auparavant dans la section 4.1.5.

Au début, il faut évaluer les efforts de coupe qui agissent sur la pièce en intensité, direction et points d'application de chaque effort et ainsi les efforts de bridage qui assurent le maintien de la pièce au cours du processus d'usinage. Pour les efforts de bridage on doit déterminer leurs résultantes en intensité et point d'application.

Aussi, on doit déterminer la classe de matériels technologiques à utiliser parmi celles disponibles dans la base technologique en déterminant les dimensions de la plaque de base en longueur et largeur et surtout le diamètre des trous car ce diamètre sera

le même diamètre pour tous les éléments technologiques qui vont être utilisés par la suite du traitement.

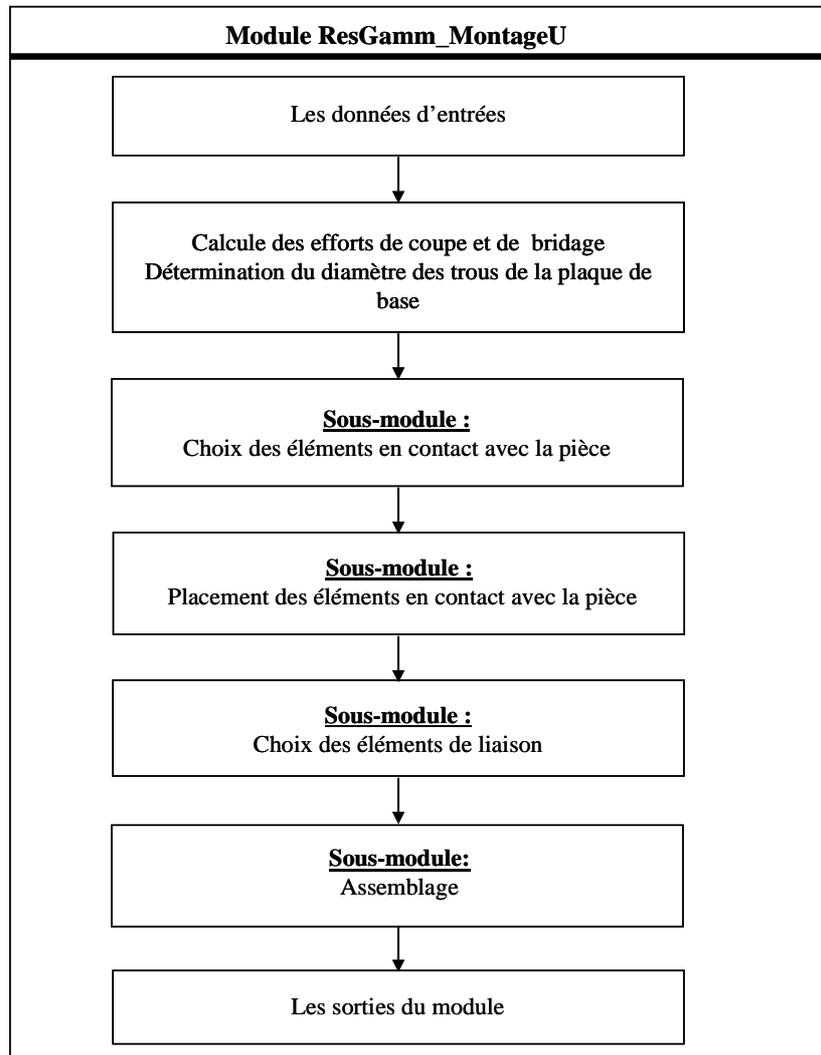


Figure 4. 7 La structure du module de conception du montage d'usinage *ResGamme_MontageU*

4.1 Le sous-module de choix des éléments technologiques en contact avec la pièce

Le sous-module de choix des éléments technologiques en contact avec la pièce permet de sélectionner les éléments technologiques d'appui et de bridage en contact avec la pièce. Le choix s'effectue en deux temps. Dans un premier temps on doit déterminer le type de contact de l'élément d'appui et de bridage avec la pièce et dans un deuxième temps on doit choisir la forme de l'élément technologique dans la base des éléments technologiques en fonction de l'accessibilité.

4.1.1 Les entrées du sous-module

Les entrées sont :

- l'intensité et la direction des efforts de coupe et de bridage,
- le triplet d'appui,
- le matériau de la pièce avec ces caractéristiques,
- les indicateurs de qualité et de glissement de chaque appui,
- la base des éléments technologiques,

4.1.2 Le choix des éléments technologiques

Le calcul de la pression maximal et les indicateurs de qualité et de glissement permettent de déterminer le type de contact. La forme de la touche d'appui est définie selon les considérations d'accessibilité de chaque élément à la surface d'appui.

Pour les éléments de bridage en contact avec la pièce et selon les lieux potentiels de bridage, on choisi un ensemble de bride.

4.1.3 Les sorties du sous-module

En sortie, on obtient la liste des éléments technologiques en contact avec la pièce. Chaque élément est reconnu par sa référence dans la base des éléments technologiques. Chaque appui possède une liste d'élément propre à lui. Les éléments de bridage sont sauvegardés dans une liste des éléments de bridage.

4.2 Le sous-module placement des éléments technologiques sur la pièce

Le sous-module de placement des éléments technologiques en contact avec la pièce permet de trouver les lieux de placement des touches d'appui pour chaque appui ainsi que les lieux de placement des brides sur les surfaces de bridage. Pour l'appui prépondérant on doit passer par une optimisation sous Matlab. Le lien entre les deux logiciels se fait à travers un fichier d'échange de format texte.

4.2.1 Les entrées du sous-module

Les entrées du sous-module sont :

- le triplet d'appui,
- la géométrie et l'entendu de chaque appui,
- le centre de gravité de la pièce,
- les points d'application des efforts de coupe et le point d'application de la résultante des efforts de bridage.

4.2.2 Le placement des éléments technologiques

Le placement des éléments technologiques en contact avec la pièce passe par plusieurs étapes qui sont :

1. Détermination de l'étendu de chaque appui,
2. Détermination des lieux potentiels de placement des éléments technologiques à travers un décalage du contour de l'appui,
3. Calcul d'optimisation pour le placement des appuis de l'appui prépondérant,
4. Placement des touches d'appuis de l'appui secondaire,
5. Détermination des coordonnées de l'appui tertiaire.

4.2.3 Placement des éléments technologiques de l'appui prépondérant

Le placement des éléments technologiques de l'appui prépondérant type appui plan doit passer par une optimisation qui maximise la surface du triangle de sustentation tout en incluant le centre de gravité de la pièce, le point d'application de la résultante des efforts de bridage et les efforts de coupe à l'intérieur de ce triangle. Cette optimisation est programmée sous Matlab en introduisant la géométrie de l'appui, les coordonnées du centre de gravité de la pièce et ainsi que les coordonnées des efforts de coupe et de bridage.

4.2.4 Placement des éléments technologiques de l'appui secondaire

Dans un premier temps, on doit tout d'abord déterminer les lieux potentiels de placement des éléments d'appui. Ensuite la recherche des lieux de placement des deux touches d'appui se fait à travers une boucle qui vérifie à chaque itération l'intersection avec les lieux potentiels de placement et l'accessibilité. Les points de départ se trouvent sur l'intersection entre les lieux potentiels de placement horizontal et vertical (figure 4.8). Si les conditions sont vérifiées au départ, ces points seront retenus.

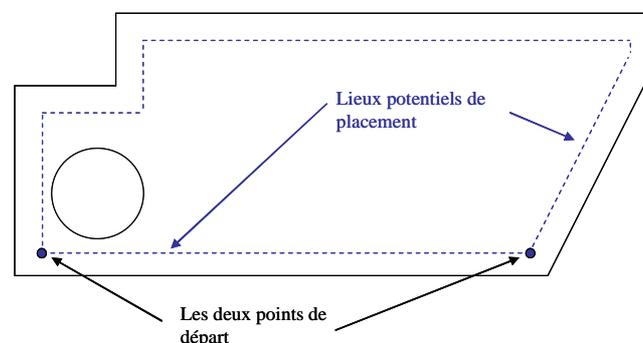


Figure 4.8 Points de départ pour l'algorithme de placement des touches d'appui secondaire

4.2.5 Placement des éléments technologiques de l'appui tertiaire

Une fois les lieux potentiels de placement de l'élément technologique déterminés, une boucle d'itération cherche la position de placement de la touche d'appui sur les lieux potentiels qui se trouvent au plus près de la plaque de base avec vérification chaque fois l'accessibilité. Le point de départ de l'algorithme est le point de milieu de l'appui.

4.2.6 Les sorties du sous-module

En sortie du sous-module on obtient pour chaque élément technologique en contact avec la pièce, les coordonnées de l'origine du repère associé à l'élément dans le repère global. Pour chaque élément les directions pour la transformation du système de coordonnées local au système de coordonnées global sont données. Le résultat des éléments technologiques placés sur la pièce est visualisé en 3 D (figure 4.14).

4.3 Le sous-module choix des éléments de liaison avec la plaque de base

Le sous-module choix des éléments de liaison avec la plaque de base consiste à lier les éléments en contact avec la pièce et la plaque de base.

4.3.1 Les entrées du sous-module

Les entrées du sous-module sont :

- La pièce positionnée par rapport au repère global de la plaque de base.
- Les éléments d'appui en contact avec la pièce placés sur cette dernière avec leurs coordonnées et leurs directions par rapport à la plaque de base,
- Les brides placées sur la pièce avec leurs coordonnées et leurs directions par rapport à la plaque de base,
- La plaque de base avec les coordonnées des trous, l'intervalle entre les trous et l'étendue de la plaque de base

4.3.2 Sélection des éléments de liaison

Le choix des éléments de liaison se fait pour chaque élément en contact avec la pièce. On commence par les éléments d'appui puis les éléments de bridage. La sélection se base sur la direction de l'élément d'appui par rapport à la direction de pose de l'appui prépondérant et en fonction de la distance entre le point de placement de la touche d'appui et la plaque de base. L'algorithme traite le problème séquentiellement c'est-à-dire chaque fois qu'il choisit un élément de liaison, il vérifie l'accessibilité et la possibilité de placement.

4.3.3 Les sorties du sous-module

En sortie du sous-module on obtient la liste des éléments de liaison. Pour chaque élément, les coordonnées exprimées dans le repère global ainsi que les directions de transformation du système de coordonnées local au système de coordonnées global sont données.

4.4 Le sous-module d'assemblage

Le sous-module assemblage permet d'assembler l'ensemble des éléments technologiques de base, d'appui, de bridage, de liaison et les éléments accessoires participant au montage d'usinage après sélection dans les étapes précédentes pour ainsi former le montage d'usinage prêt à l'utilisation sur machine-outil.

4.4.1 Les entrées du sous-module

Les entrées du sous-module sont :

- la pièce en géométrie 3 D positionné par rapport à la plaque de base,
- la liste des éléments technologiques d'appui,
- la liste des éléments de bridage,
- la liste des éléments de liaison,
- la liste des éléments accessoires,
- les coordonnées de placement de chaque élément,

4.4.2 Construction des tours du montage d'usinage

Après avoir choisi les éléments technologiques d'appui, de bridage et leurs éléments de liaison avec la plaque de base on procède à la construction des tours d'appui et de bridage.

4.4.3 Assemblage des éléments technologiques

Dans un premier temps on positionne la pièce par rapport à la plaque de base et chaque tour est placée et orienté selon leurs coordonnées par rapport au repère global de la plaque de base.

4.4.4 Les sorties du sous-module

La sortie du sous-module assemblage est constituée, d'une part, de la visualisation du montage d'usinage en 3 D et, d'autre part, de la nomenclature des éléments du montage avec leurs coordonnées par rapport au repère de la plaque de base.

5 Exemple d'application : (finition de la base)

5.1 Présentation de la pièce

La pièce est en acier de forme quelconque (figure 4.9) présentant des surfaces planes et des surfaces cylindriques. Ses dimensions globales sont 114 X 105 X 60 mm. La pièce doit être exécutée en fraisage avec des opérations de surfacage, de rainurage, d'alésage et de perçage.

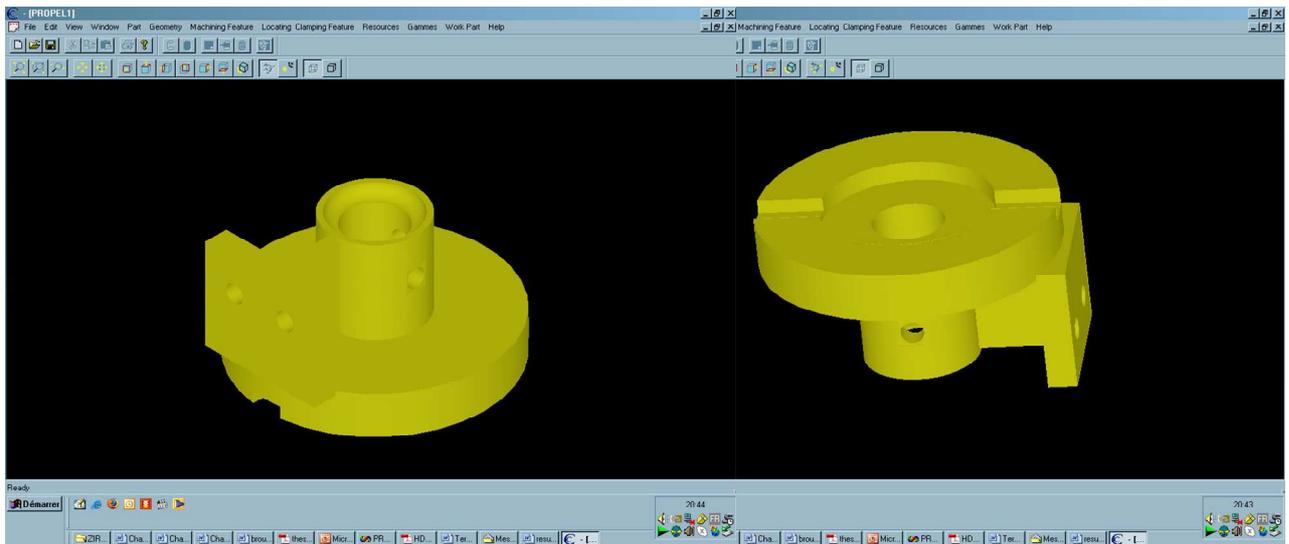


Figure 4.9. Le modèle géométrique de la pièce téléchargée dans l'environnement CAO

5.2 Les différentes étapes de conception du montage d'usinage

Etape 1 : Génération de la gamme d'usinage et sélection d'une sous-phase

Après création de l'atelier à travers la sélection des machines outil et génération de la gamme d'usinage, une sous-phase peut être sélectionnée (figure 4.10).

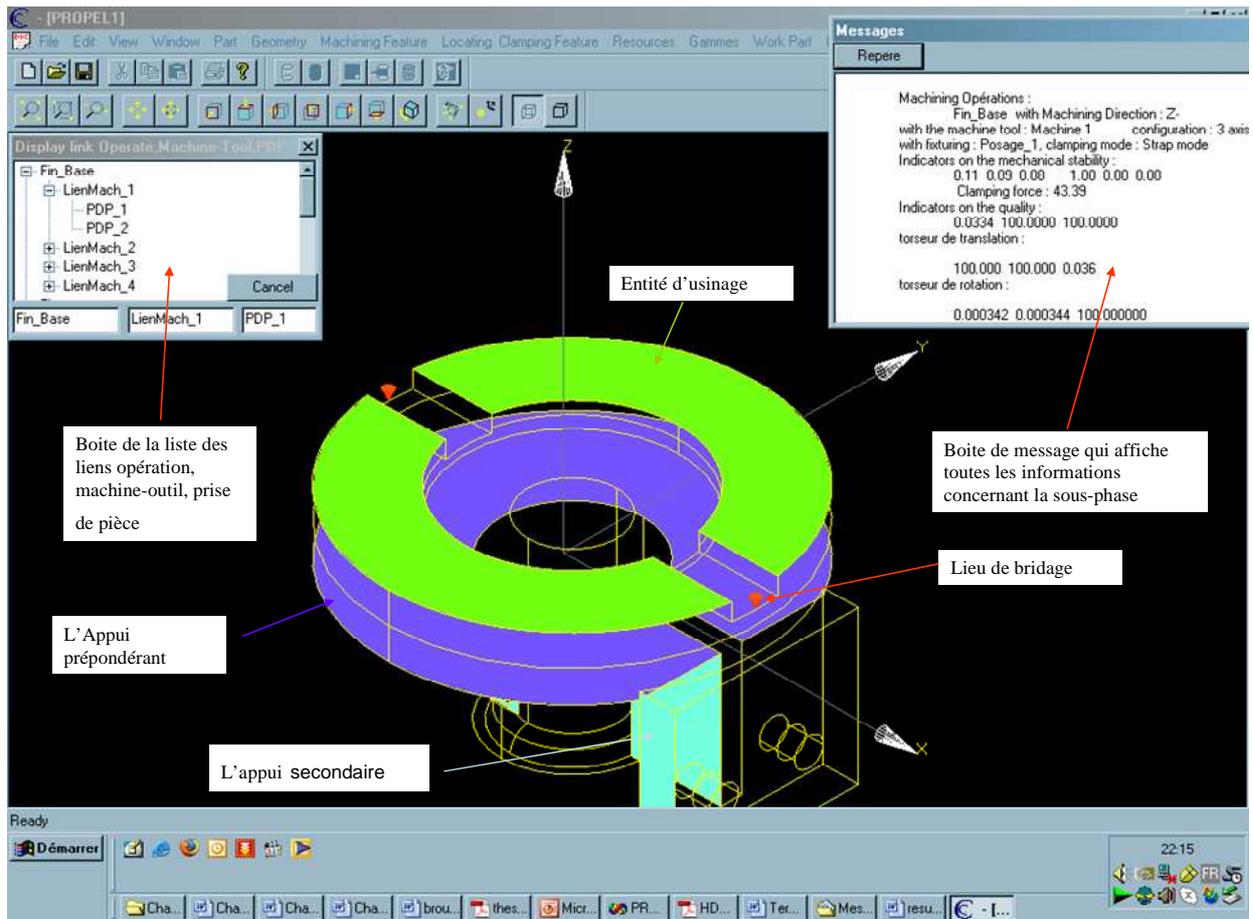


Figure 4.10 Sélection d'une sous-phase

Dans le menu principale *Work Part* on sélectionne le sous menu ***Selection the PDP*** qui nous affiche la même liste des liens opération, machine-outil et prise de pièce mais dans une autre fenêtre que nous avons crée spécialement pour la conception du montage d'usinage. Dans cette nouvelle fenêtre dès que l'on sélectionne une liste d'opération → machine-outil → Prise de pièce dans la liste, on construit l'objet du montage d'usinage et qui va récupérer toutes les données propres a cette prise de pièce qui seront les données globales pour la suite du traitement.

Etape 2 : Choix des éléments technologiques en contact avec la pièce

Dans l'étape 2 on sélectionne dans le menu principale *Work Part* le sous menu *selection of the technological elements* qui va choisir les éléments technologiques d'appui et de bridage.

Etape 3 : Placement des éléments en contact avec la pièce

Lorsqu'on sélectionne le sous-menu *Placement of the technological elements* la fenêtre des messages affiche les données pour l'optimisation de placement des éléments d'appui de l'appui prépondérant (figure 4.11). Les données sont : l'étendu de l'appui, les coordonnées du centre de gravité, les coordonnées des points d'application des efforts de coupe, les coordonnées de la résultante des efforts de

bridage et la distance de décalage. Un fichier d'échange en format texte contient tous ces informations est généré par la suite.

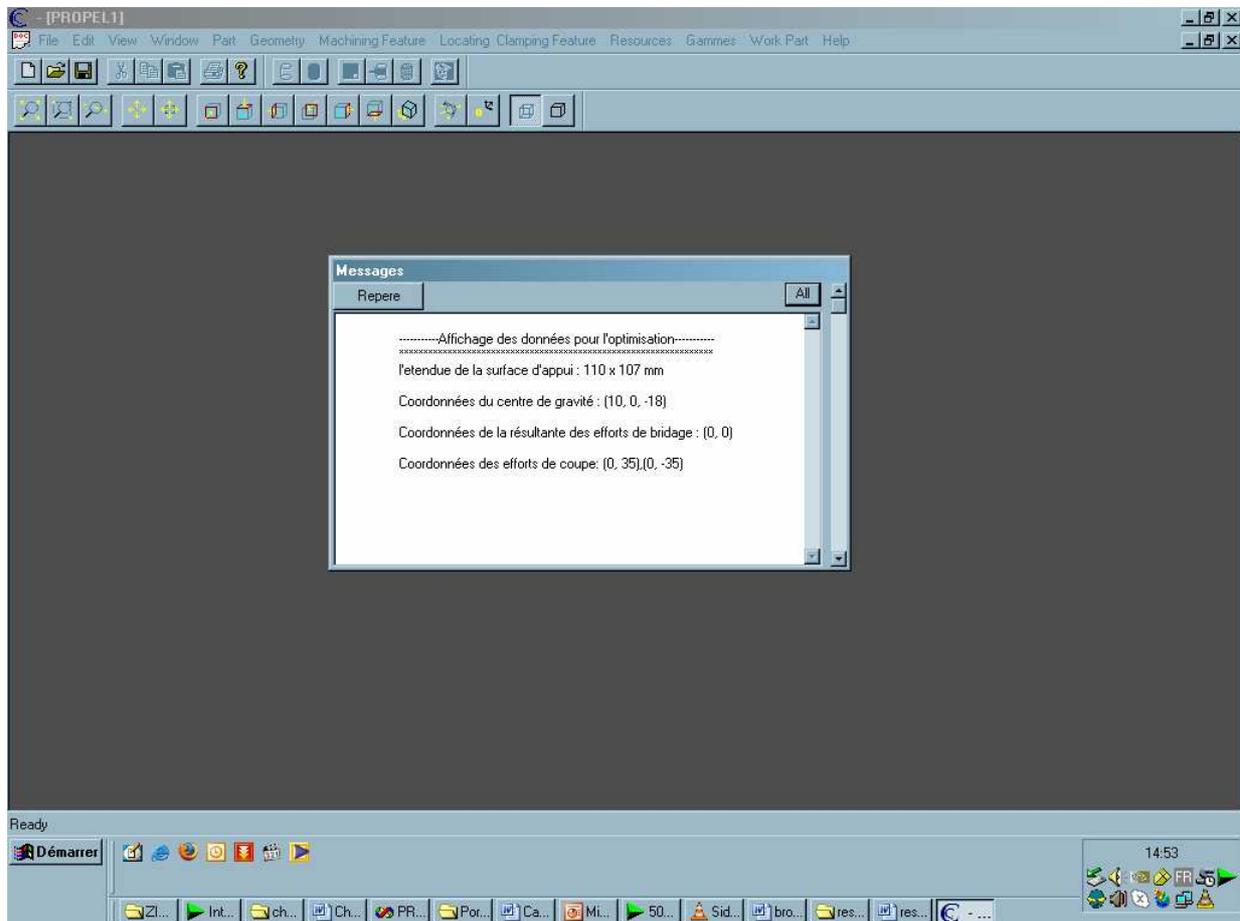


Figure 4.11 Affichage des données pour l'optimisation

Etape 4 : Optimisation du placement des éléments de l'appui prépondérant sous Matlab

Lorsqu'on obtient les résultats d'optimisation de Matlab (figure 4.12) on récupère le fichier d'échange qui contient les résultats d'optimisation et on le fait lire par Open Cascade. Les éléments technologiques en contact avec la pièce s'affichent placés sur la pièce (figure 4.13)

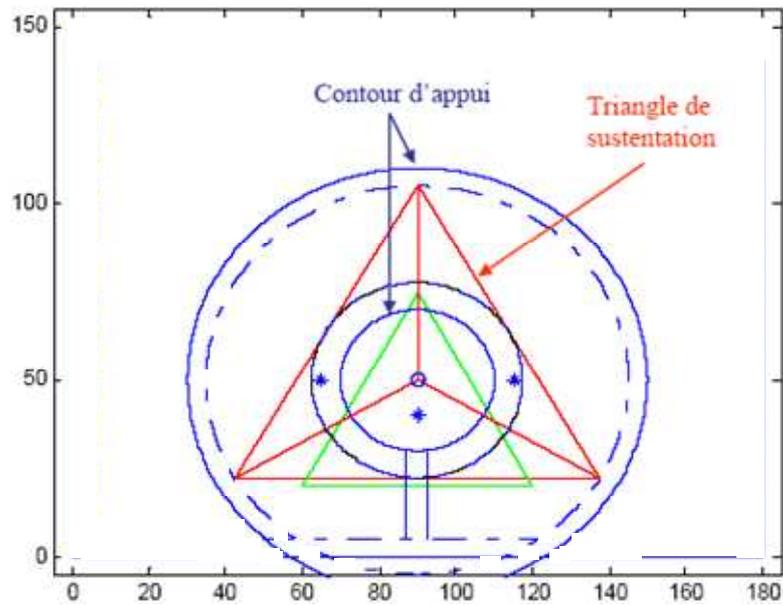


Figure 4.12 Résultats d'optimisation de Matlab

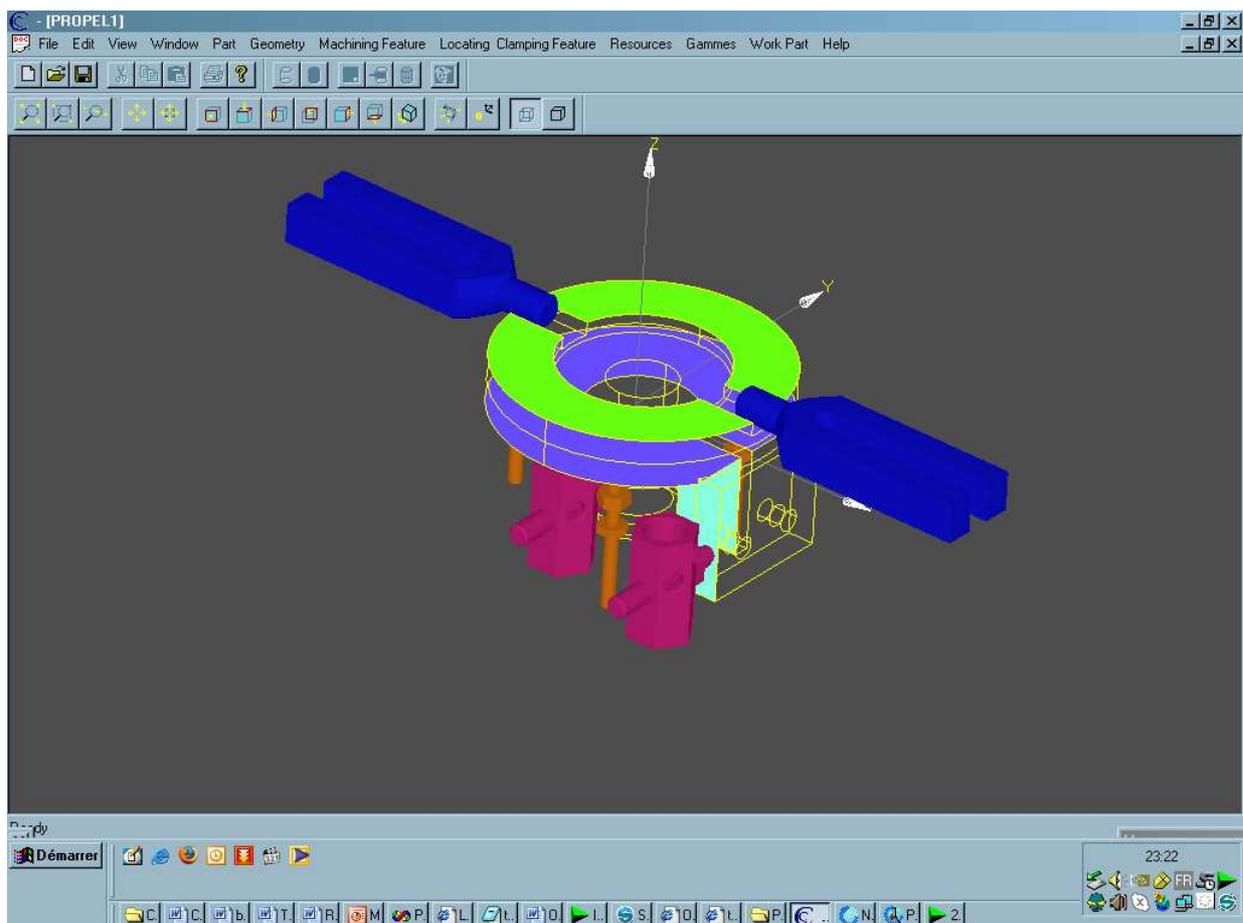


Figure 4.13 Placement des éléments technologiques en contact avec la pièce

Etape 5 : Choix des éléments de liaison et assemblage

A Partir de ce moment on sélectionne le sous-menu Display WorkPart et l'ensemble du montage d'usinage s'affiche. Les (figure 4.14, figure 4.15, figure 4.16 et figure 4.17) montres l'ensemble du montage d'usinage en 3D et en différente vus.

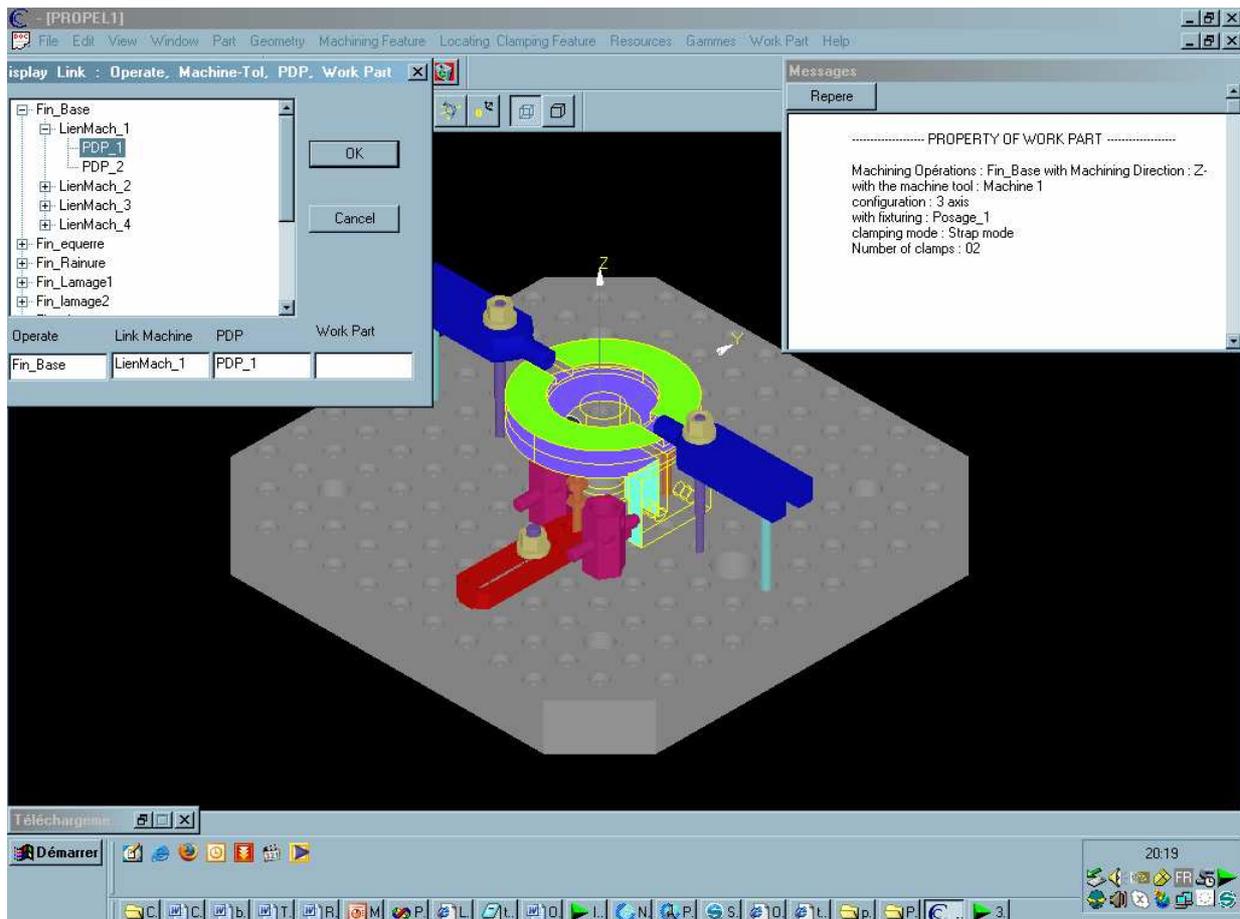


Figure 4.14 Visualisation du montage d'usinage 3D prêt à l'utilisation avec affichage de tous les paramètres

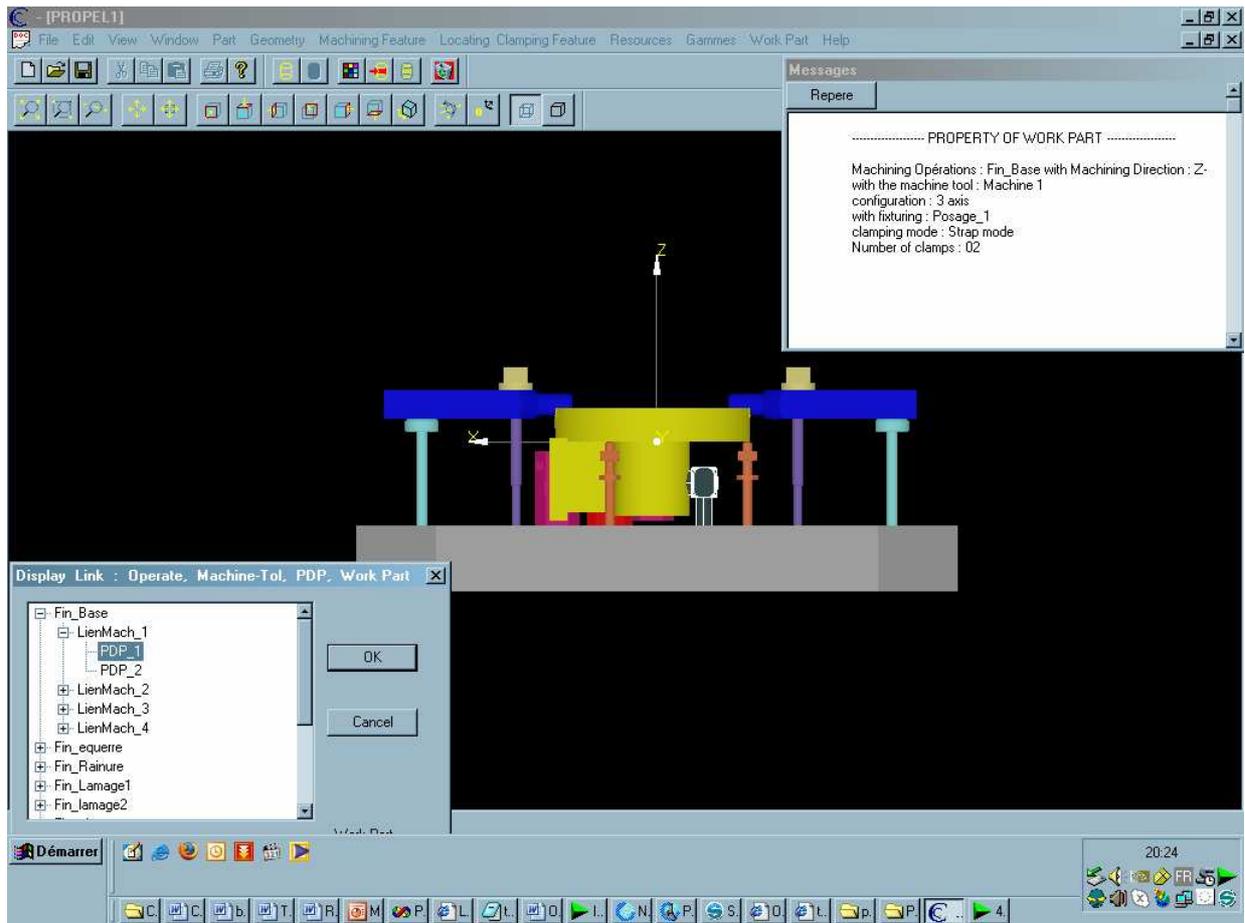


Figure 4.15 Vue de coté

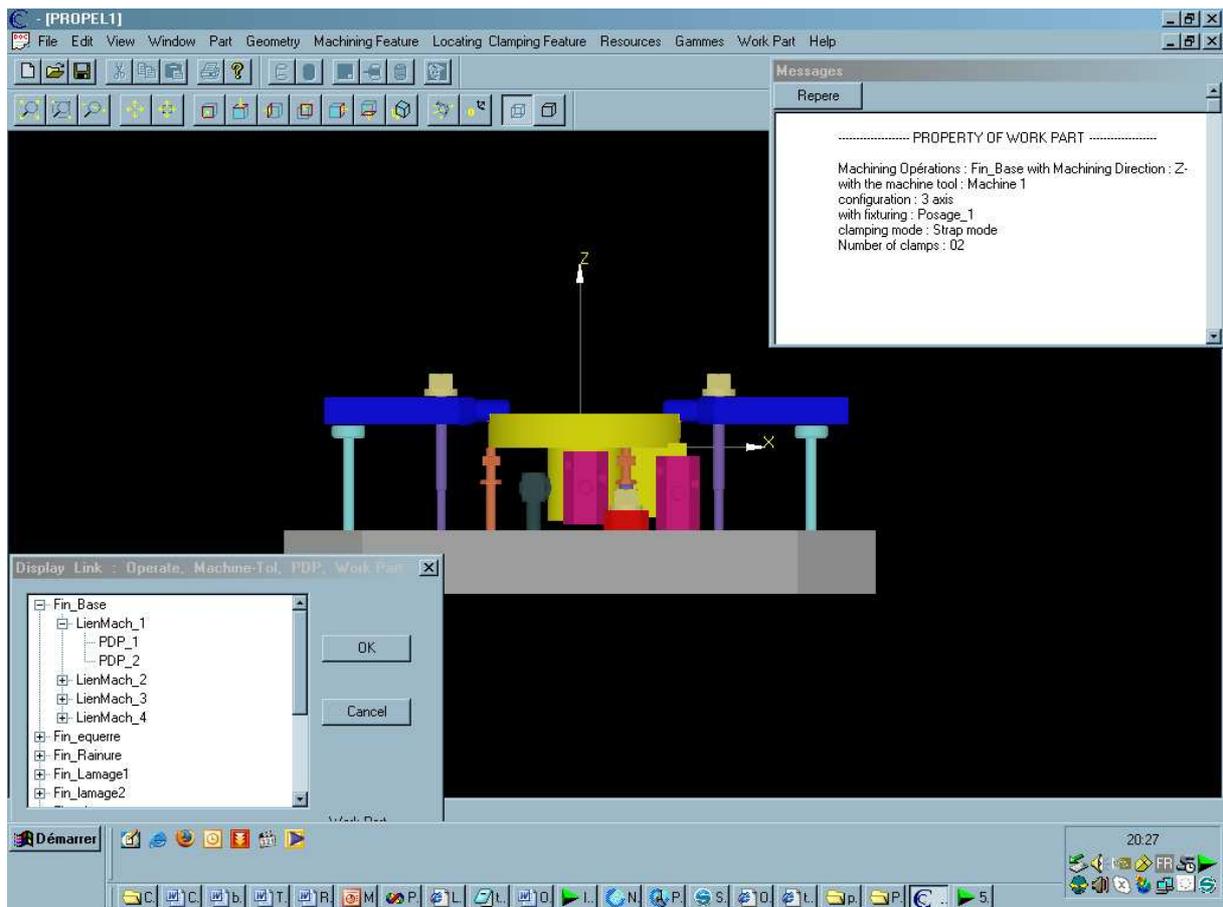


Figure 4.16 Vue de face

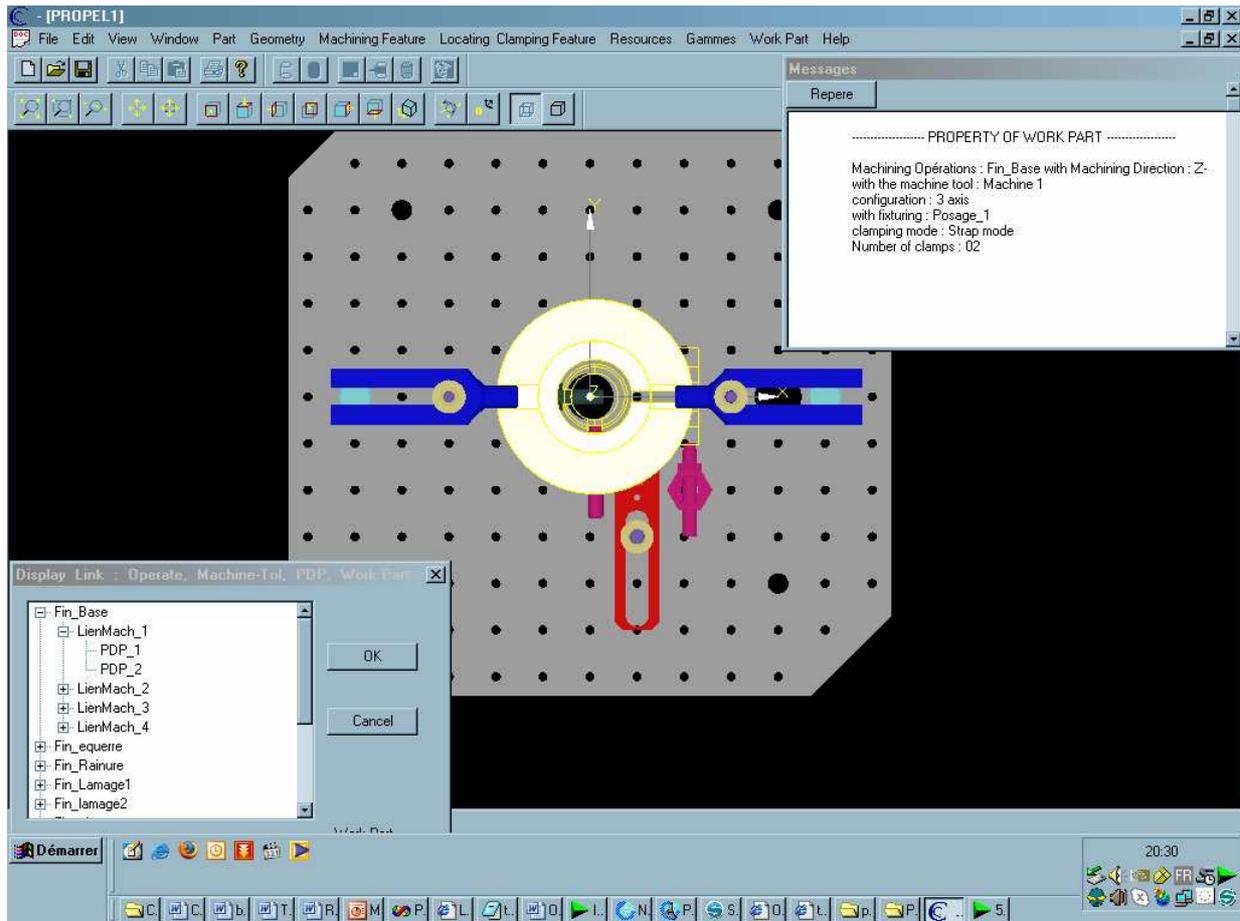


Figure 4.17 Vue de dessus

Etape 6 : Nomenclature des éléments du montage

Si on veut afficher tous les éléments qui participent au montage d'usinage on sélectionne le sous-menu *Nomenclature* et la liste des éléments technologiques s'affiche dans la fenêtre avec les coordonnées de chaque élément (figure 4.18). Un fichier texte est généré pour contenir toutes ces informations.

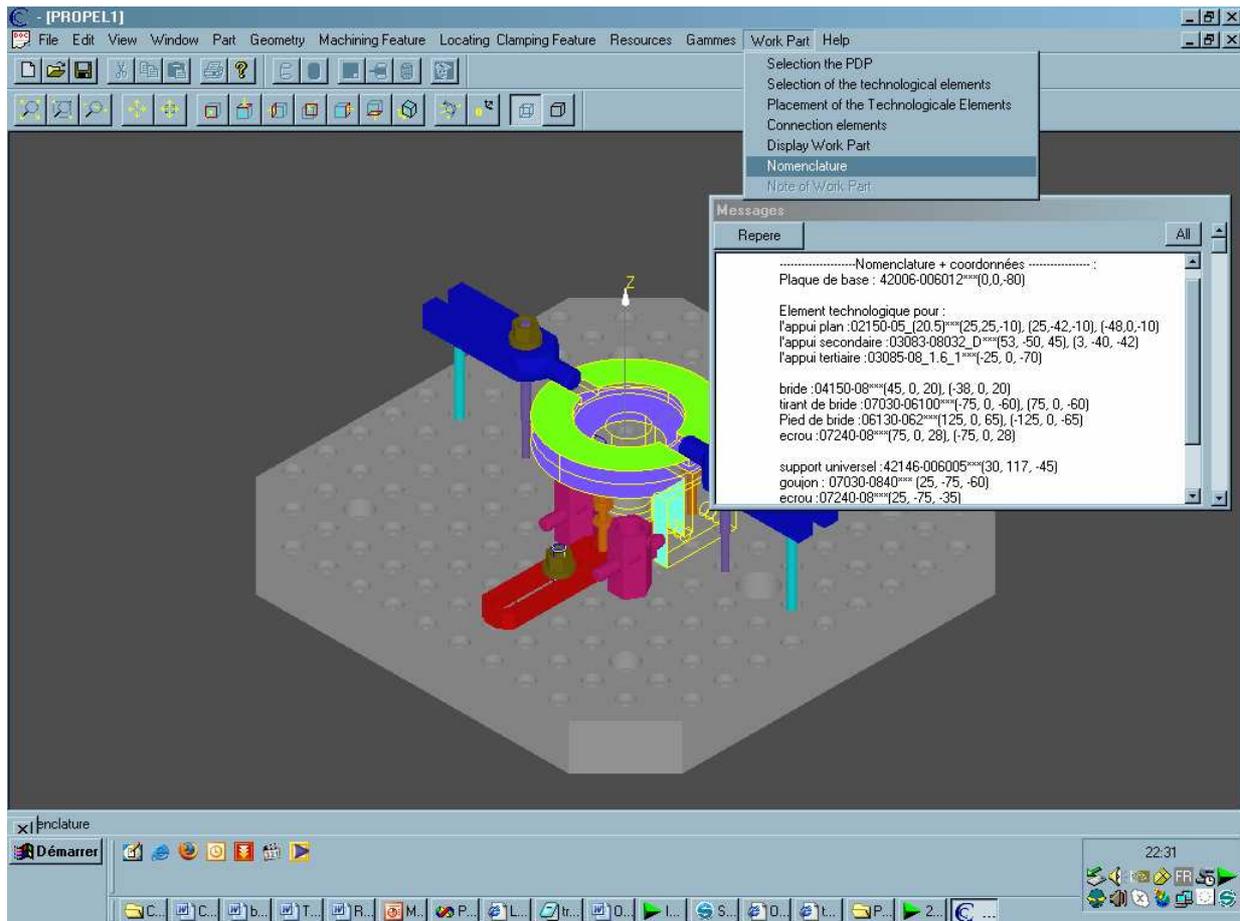


Figure 4.18 Résultat de la nomenclature des éléments du montage

6 Conclusion

L'implémentation du module ResGamme_MontageU permet dans un même environnement CFAO de générer la gamme d'usinage et de concevoir le montage d'usinage. Actuellement l'optimisation se fait sous MATLAB et les informations sont transférées manuellement. A terme, nous envisageons de coupler les deux logiciels ou d'implémenter l'algorithme d'optimisation sous Open CasCade.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

1 Conclusions

Notre travail consiste à matérialiser la prise de pièce déjà validée pendant l'étude de l'architecture de la gamme d'usinage pour lui trouver la solution technologique prêt à l'emploi.

La méthodologie proposée s'appuie essentiellement sur les informations issues de l'architecture de la gamme d'usinage et permet de concevoir le montage d'usinage indépendamment des autres tâches de la sous-phase, ce qui permet de valider l'existence d'une solution du montage d'usinage le plutôt possible, bien avant de définir finement toutes les tâches de la sous-phase.

En plus cette méthodologie est concrétisée par une démarche de conception du montage d'usinage qui a abouti à une application informatique permettant de concevoir totalement le montage d'usinage.

L'approche proposée et une approche intégrée pour la conception simultanée de la gamme d'usinage et du montage d'usinage associé. Cette approche intègre des méthodes existantes pour résoudre chaque sous problème identifié de manière indépendante. Nous proposons aussi une méthode de sélection des éléments technologiques constituant le montage d'usinage qui intègre les contraintes d'accessibilité de qualité et de comportement mécanique. De plus, une formalisation des connaissances permet d'affiner le choix des éléments technologiques répondant aux différentes contraintes. Le placement de ces éléments s'appuie sur une méthode d'optimisation sous contrainte en mettant une priorité forte sur le critère de stabilité.

L'apport essentiel dans cette étude est la formalisation proposée sur la conception du montage d'usinage. On s'intéresse à comprendre comment à partir d'un posage donné, les experts en usinage choisissent les composants technologiques et les relient entre eux et avec la plaque de base. Cette formalisation prend en compte toutes les contraintes pour un montage d'usinage à savoir les contraintes de qualité, d'accessibilité et de comportement mécanique.

2 Perspectives.

Au terme de ce travail de thèse, plusieurs prolongements se dessinent à savoir :

1- Prise en compte des déformations globales de la pièce. La qualité d'une pièce usinée dépend notamment de la maîtrise des déformations engendrées lors de l'usinage, déformations dépendant du phénomène d'usinage lui-même et des efforts de maintien en position de la pièce sur son montage d'usinage. Notre étude considère la pièce comme rigide car seule la déformation locale au droit de chaque point d'appui est calculée. Une étude approfondie de la conception de montage d'usinage pour des pièces déformables permettrait d'étendre le domaine d'application.

2- Si on considère les pièces déformables il faut l'optimisation du couplage de placement des brides et des appuis pour les pièces déformables.

3- Extension vers des pièces plus complexes (Surfaces gauches, usinage 5 axes et plus)

4- Une autre perspective concerne l'extension vers les autres types de posage et bridage. En effet, l'étude concerne uniquement les montages faisant appel au principe 3-2-1 et au bridage de mode bride. Cet extension concerne en partie les montages qui se monte sur la broche de la machine outil et donc sont aminé en rotation. Dans ce cas les aspects équilibrage et effet dynamique sont à prendre en considération.

BIBLIOGRAPHIE

- [Alt92] Y. Altintas-“Prediction of cutting forces and tool breakage in milling from feed drive current measurement”, Journal of Engineering for Industry, vol.114, pp386-392, ASME 92.
- [Aga86] P. Agati, Y. Beremont et G.Delville - “Mécanique du Solide Applications Industrielles”, Edition Dunod 1986.
- [Aub92] M. Aublin et co-auteurs - “SYSTEMES MECANIKES THEORIE ET DIMENSIONNEMENT ”, Dunod 1992.
- [Ber03] Vincent Barichard, Jin-Kao Hao - “Une approche hybride pour l’optimisation multi-objectif sous contraintes”, LERI Angers, JFPLC 2003.
- [Ber01] Maitine Bergounioux - “ Optimisation et contrôle des systèmes linéaires”, Dunod 2001.
- [Bri92] D. Brissaud - “Système de conception automatique de gammes d’usinage pour les industries manufacturières”, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1992.
- [Bou88] P. Bourdet, A. Clement -“A study of optimal-criteria identification based-on the small-displacement screw model”, Annals of the CIRP, vol. 37, pp503-506, 1988.
- [Ben07] Romdhane Ben Khalifa, Nouredine Ben Yahia, Ali Zghal- “ Conception du

- montage d'usinage des pièces prismatiques par le raisonnement à partir des cas", CPI'2007 – Rabat, Maroc
- [Bil07] Alain Billionnet - "OPTIMISATION DISCRETE De la modélisation à la résolution par des logiciels de programmation mathématique", Dunod Belgique 2007
- [Bi01] Z. M. Bi and W. J. Zhang - "Flexible fixture design and automation: Review, issues and future directions", Int. J. Prod. Res., 2001, vol. 39, n°. 13, 2867-2894
- [Bur03] Joel W. Burdick and Yongqiang Liang - "Experiments in Fixturing Mechanics", International Conference on Robotics & Automation Taipei, Taiwan, September 14-19, 2003.
- [Cai95] E.Caillaud - "Modélisation des connaissances : aide à la conception des montages d'usinage", Thèse, Université de Bordeaux I, 1995.
- [Car01] Johan S. Carlson - "Quadratic Sensitivity Analysis of Fixtures and Locating Schemes for Rigid Part", Mathematical Statistics, Chalmers University of Technology, SE-41296 Gothenburg, Sweden. vol. 123, August 2001.
- [Cor 88] A. CORNAND, F. KOLB, J. LACOMBE et I. RAK – "Usinage et commande numérique", Edition FOUCHER 1988.
- [Cha96] Irène Charon, Annege Erma et Olivier Hudry - "Méthode d'optimisation combinatoire", Edition Masson 1996.
- [Cho05] A. M. CHOUBEY, PRAKASH, F. T. S. CHAN and M. K. TIWARI- "Solving a fixture configuration design problem using genetic algorithm with learning automata approach", International Journal of Production Research, Vol.43, N°. 22, 15 November 2005, 4721-4743.
- [Che02] Yu-Che Chen and C. L. Philip Chen - "Proper Clamping Sequences in the Fixturing of Prismatic Workpieces", Journal of Design and Manufacturing Automation.1 (4): 283-299 (2002).
- [Con04] L. A. Consalter, L. Boehs - "An Approach to Fixture Systems Management in Machining Processes", J. of the Braz. Soc. Of Mech. Sci. & Eng Vol. XXVI, n°2, 2004.
- [Cec01a] J. Cecil - "A Clamping Design Approach for Automated Fixture Design", Int J Adv Manuf Technol (2001) 18:784-789.
- [Cec01b] J. Cecil - "Comuter-Aided Fixture Design- A Review and Future Trends", Int. J. Adv Manuf Techno (2001) 18:790-793.
- [Cul94] Jean-Christophe CULIOLI - "Introduction à l'optimisation", ellipses 1994.

- [DeM01] Edward C. De Meter, Wei Xie, Shabbir Choudhuri, Subramanian Vallapuzha, Martin W. Trethewey - "A model to predict minimum required clamp pre-loads in light of fixture-workpiece compliance" - *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41 (2001) 1031-1054
- [Dai97] J. Dai, A. Y. C. Nee and J. Y. H. Fuh - "An approach to automating modular fixture design and assembly", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture*, 211, pp. 509-521, 1997.
- [Den05] Haiyan Deng and Shreyes N. Melkote- "Analysis of Fixturing Dynamic Stability in Macining", *Proceeding of the 2005 IEEE/ASME. International Confecrence on Advanced Intelligent Mechatronics. Monterey, California, USA, 24-26 July, 2005.*
- [Ech99] Javier Echave, Jami J. Shah - "Atomatique Set-up and Fixture Planning for 3-Axis Milling", *Proceedings of the: Design Engineering Technical Conferences. September 12-15, 1999, Las Vegas, Nevada.*
- [Gro94] F. Gromaire - "Prédiction des efforts de coupe pour les outils tournants", *Mémoire de DEA, INPG, Grenoble septembre 94.*
- [GAM90] Groupe GAMA – "La gamme automatique en usinage", *HERMES 90.*
- [Hou01] Jiang-Liang Hou and A. J. C Trappey - "Computer-aided fixture design system for comprehensive modular fixtures", *Int. J. Prod. Res.*, 2001, vol. 39, n°. 16, 3703-3725.
- [Hu00] W. Hu abd Y. Rong - "A fast Interference Checking Algorithm for Automated Fixture Design Verification", *Int. J. Adv. Manuf. Techno* (2000) 16:571-581.
- [Hua02] Samuel H. Huanlg, Y. Kevin Rong, David W. Yen -"Integrated Set-Up Planning and Fixture Design: Issues and Solutions", *Transactions of N AMRI/SME, Volume XXX, 2002*
- [Hur02a] José F. Hurtado and Shreyes N. Melkote - "Modeling and Analysis of the Effect of Fixture-Workpiece Coformability on Static Stability", vol. 124, may 2002. by ASME.
- [Hun06] R. Hunter, J. Rios, J. M. Perez, A. Vizan - "A functional approach for the formalization of the fixture design process ", *Int J Mach Tool & Manuf* 46 (2006) 683-697.
- [Hur02b] José F. Hurtado and Shreyes N. Melkote - "A model for synthesis of the fixturing configuration in pin-array type flexible machining fixtures", *Int J of Mach Tools & Manuf* 42 (2002) 837- 849
- [Jen97] Y C Jeng and K F Gill -"A CAD-based approach to the design of fixtures for prismatic parts", *Proc Instn Mech Engrs Vol 211 Part B 1997*

- [Jon99] Ajay Joneja and Tien-Chien Chang - "Setup and fixture planning in automated process planning systems", IIE Transactions (1999) 31, 653-665.
- [Kan01] Yuezhuang Kang - "Computer-Aided Fixture Design Verification", Thèse Worcester Polytechnic Institute Décembre 2001.
- [Kan04] Balaji Kannan and Paul K. Wright - "Efficient algorithms for automated process planning of 2.5D machined parts considering fixturing constraints", Int. J. Computer Integrated Manufacturing, January-February 2004.
- [Kas99] Kashyap S , DeVries W R - "Finite Element Analysis and Optimization in Fixture Design", Structural Optimization, vol. 18 n°. 2-3 October 1999, pp. 193-201.
- [Kay03] N. Kaya and F. Ozturk - "The Application of Chip Removal and Frictional Contact Analysis for Workpiece-Fixture Layout Verification", Int J Adv Technol (2003) 21: 411-419.
- [Kay06] Necmettin Kaya - "Machining fixture locating and clamping position optimization using genetic algorithms", Computers in Industry 57 (2006) 112–120
- [Kan03b] Y. Kang, Y. Rong and J. A. Yang - "Geometric and Kinetic Model Based Computer-Aided Fixture Design Verification", J. of Computing and Information Science in Engineering 2003, Vol. 3
- [Kan03c] Y. Kang, Y. Rong and J. C. Yang - "Computer-Aided Fixture Design Verification. Part 3. Stability Analysis", Int J Adv Manuf Technol (2003) 21: 842-849.
- [Kan03a] Y. Kang, Y. Rong and J. C. Yang - "Computer-Aided Fixture Design Verification. Part 1. Framework and Modelling", Int J Adv Manuf Technol (2003) 21: 827-835.
- [Kow00] T. S. Kow, A. S. Kumar and J.Y. Fuh - "An Integrated Approach to Collision-Free Computer-Aided Modular Fixture Design", Int. J. Manuf. Technol (2000) 16:233-242.
- [Kum99] A. Santhil Kumar, V. Subramaniam and K. C. Seow - "Conceptual design of fixtures using genetic algorithms", International Journal of Manufacturing Technology, 15(2), pp. 79-84, 1999.
- [Kum00] A. Senthil kumar, J.Y.H. Fuh, T.S. Kow - "An automated design and assembly of interference-free modular fixture setup", Computer-Aided Design 32 (2000) 583–596
- [Kri00] Kulankara Krishnakumar, Shreyes N. Melkote- "Machining fixture layout optimization using the genetic algorithm", International Journal of Machine Tools & Manufacture 40 (2000) 579-598.

- [Li99a] J. Li, W. MA and Y. Rong - "Fixturing surface accessibility analysis for automated fixture design", *Int. J. Prod. Res.*, 1999, vol. 37, n°. 13, 2997-3016.
- [Li99b] Bo. Li, Shreyes N. Melkote - "Improved workpiece location accuracy through fixture layout optimization", *Int J of Mach Tools & Manuf* 39 (1999) 871- 883.
- [Lia00] Y. J. Gene Liao, S. Jack Hu - "Flexible multibody dynamics based fixture-workpiece analysis model for fixturing stability" *Int. J. of Mach Tool & Manu* 40 (2000) 343-362
- [Lia01] Y. J. Gene Liao, S. Jack Hu - "An Integrated Model of a Fixture-Workpiece System for Surface Quality Prediction", *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, (2001) 17:810-818.
- [Liu03] J. J-X. Liu et D. R. Strong - "Machining Fixture Verification for Nonlinear Fixture Systems", *Int J Adv Manuf Technol* (2003) 21: 426-437.
- [Li00] B. Li and S. N. Melkote, S. Y. Liang - "Analysis of Reactions and Minimum Clamping Force for Machining Fixtures with Large Contact Areas", *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 2000.
- [Li01a] B.Li and S. N. Melkote - "Optimal Fixture Design Accounting for the Effect of Workpice Dynamics", *Int J Adv Manuf Techno* (2001) 18:701-707.
- [Li01b] B.Li and S. N. Melkote - "Fixture clamping force optimisation and its impact on workpiece location accuracy", *Int. J. Adv. Man. Tech.* 18 (2001).
- [Mar01] Rodrigo A. Marin, Placid M. Ferreira - "Kinematic Analysis and Synthesis of Deterministic 3-2-1 Locator Schemes for Machining Fixtures", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.123, NOVEMBER 2001.
- [Mar02b] Rodrigo A. Marin, Placid M. Ferreira - "Optimal Placement of Fixture Clamps: Minimizing the Maximum Clamping Forces", *Journal of Manufacturing Science and Engineering. Manuscript* Vol. 124, AUGUST 2002.
- [Mar03] Rodrigo A. Marin, Placid M. Ferreira - "analysis of the Influence of Fixture Locator Errors on the Compliance of Work Part Features to Geometric Tolerance Specifications", *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 2003.
- [Mer97] Bernard Méry – "Machines à commande numérique", HERMES 1997.
- [Ma98] W. Ma, Z. Lei and Y.Rong - "FIX-DES: A Computer-Aided Modular Fixture Configuration Design System", *Int J Adv Manuf Techol* (1998) 14:21-32.
- [Ma99] W. Ma, J. Li and Y. Rong - "Development of automated fixture planning systems", *International Journal of Advenced Manufacturing Technology*, 15(3), pp. 171-181, 1999.

- [Nee00] A. Y. C. Nee, A. Senthil Kumar, Z. J. Tao - "An intelligent fixture with a dynamic clamping scheme", Proc. Inst. Mech. Engrs. 214 (2000) 183-196.
- [Nor00] Catalogue Norelem version 2000.
- [Par95] H, Paris - "Contribution à la conception automatique des gammes d'usinage: le problème du posage et du bridage des pièces", Thèse INP Grenoble 1995.
- [Pay00] Joseph Payne and Vikram Cariapa - "A fixture repeatability and reproducibility measure to predict the quality of machined parts", INT. J. PROD. RES., 2000, Vol. 38, NO. 18, 4763- 4781.
- [Pel02] Diana M. Pelinescu, Michael Yu Wang - "Multi-objective optimal fixture layout design", Robotics and Computer Integrated Manufacturing 0736-5845, 2002
- [Pen97] Kamen Penev and Aristides A. G. Requicha - "Automatic Fixture Synthesis in 3D", International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico – April 1997.
- [Pho08] T. Phoomboplab, D. Ceglarek and J. Uicker Jr - "Geometric Constraint and Variation Propagation Model in Multi-stage Assembly Systems with Part-to-part Joints and General 3D Fixture Layouts", CIRP Design Conference 2008.
- [Pra07] G. Prabhakaran, K. P. Padmanaban and R. Krishnakumar - "Machining fixture layout optimization using FEM and evolutionary techniques", Int J Manuf Technol (2007) 32:1090-1103.
- [Qin07] Guohua Qin, Weihong Zhang, Zhuxi Wu, Min Wan - "Systematic Modeling of Workpiece-Fixture Geometric Default and Compliance for the Prediction of Workpiece Machining Error", Journal of Manufacturing Science and Engineering August 2007, Vol. 129
- [Rag04] Anand Raghu, Shreyes N. Melkote - "Analysis of the effects of fixture clamping sequence on part locating errors", Int J of Machin Tools & Manuf 44 (2004) 373-382.
- [Roy99] Utpal Roy and Jianmin Liao - "Geometric reasoning for re-allocation of supporting and clamping positions in the automated fixture design system", IIE Transactions (1999) 31, 313-322.
- [Roy02b] Utpal Roy, Jianmin Liao - "Fixturing Analysis For Stability Consideration in an Automated Fixture Design System", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 124, February 2002.
- [Ron01] Y. Rong, W. Hu, Y. Kang, Y. Zhang and David W.Yen - "Locating error analysis and tolerance assignment for computer-aided fixture design", Int. J. Prod. Res., 2001, vol.39, n°. 15, 3529-3545.

- [Rou04] Olga Roudenko - “Application des Algorithmes Evolutionnaires aux Problèmes d’Optimisation Multi-Objectif avec Contraintes”, Thèse Ecole Polytechnique 2004
- [Sat04] S. Satyanarayana, S. N. Melkote - “Finit element modeling of fixture-workpiece contacts : single contact modeling and experimental verification”, Int J of Mach Tools & Manuf 44 (2004) 903-913.
- [San01] Supapan Sangnui and Frank Peters - “The Impact of Surface Errors on the Location and Orientation of a Cylindrical Workpiece in a Fixture”, J. Manu. Sci. Eng, may 2001, vol.123.
- [Seg01a] Liviu Segal, Camellia Romanescu and Nicolae Gojinetchi - “Metodologies for Automated Design of Modular Fixtures”, Uniersitatea Technica “Gh.Asachi”, Iasi, 2001.
- [Sie06] Shane P. Siebenaler, Shreyes N. Melkote - “Prediction of workpiece deformation in a fixture system using the finite element method”, Int J Mach Tool & Manuf 46 (2006) 51-58.
- [Seg01b] Liviu Segal, Camellia Romanescu and Nicolae Gojinetchi - “Application of modular fixturing for FMS”, Uniersitatea Technica “Gh.Asachi”, Iasi, 2001.
- [Tan93] Tanguy J.C. 1993 – “Le perçage au foret hélicoïdal”, CETIM, 3ème édition.
- [Tao99a] Z. J. Tao, A. Senthil Kumar and A. Y. C. Nee - “Automatic generation of dynamic clamping forces for machining fixtures”, Int. J. Prod. Res., 1999, vol. 37, n°. 12, 1755-2776.
- [Tao99b] Z. J. Tao, A. Senthil Kumar and A. Y. C. Nee - “A Computational geometry approach to optimum clamping synthesis of machining fixtures”, Int. J. Prod. Res., 1999, vol. 37, n°. 15, 3495-3517.
- [Tan04] Ernest Y. T. Tan, A. Senthil Kumar, J. Y. H. Fuh, and A. Y. C. Nee - “Modeling, Analysis, and Verification of Optimal Fixturing Design”, IEEETransaction on Automation Science and Engineering, Vol. 1, n°. 2, October 2004.
- [Var05] Elise Vareilles - “Conception et approches par propagation de contraintes: contribution à la mise en œuvre d’un outil d’aide interactif”, Thèse INP Toulouse 2005.
- [Val02a] Subramanian Vallapuzha, Edward C. De Meter , Shabbir Choudhuri , Raghunath P. Khetan - “An investigation of the effectiveness of fixture layout optimization Methods”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 251–263
- [Val02b] Subramanian Vallapuzha, Edward C. De Meter , Shabbir Choudhuri , Raghunath P. Khetan - “An investigation into the use of spatial coordinates for the genetic algorithm based solution of the fixture layout optimization

- problem”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) 265–275
- [Wah01] Benjamin W. Wah, Yixin Chen -“Hybrid Constrained Simulated Annealing and Genetic Algorithms for Nonlinear Constrained Optimization”, *Departement of Electrical and Computer Engineering and the Coordinated Science Laboratory University of Illinois, Urbana-Campaign Urbana, IL 61801, USA;*
- [Wan02a] Michael Yu Wang -“Prediction of Workpiece-Fixture Contact Forces using the Rigid Body Model”, *Dep of Aut and Com Aided Eng. The Chines University of Hong Kong.* 2002.
- [Wan02b] Michael Yu Wang -“Tolerance analysis for fixture layout design”, *Assembly Automation* Volume 22 Number 2 2002 pp. 153–162
- [Wan03] Michael Yu Wang, Diana M. Pelinescu - “Contact Force Prediction and Force Closure Analysis of a Fixtured Rigid Workpiece With Friction”, *J. Man. Sci. Eng* 2003
- [Wan05] Y. Wang, X. Chen, Q. Liu et N. Gindy - “Optimisation of machining fixture under multi-constraints”, *In J of Machine Tools & Manufacture*, 2005.
- [Wan08] Y. Wang, X. Chen, N. Gindy and J.Xie - “Elastic deformation of a fixture and turbine blades system based on finite element anlysis”, *Int J Manuf Technol* (2008) 36:296-304.
- [Wu96] N. H. Wu, K. C. Chart - “A Genetic Algorithm Based Approach to Optimal Fixture Configuration”, *Computtrs ind. Engng*, VoL 31, No. 3/4, pp. 919 - 924, 1996
- [Wu98a] Y. Wu, Y. Rong and W. Ma, S. R. LeClair - “Automated modular fixture planning: Accuracy, clamping, and accessibility analysis”, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 14, pp. 17-26, 1998.
- [Wu98b] Y. Wu, Y. Rong and W. Ma, S. R. LeClair - “Automated modular fixture planning: Geometry analysis”, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 14, pp. 1-15, 1998.
- [Xie00a] Wei Xie, Shabbir Choudhuri, Subramanian Vallapuzha, Edward C. De Meter and Martin W. Trethewey -“Experimental assessment of a clamp actuation intensity analysis model”, *Int.J.Prod.Res.* 2000, vol. 38, n°. 18, 4611-4633.
- [Xie00b] Wei Xie, E.C. De Meter, M.W. Trethewey -“An experimental evaluation of coefficients of static friction of common workpiece–fixture element pairs”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40 (2000) 467–488
- [Xio02] Cai-Hua Xionga, You-Fu Lib, Y.Kevin Rongc, You-Lun Xionga - “Qualitative analysis and quantitative evaluation of fixturing ”, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 0736-5845, 2002

- [Yeh99] J. H. Yeh, F. W. Liou - “Contact condition modelling for machining fixture setup processes”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39 (1999) 787- 803.
- [Zha05] Zhang Yuru, Peng Gaoliang - “ Development of an integrated system for setup planning and fixture design in CAPP”, *Int Conf on Adv Intelligent Mechatronics*, Monterey, California, USA, 24-28 July, 2005
- [Zha01] Y. Zhang, W. Hu, Y. Rong and David W. Yen - “Graph-based set-up planning and tolerance decomposition for computer-aided fixture design”, *INT.J.PROD.RES.*, 2001, vol. 39, n°. 14, 3109-3126.
- [Zhe08] Y. Zheng, Y. Rong and Z. Hou -“The study of fixture stiffness part I: a finit element analysis for stiffness of fixture units”, *Int J Adv Manuf Technol* (2008) 36:865-876.
- [Zir06] Omar Zirmi - “Analyse de fabricabilité en conception de gammes d’usinage pour l’aéronautique”. Thèse INP Grenoble 2006.
- [Zir07] Said Zirmi, Henri Paris et Idir Belaidi -“ Analyse de la conception d’un montage d’usinage à l’aide d’éléments modulaires”, *Mécanique & industries* 8, 1-6 (2007).
- [Zir09] Said Zirmi, Henri Paris et Idir Belaidi -“ Conception de montage d’usinage : placement des éléments technologiques en contact avec la pièce”, 19ème Congrès Français de Mécanique, Marseille, 24-28 août 2009.

ANNEXE:

EXEMPLES D'OPTIMISATION DU
PLACEMENT DES ELEMENTS
TECHNOLOGIQUES DE L'APPUI
PREPONDERANT

Vu que MatLab possède de très puissants outils d'optimisation et qui sont faciles à programmer, on a utilisé ces outils pour résoudre notre problème d'optimisation de placement des points d'appui de l'appui prépondérant. L'outil utilisé est **Constrained Nonlinear Optimization**.

1 *Les données d'entrées*

Les données d'entrées pour effectuer l'optimisation sont (figure 1):

- la géométrie de l'appui prépondérant,
- l'étendue de l'appui,
- les conditions initiales (triangle initial),
- les contraintes qui sont les coordonnées des points qui doivent être à l'intérieur du triangle,
- la valeur experte λ .

2 *Exemples de simulation et résultats obtenus*

Des exemples de simulation vont être donnés avec des contours composés de segments de droite et d'arcs de cercle, ce qui représente le cas des contours traités par notre système (figure 1). Différents paramètres ont été essayés pour évaluer leurs influences. Dans les exemples, le triangle initial est représenté en couleur verte, le triangle de sustentation en couleur rouge, le contour de l'appui ainsi que le contour des lieux potentiels en couleur bleu. Le centre de gravité ainsi que les contraintes sont représentés par des points étoile en couleur bleu.

Les données du contour :

Le rayon du demi cercle $R = 60$ mm;

La longueur = 150 mm;

La largeur = 100 mm;

La distance de décalage = 5 mm

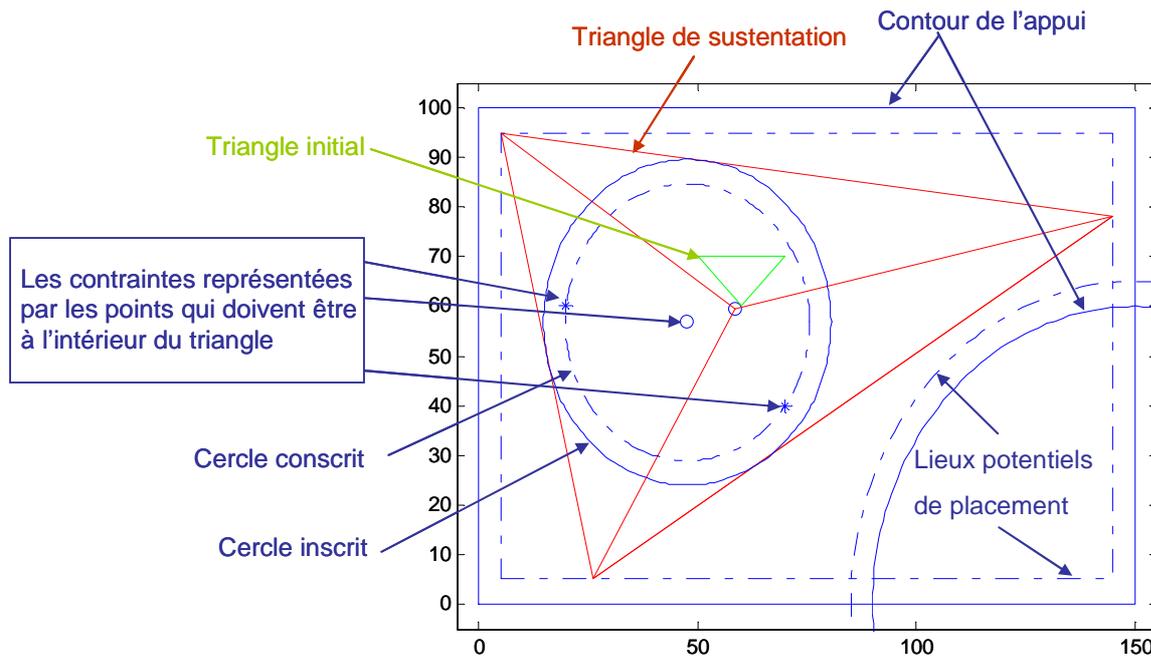


Figure 1 : Présentation des résultats de simulation

Simulation avec optimisation mono objectif : les points contraints à l'intérieur du triangle de sustentation

2.1.1 Influence du triangle initial

On fixe les trois points contraints et on fait varier les coordonnées du triangle initial.

Les contraintes fixées sont : $(60, 60)$, $(100, 70)$, $(20, 30)$

- Exemple 1 :

Les coordonnées du triangle initial : $(20, 80)$, $(125, 80)$, $(60, 30)$

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 2) sont : $(5.00, 16.92)$, $(94.56, 95.00)$, $(145.00, 64.80)$

La surface maximale du triangle de sustentation = $3.3209e+003$

Le nombre d'itérations = 26

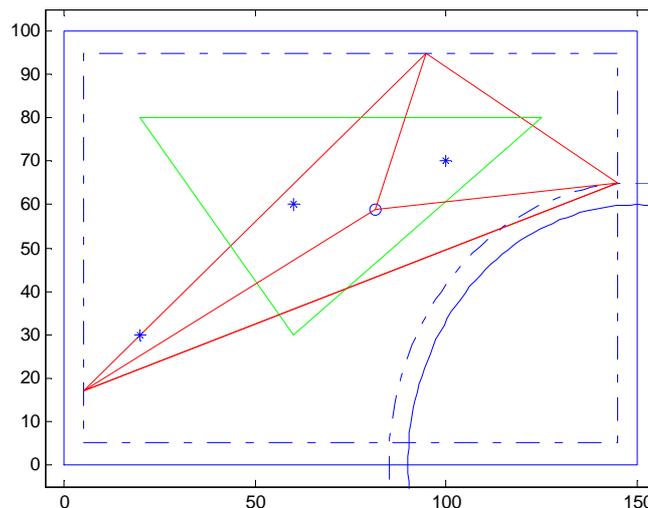


Figure 2 : Les points sont à l'intérieur du triangle mais la surface n'est pas maximale

- Exemple 2 :

Les coordonnées du triangle initial : (40, 60), (70, 60), (50, 50)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenu (figure 3) sont : (5.0001, 38.4349), (135.1430, 94.9997), (5.0000, 94.9852)

La surface maximale du triangle de sustentation = 3.6808e+003

Le nombre d'itérations= 278

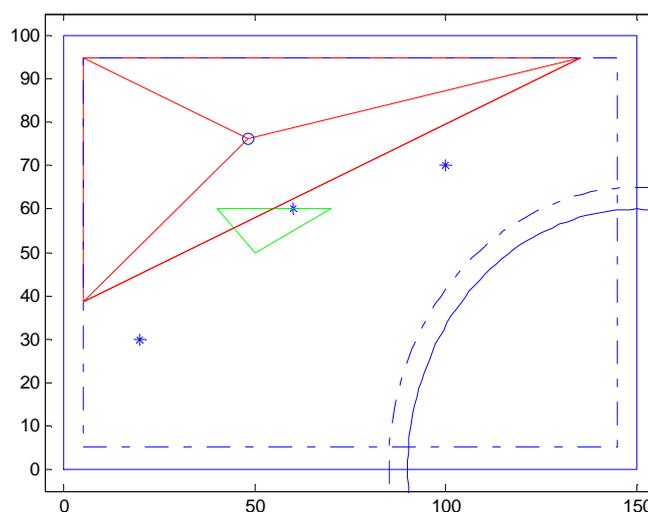


Figure 3 : Les points ne sont pas à l'intérieur du triangle (influence du triangle initiale)

- Exemple 3 :

Les coordonnées du triangle initial : (5, 5), (20, 10), (5, 20)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenu (figure 4) sont : (71.2599, 4.9519), (86.0486, 12.3028), (45.0815, 11.2730)

La surface maximale du triangle de sustentation = 142.9568

Le nombre d'itérations = 288

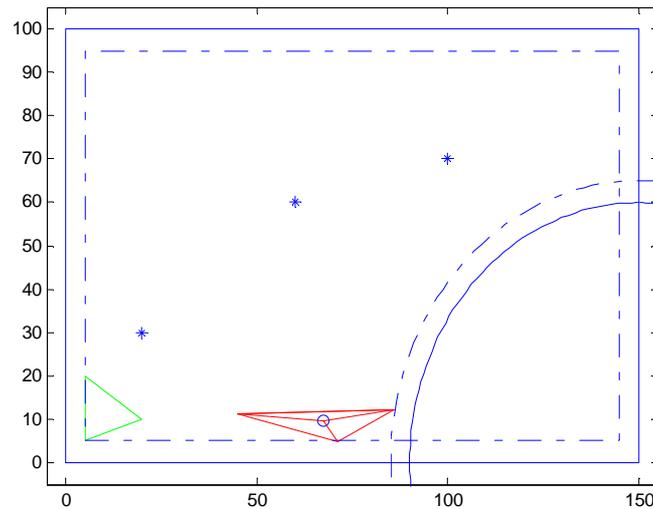


Figure 4 : Pas de convergence à cause du triangle initiale

- Exemple 4 :

Les coordonnées du triangle initial : (130, 65), (30, 65), (70, 60)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenu (figure 5) sont : (9.80, 95.00), (85.19, 5.00), (145.00, 95.00)

La surface maximale du triangle de sustentation = 6.0837e+003

Le nombre d'itérations = 32

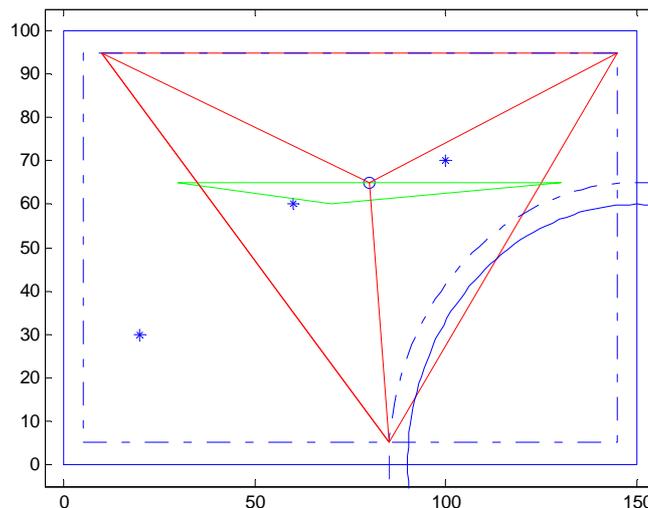


Figure 5 : L'un des points n'est pas à l'intérieur du triangle (solution qui ne peut être retenue)

2.1.2 Influence des contraintes

Les coordonnées du triangle initial sont fixées à : (40, 60), (70, 65), (50, 50)

Exemple 1 :

Les contraintes sont : (60, 60), (100, 90), (70, 30)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 6) sont : (33.4375, 95.0000), (84.0625, 5.0000), (145.0000, 95.0000)

La surface maximale du triangle = 5.0203e+003, Le nombre d'itérations = 119

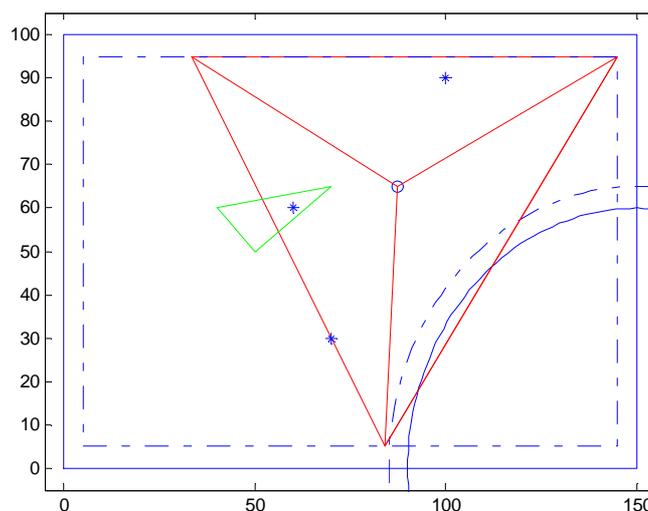


Figure 6 : Les points sont à l'intérieur du triangle

- Exemple 2 :

Les contraintes sont : (60, 60), (60, 30), (140, 80)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 7) sont : (5.0000, 44.1661), (145.0000, 85.8339), (85.1926, 5.0000)

La surface maximale du triangle de sustentation = 4.4124e+003

Le nombre d'itérations = 94

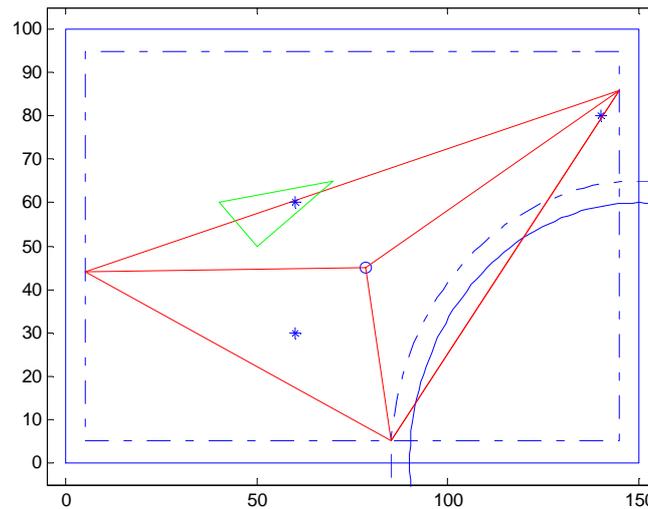


Figure 7 : Les points sont toujours à l'intérieur du triangle

Simulation avec optimisation multi-objectifs : les points contraintes à l'intérieur du triangle de sustentation

L'optimisation multi-objectifs consiste à minimiser la distance entre le centre du triangle de sustentation et les contraintes.

2.1.3 Influence du triangle initial

Les contraintes sont fixées à : (60, 60), (100, 70), (20, 30)

- Exemple 1 :

Les coordonnées du triangle initial : (20, 80), (125, 80), (60, 30)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 8) sont : (9.8074, 95.0000), (145.0000, 95.0000), (85.1926, 5.0000).

La surface maximale du triangle de sustentation = 6.0837e+003

Le nombre d'itérations = 156

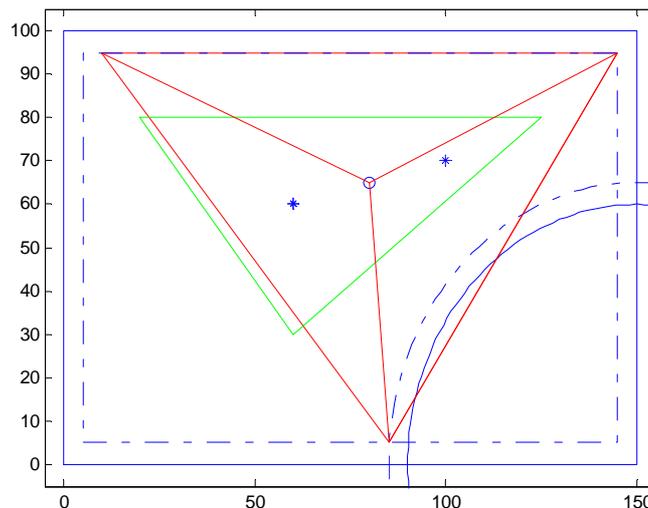


Figure 8 : Bon positionnement des points contraints par rapport au centre du triangle

- Exemple 2 :

Les coordonnées du triangle initial : (40, 60), (70, 60), (50, 50)

Les coordonnées des sommets du triangle (figure 9) obtenus sont : (5.0000, 45.3924), (111.8667, 95.0000), (122.1074, 58.7112).

La surface maximale du triangle de sustentation = 2.1930e+003

Le nombre d'itérations = 57

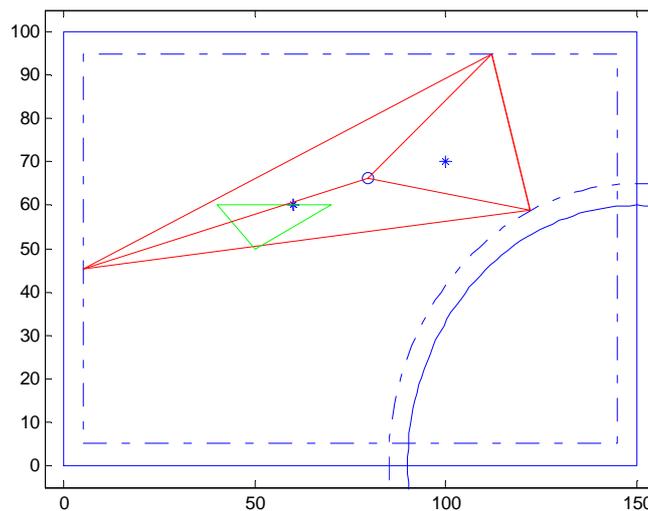


Figure 9 : Un bon positionnement mais la surface du triangle est minimale

- Exemple 3 :

Les coordonnées du triangle initial : (40, 80), (80, 70), (60, 40)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 10) sont : (126.1255, 95.0000), (99.8013, 41.2927), (5.0000, 95.0000),

La surface maximale du triangle de sustentation = 3.2527e+003

Le nombre d'itérations = 42

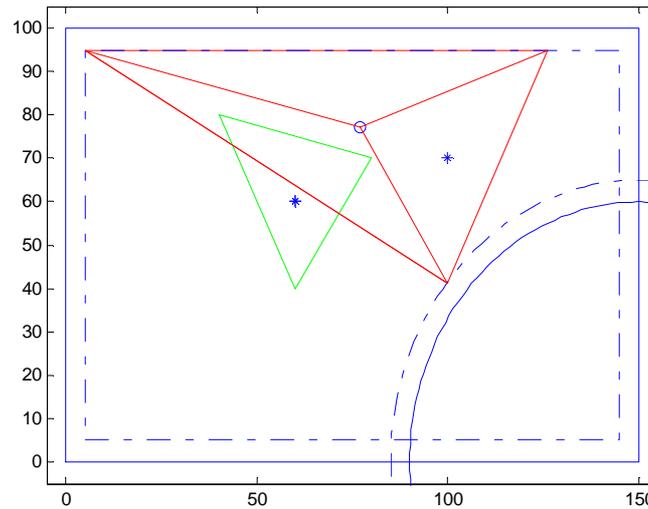


Figure 10 : L'un des points est en dehors du triangle avec la surface du triangle minimale

- Exemple 4 :

Les coordonnées du triangle initial : (20, 80), (130, 80), (70, 20)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 11) sont : (9.8074, 95.0000), (145.0000, 95.0000), (85.1926, 5.0000),

La surface maximale du triangle de sustentation = 6.0837e+003,

Le nombre d'itérations = 16

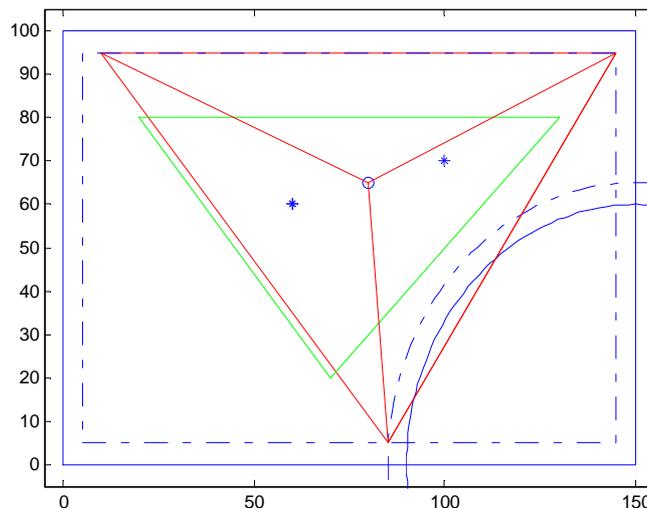


Figure 11 : Un bon positionnement des points contraints

2.1.4 Influence des contraintes

Les coordonnées du triangle initial sont fixées à : (40, 60), (70, 65), (50, 50)

- Exemple 1 :

Les contraintes sont : (60, 60), (100, 90), (20, 30)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 12) sont : (128.4980, 95.0000), (100.8502, 42.5358), (5.0000, 95.0000)

La surface maximale du triangle de sustentation = 3.2396e+003

Le nombre d'itérations = 38

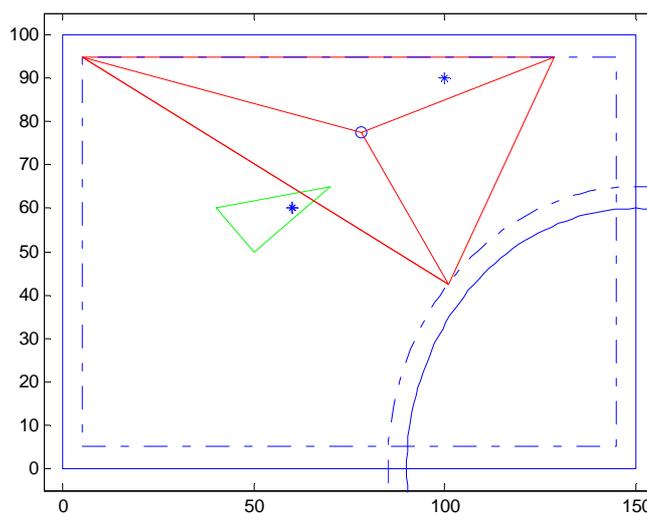


Figure 12 : L'un des points est en dehors du triangle avec la surface du triangle minimale

- Exemple 2 :

Les contraintes sont : (60, 60), (10, 80), (100, 80)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 13) sont : (29.2311, 47.9377), (26.1883, 65.3216), (77.1780, 63.3930)

La surface maximale du triangle de sustentation = $1.3160e-007$

Le nombre d'itérations = 285

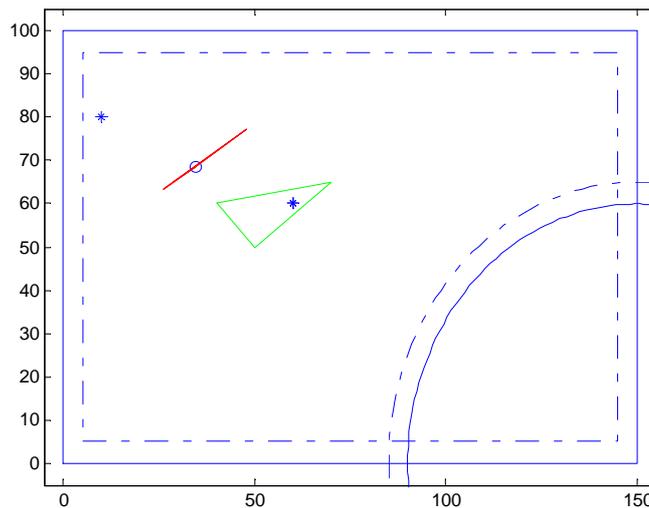


Figure 13 Divergence à cause du respect de la contrainte

- Exemple 3 :

Les contraintes sont : (60, 60), (10, 50), (100, 80)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 14) sont : (5.0000, 5.0000), (99.7532, 41.2342), (5.0000, 95.0000)

La surface maximale du triangle de sustentation = $4.2639e+003$

Le nombre d'itérations = 31

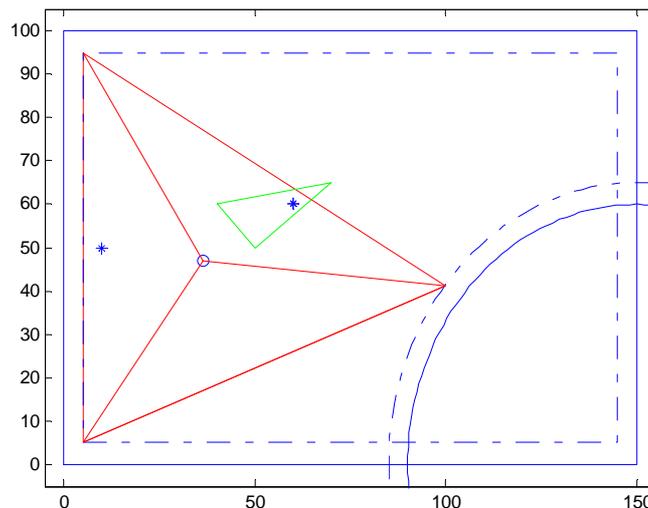


Figure 14 : Bonne position des points contraints par rapport au centre du triangle mais la surface est minimale

- Exemple 4 :

Les contraintes sont : $(60, 60)$, $(10, 30)$, $(100, 80)$

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 15) sont : $(5.0000, 5.0000)$, $(5.0000, 95.0000)$, $(92.3529, 39.4118)$

La surface maximale du triangle de sustentation = $3.9309e+003$

Le nombre d'itérations = 26

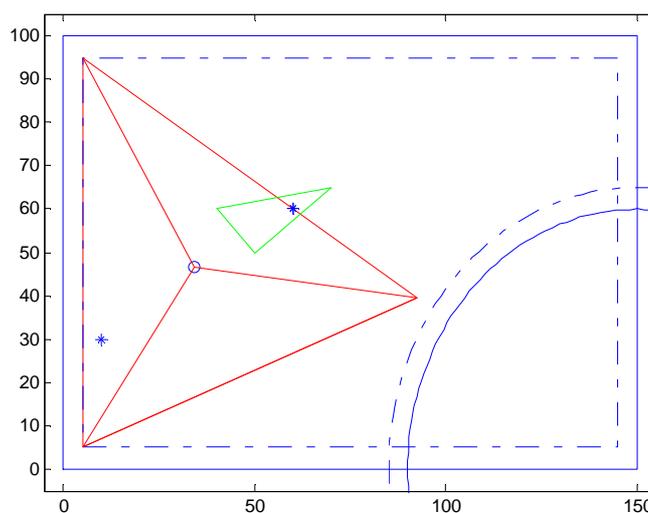


Figure 15 : L'un des sommets du triangle n'est pas sur les lieux potentiels de placement

- Exemple 5 :

Les contraintes sont : (60, 60), (10, 20), (100, 80)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 16) sont : (5.0000, 5.0000), (5.0000, 85.6658), (76.7029, 52.2056)

La surface maximale du triangle de sustentation = 2.8920e+003

Le nombre d'itérations = 37

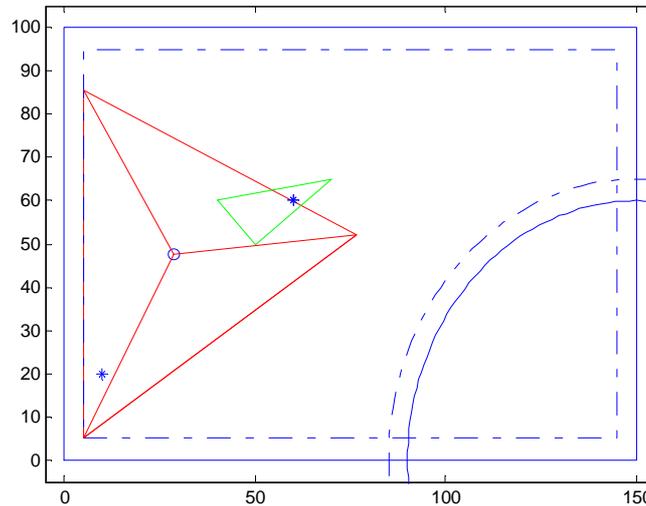


Figure 16 : Solution qui ne peut être retenue (pas de convergence)

- Exemple 6 :

Les contraintes sont : (60, 40), (60, 30), (140, 80)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 17) sont : (5.0000, 33.2403), (85.1926, 5.0000), (145.0000, 66.7597)

La surface maximale du triangle de sustentation = 3.3208e+003

Le nombre d'itérations = 70

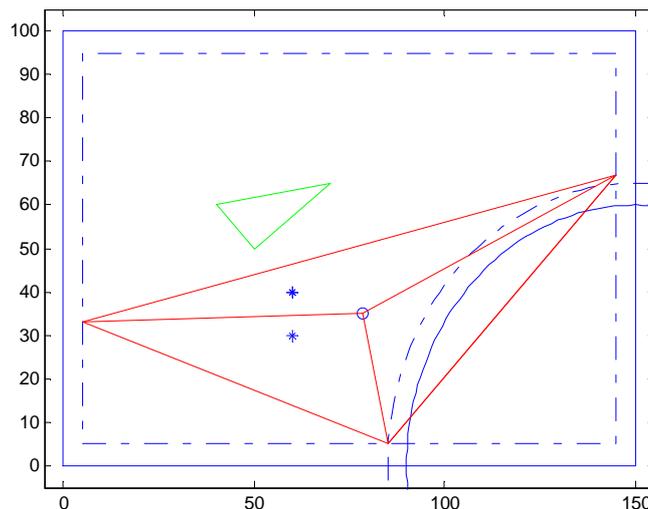


Figure 17 Surface minimale du triangle de sustentation

Simulation avec l'optimisation mono objectif : les points contraints à l'intérieur du cercle inscrit dans le triangle de sustentation

2.1.5 Influence du triangle initial

Les contraintes sont fixées à : (60, 60), (100, 70), (20, 30)

- Exemple 1 :

Les coordonnées du triangle initial : (20, 80), (125, 80), (60, 30)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 18) sont : (165.8784, 90.0955), (-7.9170, 104.0183), (38.6950, -24.0885)

La surface maximale du triangle de sustentation = 1.0808e+004

Le nombre d'itérations = 372

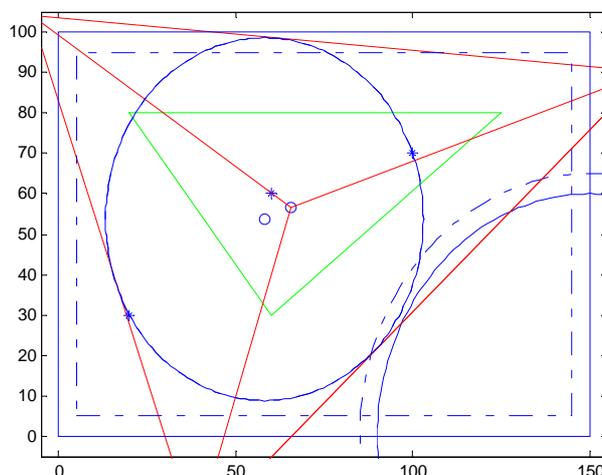


Figure 18 : Eloignement des points contraints du centre du cercle

- Exemple 2 :

Les coordonnées du triangle initial : (40, 60), (70, 60), (50, 50)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenu (figure 19) sont : (160.9924, 80.4246), (33.7223, -25.4949), (-3.8919, 109.9866)

La surface maximale du triangle de sustentation = 1.0613e+004

Le nombre d'itérations = 371

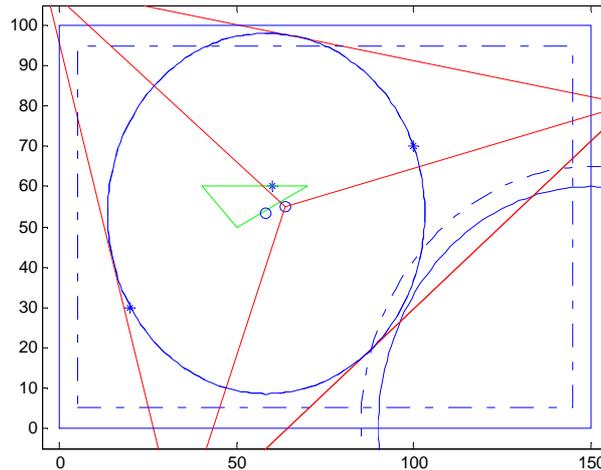


Figure 19 : Divergence à cause des positions des points contraints

2.1.6 Influence des contraintes

Les coordonnées du triangle initial sont fixées à : (40, 60), (70, 65), (50, 50)

- Exemple 1 :

Les contraintes sont : (60, 60), (100, 90), (20, 30)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenu (figure 20) sont :

(165.1098, 99.0637), (-31.4541, 119.3120), (40.8122, -15.8919)

La surface maximale du triangle de sustentation = 1.3070e+004

Le nombre d'itérations = 426

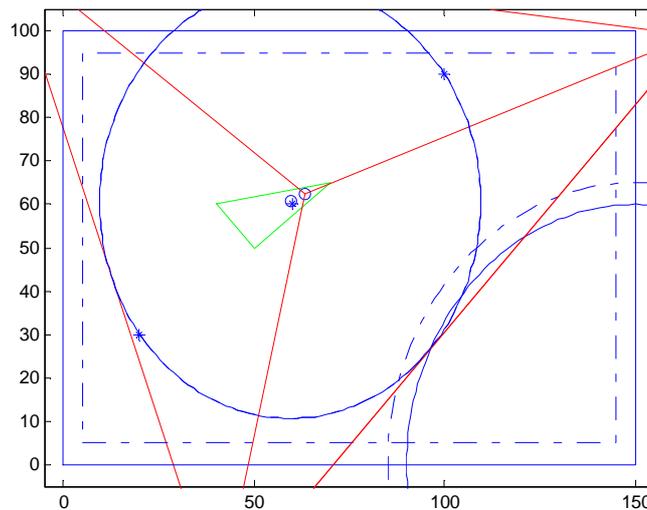


Figure 20 : Divergence à cause des positions des points contraints

- Exemple 2 :

Les contraintes sont : $(60, 60)$, $(10, 80)$, $(100, 80)$

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 21) sont : $(38.3799, -10.3709)$, $(151.6980, 124.2642)$, $(-11.4849, 113.4250)$

La surface maximale du triangle de sustentation = $1.0715e+004$

Le nombre d'itérations = 428

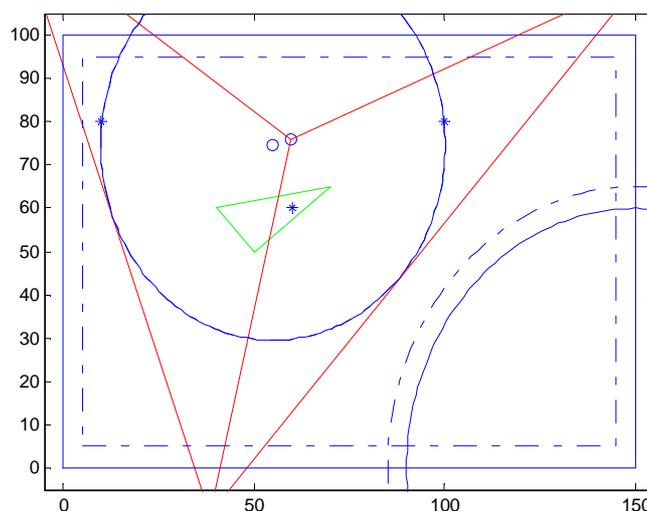


Figure 21 : Impossibilité d'avoir les points contraints à l'intérieur du cercle

- Exemple 3 :

Les contraintes sont : (60, 60), (60, 20), (140, 80)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 22) sont : (88.8273, 185.7001), (-2.8888, 122.8883), (97.5216, -34.7831))

La surface maximale du triangle de sustentation = 1.3704e+004

Le nombre d'itérations = 375

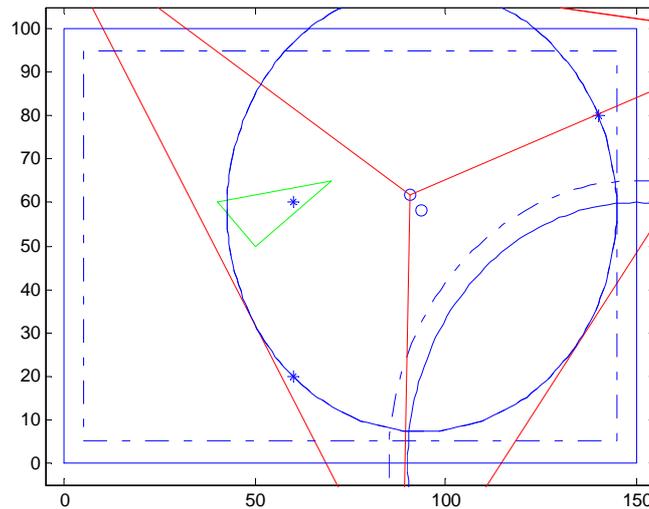


Figure 22 : Divergence à cause des positions des points contraints

- Exemple 4 :

Les contraintes sont : (60, 60), (60, 30), (40, 80)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 23) sont : (5.0000, 95.0000), (145.0000, 64.8074), (35.7446, 5.0000)

La surface maximale du triangle de sustentation = 5.8359e+003

Le nombre d'itérations = 29

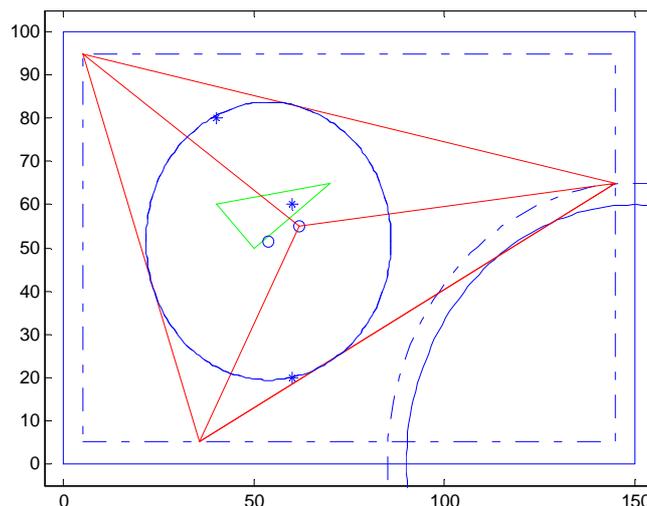


Figure 23 : Bon positionnements des points et des sommets du triangle

- Exemple 5 :

Les contraintes sont : (60, 60), (60, 30), (60, 80)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 24) sont : (5.0000, 95.0000), (145.0000, 95.0000), (74.7447, 5.0000)

La surface maximale du triangle de sustentation = 6.3000e+003

Le nombre d'itérations = 23

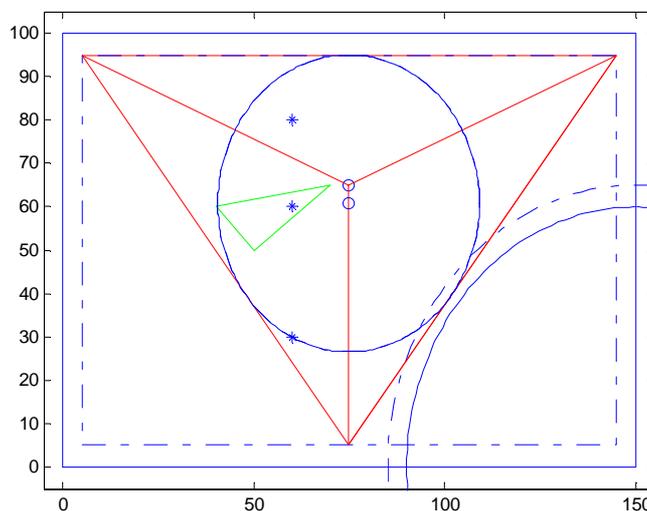


Figure 24 : Bon positionnements des points et des sommets du triangle

- Exemple 6 :

Les contraintes sont : (70, 60), (80, 50), (120, 80)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 25) sont : (85.1567, 4.5068), (60.1714, 95.7986), (145.7583, 95.1694)

La surface maximale du triangle de sustentation = 3.8988e+003

Le nombre d'itérations = 423

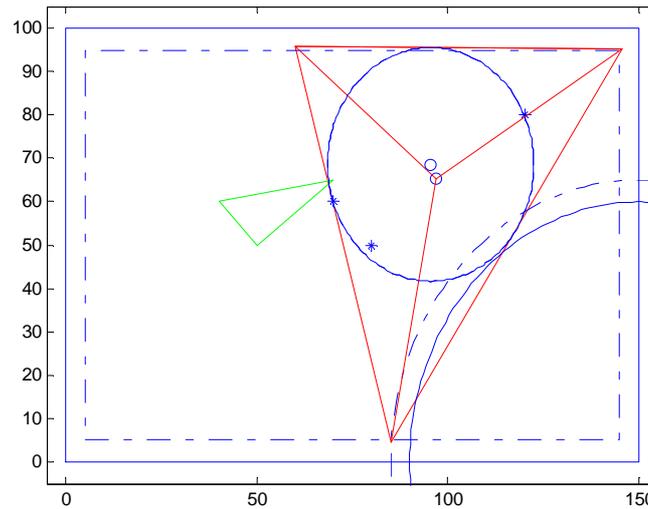


Figure 25 : Points rapproches

Simulation avec l'optimisation mono objectif : les points contraints à l'intérieur du cercle constrict dans le cercle inscrit dans le triangle de sustentation

2.1.7 Influence du coefficient expert λ

- Exemple 1 :

$\lambda = 1$

Les coordonnées du triangle initial sont fixées à : (50, 70), (70, 70), (60, 60)

Les contraintes sont fixées à : (70, 40), (20, 60), (45, 55)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 26) sont : (5.0000, 95.0000), (145.0000, 64.8074), (10.9491, 5.0000)

La surface maximale du triangle de sustentation = 6.2102e+003

Le nombre d'itérations = 27

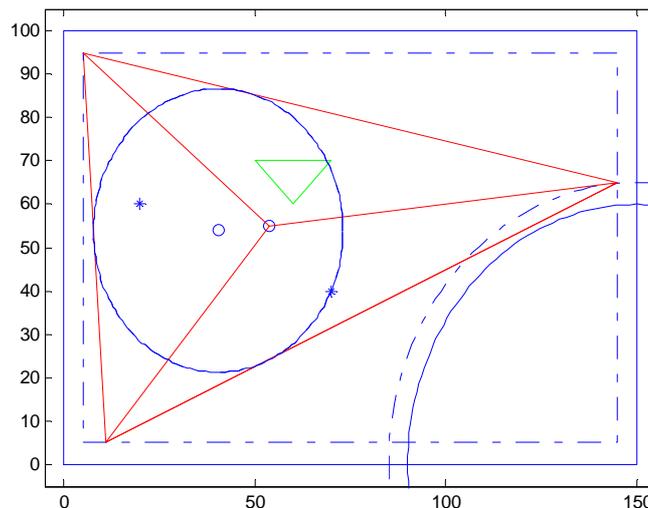


Figure 26 : Les points sont à l'intérieur du cercle inscrit

- Exemple 2 :
 $\lambda = 0,95$

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 27) sont : (5.0000, 95.0000), (145.0000, 95.0000), (28.0350, 5.0000)

La surface maximale du triangle de sustentation = 6.3000e+003

Le nombre d'itérations = 19

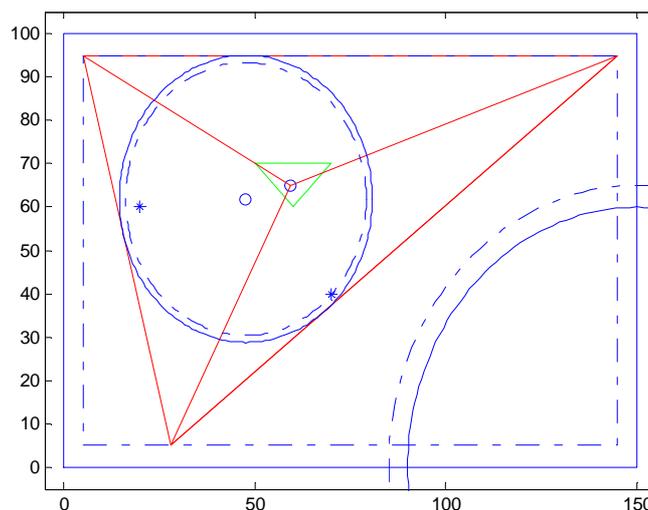


Figure 27 : Les points sont à l'intérieur du cercle inscrit

- Exemple 3 :

$$\lambda = 0,85$$

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 28) sont : (5.0000, 95.0000), (26.1792, 5.0000), (145.0000, 78.0925)

La surface maximale du triangle de sustentation = 6.1210e+003

Le nombre d'itérations = 20

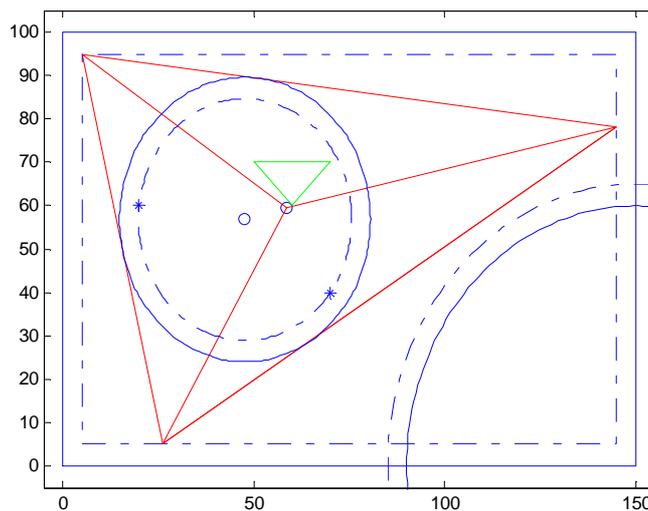


Figure 28 : Cas limite

- Exemple 4 :

$$\lambda = 0,75$$

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 29) sont : (1.6179, 99.1871), (147.0446, 64.9329), (19.2316, -1.8856)

La surface maximale du triangle de sustentation = 7.0477e+003

Le nombre d'itérations = 428

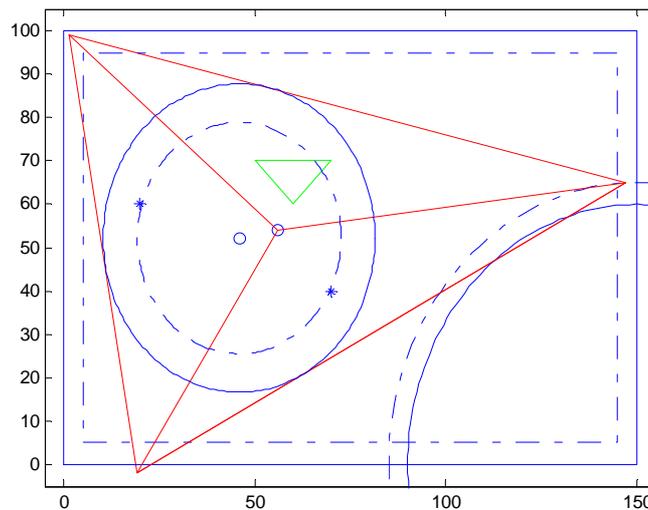


Figure 29 : Début de divergence

- Exemple 5 :
 $\lambda = 0,65$

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 30) sont : $(-3.8117, 104.7660)$, $(150.2541, 65.0007)$, $(16.1628, -10.8252)$

La surface maximale du triangle de sustentation = $8.5072e+003$

Le nombre d'itérations = 428

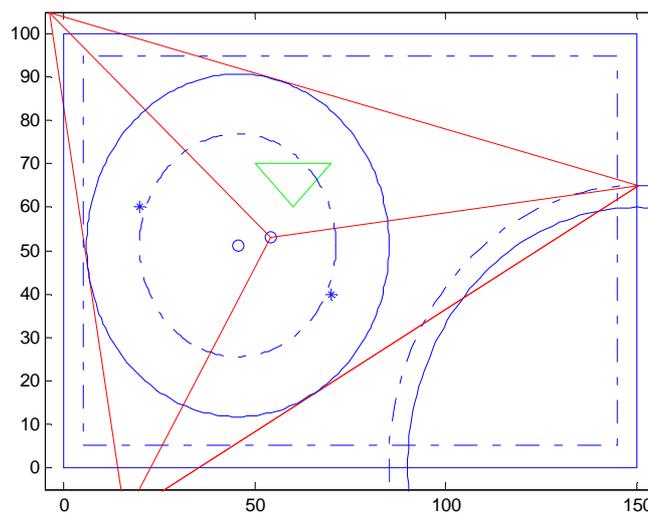


Figure 30 : Divergence du résultat

- Exemple 6 :

$\lambda = 0,55$

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 31) sont : $(-7.3733, 108.3730)$, $(152.5971, 64.9577)$, $(14.3097, -16.5858)$

La surface maximale du triangle de sustentation = $9.5242e+003$

Le nombre d'itérations = 428

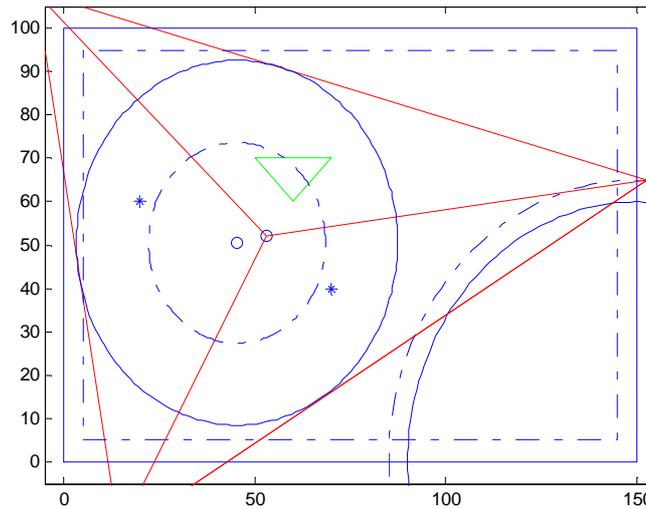


Figure 31 : Divergence du résultat

Cas d'appui formé de plusieurs surfaces

Dans le cas d'appui représenté par plusieurs surfaces d'appui on considère les surfaces qui se trouvent à la périphérie (figure 32 et 33). On remarque bien que les conditions d'optimisation sont respectées.

- Exemple 1 :

Les coordonnées du triangle initial : $(5, 5)$, $(5, 65)$, $(95, 80)$

Les contraintes sont : $(0, 80)$, $(50, 80)$

Les coordonnées des sommets du triangle obtenus (figure 32) sont : $(35.00, 5.00)$, $(105.00, 125.00)$, $(-55.00, 115.00)$

La surface maximale du triangle de sustentation = $9.2500+003$

Le nombre d'itérations = 37

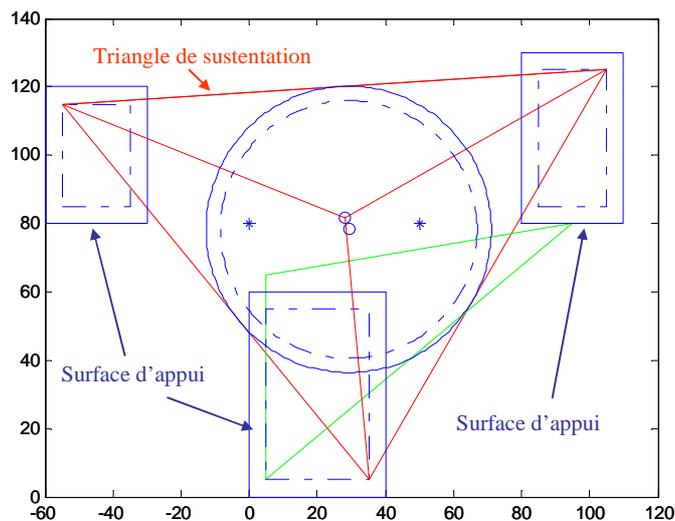


Figure 32 : Cas d'appui formé de plusieurs surfaces

- Exemple 2 :

Les coordonnées du triangle initial : (5, 5), (5, 65), (95, 80)

Les contraintes sont : (50, 80), (-25, 80)

Les coordonnées des sommets du triangle obtenu (figure 33) sont : (-55.7599, 115.8438), (5.5644, 3.9947), 105.4226, 125.4534)

La surface maximale du triangle de sustentation = 9.3.87+003

Le nombre d'itérations = 428

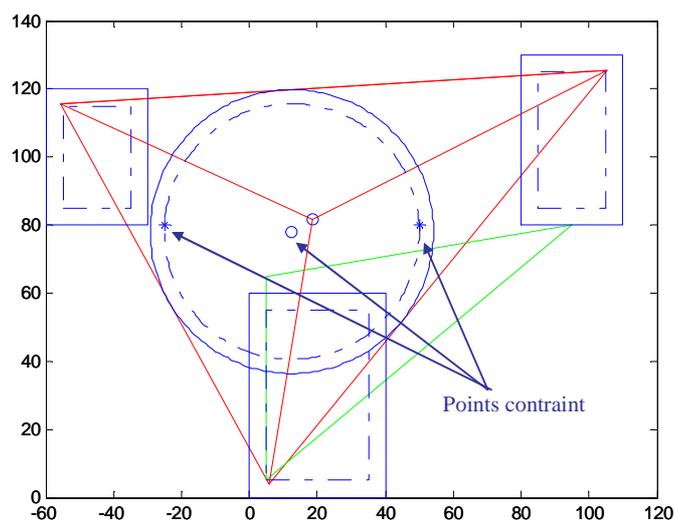


Figure 33 : Les points contraints permettent de changer le positionnement du triangle

3 Conclusion

D'après les exemples de simulation, les coordonnées du triangle initial influent sur le positionnement des sommets du triangle et sur la convergence ainsi que sur le nombre d'itérations. Il faut choisir toujours le triangle initial le plus grand possible avec les points contraints à l'intérieur. Le choix du triangle initial se fait aussi en fonction de l'orientation du triangle de sustentation que l'on veut obtenir.

La répartition des points contraints influe sur la convergence, sur l'orientation et sur la surface du triangle de sustentation.

L'optimisation avec le cercle inscrit est utilisée quand les points contraints sont répartis autour du centre du triangle de sustentation avec des distances inférieures ou égales au rayon du cercle. Aussi il faut que ces points soient vers le milieu de l'appui.

Le cercle inscrit dans le cercle inscrit est utilisé vraiment quand les points contraints sont concentrés autour du centre du triangle de sustentation. L'optimisation avec le cercle inscrit dans le cercle inscrit possède un espace de solution très restreint. D'après les résultats de simulation, la valeur experte λ doit être comprise entre 0.9 et 1.

L'optimisation multi-objectifs est préférable lorsque les efforts de coupe sont appliquées symétriquement par rapport à la résultante des efforts de bridage.