

# Chapitre I

## Les méthodes d'évidement des poches

## I.1 Introduction

En mécanique industrielle, la fabrication d'une pièce à partir d'une quantité de matière livrée sous forme de produits semi-finis (tôles, barres, etc.) requiert la mise en œuvre d'un ensemble de techniques. L'une d'entre elles est l'usinage, c'est-à-dire un enlèvement de matière par un outil coupant. L'usinage d'une pièce se décompose en une succession d'opérations, définie par la gamme d'usinage établie par le bureau des méthodes à partir du dessin de définition issu du bureau d'études. L'usinage traditionnel s'effectue, en respectant les règles de la coupe des métaux, sur des machines-outils classiques ou automatisées. [2]

L'usinage des poches nécessite en général l'enlèvement d'un important volume de matière en ébauche ou en ébauche et finition combinées. D'un point de vue géométrique, une poche est constituée d'un fond et d'une surface latérale s'appuyant sur un contour ouvert ou fermé. Le contour et par suite la surface latérale comprend un contour externe et aucun ou plusieurs contours internes. Les portions de surface latérale s'appuyant sur des contours internes sont appelées îlots.

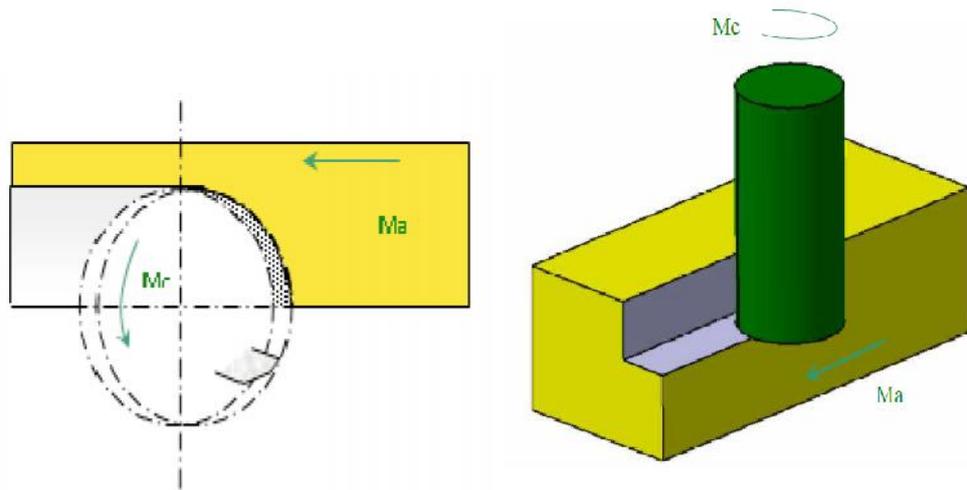
Dans ce chapitre nous présenterons les méthodes d'évidement des poches après une introduction sur le fraisage.

## I.2 Le fraisage

Le fraisage est un procédé d'usinage réalisé au moyen d'un outil multiple (à plusieurs arêtes de coupe) qui est animé d'un mouvement de rotation.

- Mouvement de rotation de la fraise qui est entraîné par la broche de la machine,  $M_c$  (mouvement rapide circulaire de coupe).
- Mouvement de translation de la pièce qui est fixée sur la table de la machine,  $M_a$  (mouvement lent rectiligne uniforme d'avance).

Le mouvement de translation est orienté de façon à pousser la pièce contre la fraise suivant une direction généralement perpendiculaire par rapport à son axe. [3]

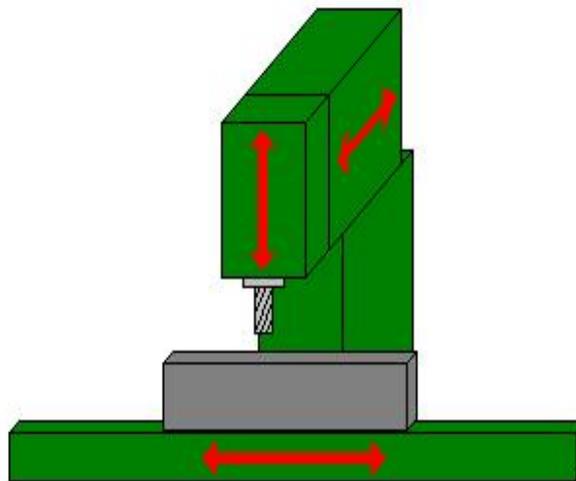


**Figure I.1.** Mouvements de coupe et d'avance. [3]

### I.3 Les machines de fraisage

Les machines à fraiser servent à réaliser des surfacages ainsi que l'usinage des surfaces de différentes formes ; elles permettent aussi de tailler les dents et l'usinage des surfaces de forme complexe. Les fraiseuses doivent leur appellation à la fraise, outil de coupe à dents multiples utilisée sur ces machines.

Le principe de travail de la fraiseuse est la combinaison d'un mouvement de coupe (rotation de la fraise sur la broche) avec un mouvement auxiliaire (translation de la table portant la pièce par rapport à la fraise) comme le montre la figure I.2 .



**Figure I.2.** Principe du fraisage

Les machines à fraiser les plus répandues en construction mécanique et dans l'usinage des métaux sont de trois types : la fraiseuse horizontale, la fraiseuse verticale et la fraiseuse universelle.

### I.3.1 Les fraiseuses d'outillage (universelles)

Cette machine sert principalement à usiner des pièces prismatiques. La pièce est fixée dans l'étau. L'outil est mis en rotation par le moteur de broche, il suit une trajectoire qui interfère avec la pièce. L'outil est muni d'une arête coupante, il en résulte un enlèvement de matière : les copeaux. Ces petits éléments de matière sont appelés les copeaux .

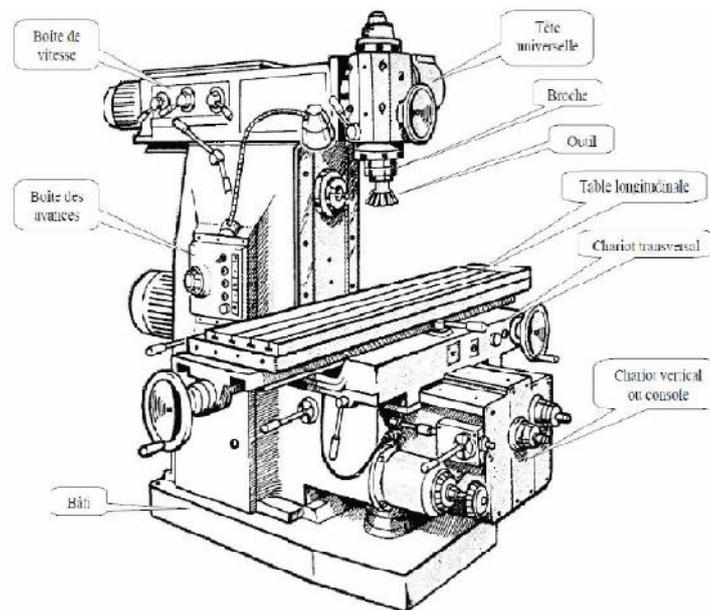


Figure I.3. Fraisage universelle [4]

#### I.3.1.1 Fraiseuse horizontale

Il y a des fraiseuses horizontales dont la table est mobile en translation selon les trois directions (mouvement latéral, transversal et vertical), peut aussi pivoter d'un certain angle, ce pivotement les classe dans la catégorie des fraiseuses universelles.

Dans ce cas, l'angle de rotation de la table est lu directement sur une échelle spéciale. Il y a des fraiseuses universelles qui offrent une possibilité d'inclinaison de la broche par rapport à la pièce pour donner plus de souplesse dans la réalisation des pièces par l'opérateur. [4]



**Figure I.4.** Fraisage horizontal. [2]

### I.3.1.2 Fraiseuse verticale

Dans la fraiseuse verticale : l'axe de la broche est perpendiculaire à la table. [4]



**Figure I.5.** fraisage verticale. [2]

### I.3.2 Fraiseuses à commande numérique

Le déplacement de l'outil sur la trajectoire d'usinage est décrit par l'opérateur à l'aide d'un programme. On utilise pour cela les coordonnées des différents points de passage de l'outil par rapport à la pièce. Les mouvements sont possibles sur plusieurs axes simultanément.

Les mouvements sur les axes sont générés par des moteurs qui permettent aussi de choisir des vitesses d'avance. Le choix de ces vitesses s'effectue par un variateur. On dispose donc d'un large choix des vitesses. [5]



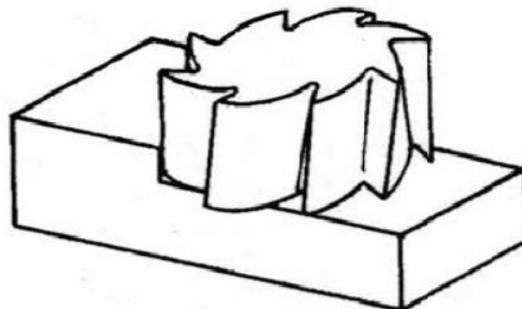
**Figure I.6.** Fraiseuse à commande numérique. [6]

## I.4 les procédés de fraisage

### I.4.1 Le fraisage en bout

L'axe de la fraise est placé perpendiculairement à la surface à usiner. La fraise coupe avec son diamètre, mais aussi avec sa partie frontale. Les copeaux sont de même épaisseur, ainsi la charge de la machine est plus régulière.

La capacité de coupe est supérieure à celle réalisée par le fraisage en roulant. La qualité de l'état de surface est meilleure. [7]



**Figure I.7.** Fraisage en bout. [7]

### I.4.2 Le fraisage en roulant

L'axe de la fraise est placé parallèlement à la surface à usiner. La fraise coupe avec son diamètre. La charge de la machine en est irrégulière, surtout lors de l'emploi de fraises à denture droite. Les à-coups provoqués par cette façon de faire donnent une surface ondulée et striée. Pour pallier ces défauts, on utilisera une fraise à denture hélicoïdale. L'amélioration enregistrée s'explique ainsi: la denture est chargée et déchargée progressivement. [7]

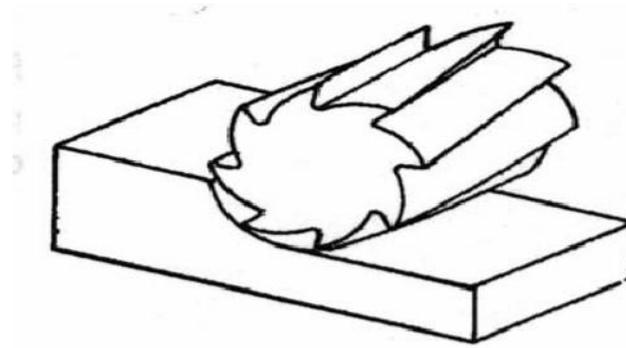


Figure I.8. Fraisage en roulant. [7]

## I.5 Les directions de fraisage

La fraise effectue un mouvement de rotation tandis que la pièce avance dans sa direction. La coupe est donc ainsi définie par les paramètres impliqués. Il existe deux manières de procéder, selon le sens de rotation de l'outil par rapport à la pièce. Cette différence joue un rôle fondamental et affecte le processus de fraisage sous divers aspects. La pièce peut avancer, selon le cas, dans le sens de la rotation ou dans le sens opposé, ce qui a tout spécialement son importance en début et en fin de coupe. [2]

### I.5.1 Fraisage en opposition

Le mouvement d'avance de la pièce à fraiser est opposé au sens de rotation de la fraise. Cette dernière attaque le copeau au point d'épaisseur minimal. Dans ce cas, les dents glissent sur la surface usinée avant rotation de la fraise. Cette façon de faire provoque un grand frottement d'où une usure plus rapide des tranchants de la fraise. De plus, l'effort de coupe en fraisage horizontal tend à soulever la pièce à usiner. Les copeaux peuvent également être entraînés par la fraise et se coincer entre la pièce et les arêtes de coupe, endommageant la pièce et la fraise. [7]

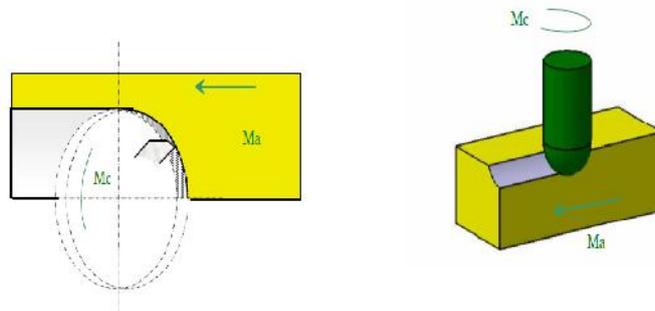
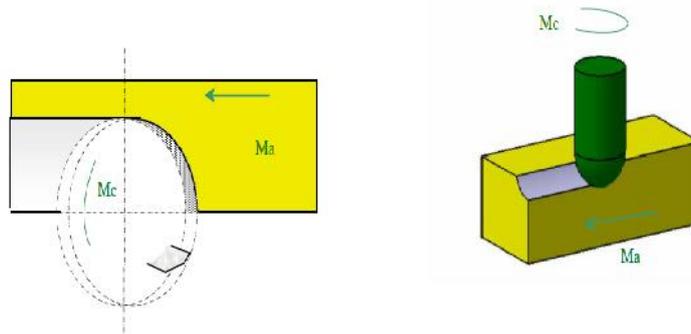


Figure I.9. Fraisage en opposition. [3]

### I.5.2 Fraisage en concordance ou fraisage "en avalant"

Le sens de rotation de la fraise et celui du déplacement de la pièce à fraiser vont dans la même direction. Les tranchants de la fraise attaquent le copeau au point d'épaisseur maximal. Cette façon de faire, en fraisage horizontal, plaque la pièce sur la table de la fraiseuse et donne des surfaces finies de bonne qualité. Ce principe nécessite l'utilisation d'une machine robuste disposant d'une table équipée d'un système de translation avec rattrapage de jeu, ce qui est le cas sur les machines modernes. Ainsi on évite que la pièce soit "tirée" dans la fraise. [7]



**Figure I.10.** Fraisage en avalant. [3]

### I.6 Le fraisage hémisphérique

Une fraise à bout hémisphérique aussi appelée fraise sphérique, a une demi sphère au bout de l'outil. Les fraises à bout hémisphérique sont beaucoup utilisées dans l'usinage de filières, moules, et des pièces avec des surfaces complexes dans l'automobile, l'aérospatial et la Défense. [2]

Le diamètre effectif est le principal facteur utilisé dans le calcul de la vitesse de broche requise. Le diamètre effectif est défini comme le diamètre actuel de la fraise à la ligne axiale de profondeur de coupe. Le diamètre effectif est affecté par deux paramètres : rayon de l'outil et la profondeur de coupe axiale. [2]



**Figure I.11.** Fraisage hémisphérique. [2]

## I.7 Les conditions de coupe

Le mouvement de coupe anime l'outil (fraise tournante). Le mouvement d'avance est un mouvement de translation de l'outil. [5]

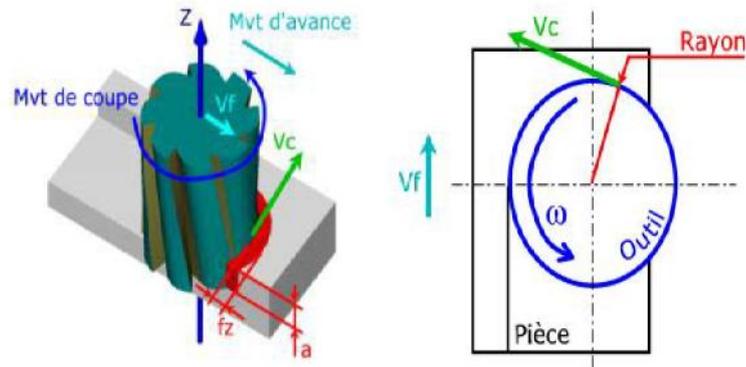


Figure I.12. Les conditions de coupe [5]

### I.7.1 Vitesse de coupe

La vitesse de coupe indique pour sa part la vitesse à laquelle l'arête de coupe travaille la surface de la pièce. C'est un important paramètre de l'outil, qui fait partie intégrante des conditions de coupe avec, pour fonction, de garantir que l'opération est effectuée dans les meilleures conditions d'efficacité par l'outil concerné.

La vitesse de broche, le diamètre de l'outil et la vitesse de coupe sont naturellement liés par les formules suivantes. [8]

$$V_c = \frac{Dfn}{1000} (m / \text{min}) \quad (\text{I.1})$$

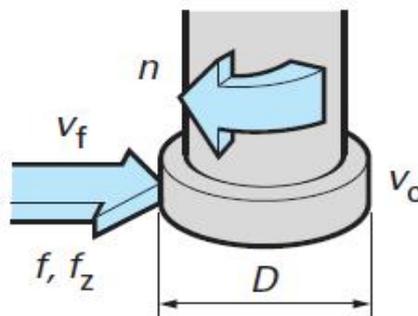


Figure I.13. Vitesse de coupe [8]

### I.7.2 Vitesse de broche

La vitesse de rotation de la broche est le nombre de tours que l'outil de fraisage monté sur la broche de la machine-outil effectue par minute. Il s'agit là d'une valeur dépendant de la machine, qui ne renseigne guère sur ce qui se passe à la périphérie où l'arête de coupe fait son office. [8]

$$n = \frac{1000V_c}{Df} \text{ (tr / min)} \quad (I.2)$$

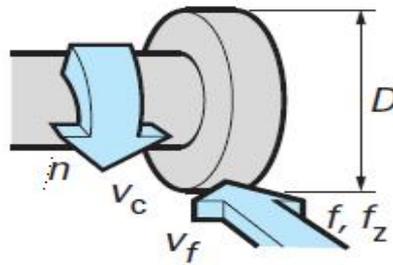


Figure I.14. Vitesse de broche. [8]

### I.7.3 La vitesse d'avance

La vitesse d'avance est l'avance de l'outil en direction de la pièce, exprimée en unités de distance par unité de temps. On parle également ici d'avance de table. [8]

$$V_f = f_z \cdot Z \cdot n \text{ (mm / min)} \quad (I.3)$$

### I.7.4 Avance par tour

L'avance par tour est une valeur spécialement utilisée pour calculer l'avance et déterminer l'aptitude d'une fraise à surfacier à travailler en finition. Elle indique de combien l'outil avance au cours d'une rotation. [8]

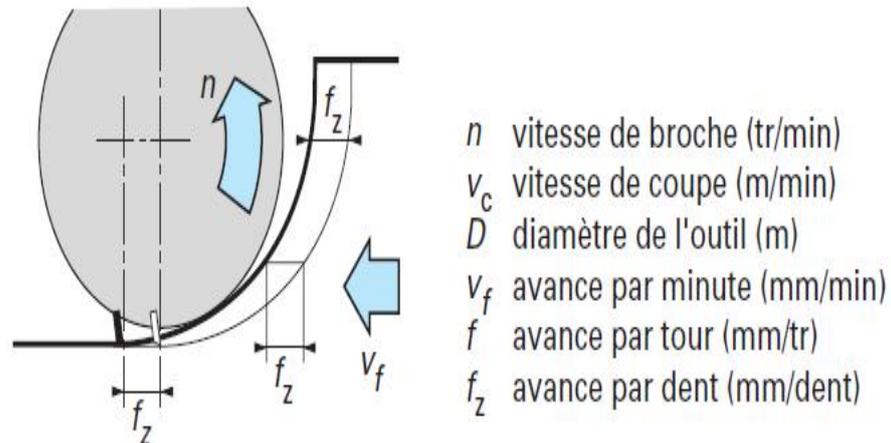
### I.7.5 Avance par dent

L'avance par dent est un important paramètre en fraisage. La fraise étant un outil à arêtes multiples, il faut en effet disposer d'un moyen de mesure pour contrôler que chacune de ces arêtes travaille dans des conditions satisfaisantes.

La capacité d'enlèvement de matière de chaque dent est l'élément limitatif au niveau des performances de l'outil. L'avance par dent indique la distance linéaire parcourue par l'outil alors qu'une certaine dent est engagée.

L'avance par dent représente aussi la distance couverte entre la pénétration de deux dents successives dans la pièce. Elle peut donc être exprimée en fonction du nombre d'arêtes de l'outil ( $z$ ) et de l'avance par minute, ou sous forme d'avance par tour. [8]

$$f_z = \frac{V_f}{Z \cdot n} (\text{mm / dent}) \quad (\text{I.4})$$



**Figure I.15.** Vitesse de broche, vitesse de coupe et avances. [8]

### I.7.6 La profondeur de passe

La profondeur de passe ( $a$  en mm) correspond à l'épaisseur de matière enlevée par l'outil. [2]

### I.7.7 Détermination du temps de coupe

Nous déterminons ici le temps de coupe dans le cas de fraisage en bout et le cas de fraisage en roulant. [2]

#### I.7.7.1 Cas de fraisage en bout

$$T_c = \frac{D + L + l_1 + l_2}{1000 \cdot f_z \cdot V_c \cdot Z} \quad (\text{I.5})$$

$L$  : Longueur de la fraise

$l_1$  : Longueur d'approche

$l_2$  : longueur de dégagement

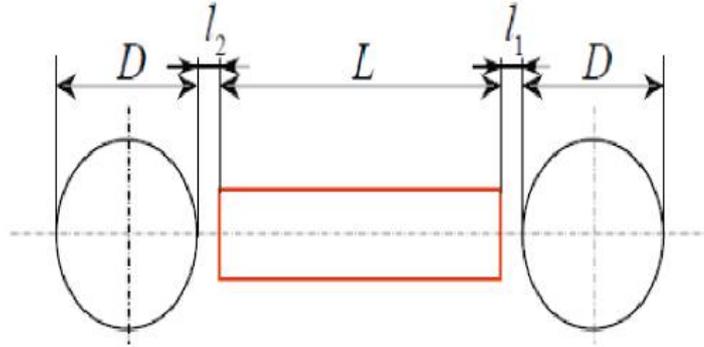


Figure I.16. Fraisage en bout [2]

### I.7.7.2 Cas de fraisage en roulant

$$T_c = \frac{2\sqrt{a(D-a)} + l_1 + l_2 + L}{1000 \cdot f_z \cdot V_c \cdot Z} f D \quad (I.6)$$

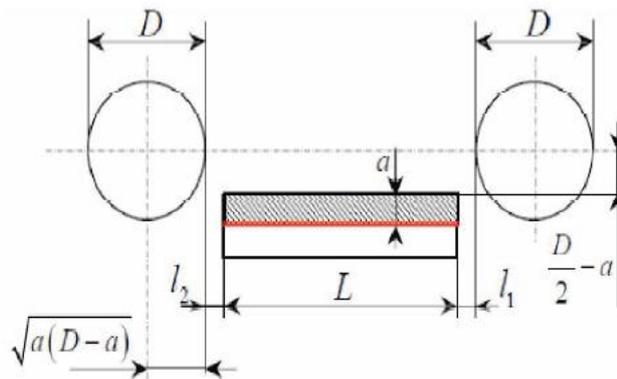


Figure I.17. Fraisage en roulant. [2]

## I.8 Stratégie d'usinage des poches

Dans le cas de l'usinage de pièces simples ou prismatiques, les évolutions se situent dans l'organisation chronologique des différentes opérations et dans les trajectoires d'usinage. [9]

### I.8.1 Choix des outils et de leurs dimensions

En ce qui concerne l'évidement d'une poche particulière ou d'un groupe de poche, l'optimal actuel consiste en la réalisation des opérations d'usinage avec un même outil dont le diamètre est le plus grand possible en fonction des rayons de raccordement. Cela s'oppose aux méthodes usuelles qui enchaînent le perçage d'un avant trou de passage de la fraise, l'évidement ébauche avec une fraise de grand diamètre, puis avec une de plus petit diamètre, jusqu'à obtenir la forme attendue.

Ce choix est justifié par trois constats. Déjà la puissance disponible ne permet pas forcément d'utiliser des outils de grand diamètre au mieux de leur performance. Puis on considère que le temps d'arrêt d'une broche grande vitesse, de changement de l'outil et de ré-stabilisation à haute fréquence de rotation est trop important, par rapport au gain apporté par l'emploi d'un outil de grand diamètre.

Enfin, la précision des machines-outils à commande numérique permet actuellement de réaliser des cylindres par contournage ayant une cylindricité suffisante. On peut donc considérer les alésages de grand diamètre comme des poches à profil circulaire obtenu par interpolation circulaire. On assiste donc à une minimisation du nombre d'outils dans la phase d'usinage, chaque outil étant utilisé pour réaliser plusieurs formes.

Il faut remarquer que cette règle repose uniquement sur l'analyse des performances dynamiques de la broche. Suivant celles-ci, une société pourrait conduire à un choix différent pour des raisons économiques. Néanmoins, il se poserait alors des problèmes d'usinage du fait des formes obtenues avec chaque outil. Si les diamètres sont différents, il n'est pas toujours possible de garantir des profondeurs de passe axiale constantes. [9]

### **I.8.2 Entrées et sorties de la matière**

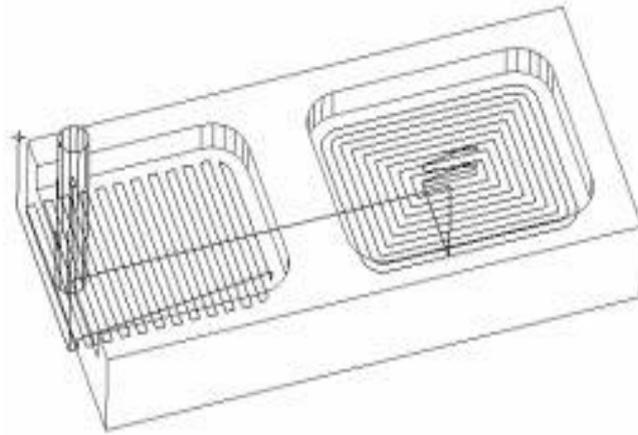
La principale contrainte associée à l'évidement des poches est de garantir le plus souvent possible une continuité de l'usinage pour assurer une continuité des sollicitations mécaniques appliquées à l'outil. Cela est totalement impossible à réaliser avec l'opération de perçage du trou de passage de la fraise qui ne sollicite pas l'outil dans des configurations normales et qui ne permet pas un refroidissement correct de l'outil.

Pour pallier cela, on utilise une stratégie d'entrée en pleine matière en colimaçon ou en feuille morte. L'outil est donc toujours en mouvement durant le percement du trou et la section de copeau est constante. L'outil fraise ne perce pas, cela impose des outils soit hémisphériques, soit toriques, qui évitent le talonnement durant la descente.

### **I.9 L'évidement des poches**

L'évidement de la poche peut être réalisé par balayage ou en colimaçon. On préfère actuellement un usinage par balayage de l'extérieur vers l'intérieur pour les poches ayant une ouverture de passage de la fraise, et en colimaçon de l'intérieur vers l'extérieur pour les poches fermées. Ces solutions permettent de limiter le temps pendant lequel l'outil usine en pleine matière (rainurage). Il est nul avec la première stratégie très faible avec la seconde. On

évite donc le balayage des poches fermées. Le recours à des trajectoires en colimaçon permet aussi de choisir d'usiner en avalant ce qui est plutôt recommandé .



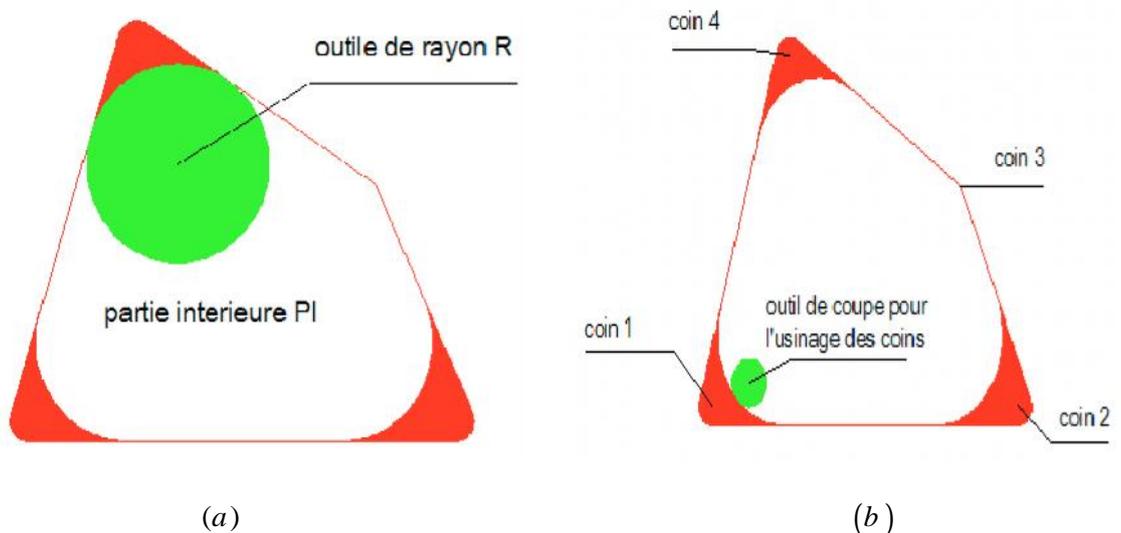
**Figure I.18.** Stratégies d'usinage pour l'évidement des poches.

Enfin, la recherche d'une section de copeau constante durant l'usinage impose la modification des trajectoires durant le balayage. On remplace actuellement les changements brusques de direction par des trajectoires suivant des arcs de cercle de raccordement.

### I.9.1 Processus d'évidement d'une poche quelconque

L'évidement de la poche se fait en deux étapes :

- évidement de la partie intérieure « PI » (figure I.19 a) par un outil de rayon (R),
- reprise des coins par un outil de rayon (R1). (figure I.19 b). [10]



**Figure I.19.** Principe d'évidement de la poche. [10]

## I.9.2 Types de stratégies d'usinage

### I.9.2.1 Stratégie Zig Zag

Avec cette stratégie, le balayage se fait suivant des passes parallèles à une direction donnée conduisant à une alternance de travail en opposition et en concordance. L'usinage en Zig-Zag génère des crêtes de matières sur le contour de la poche. Il est nécessaire dans ce cas d'utiliser un cycle de contournage de la poche pour enlever cette irrégularité de matière (figure I.20).

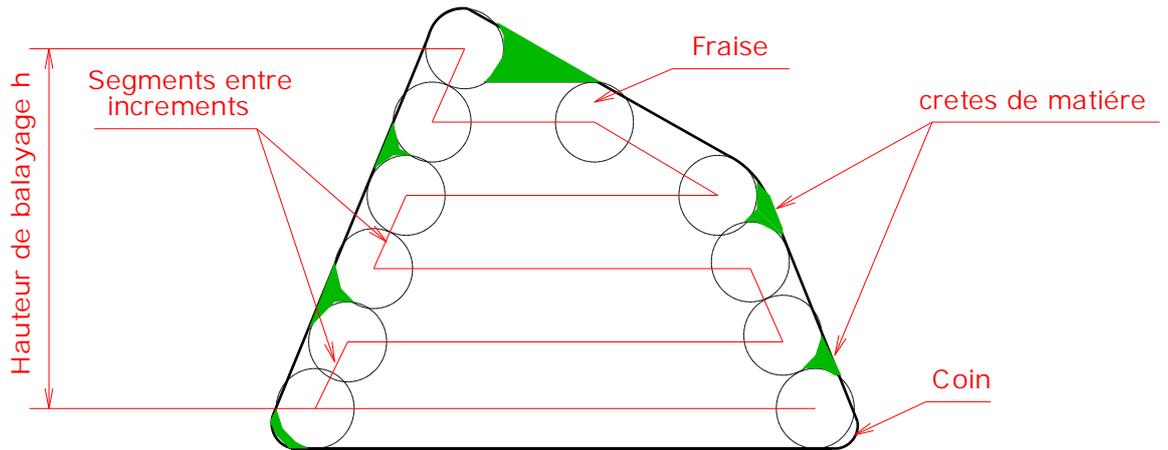


Figure I.20. Stratégie d'usinage en zigzag

### I.9.2.2 Stratégie contours parallèles

Dans cette stratégie on utilise les contours de la poche pour construire des trajectoires décalées successivement, de préférence on commence l'usinage par le coin ou se trouve le plus petit angle pour araser les becquets à chaque passage de la fraise d'un contour à un autre (Figure I.21).

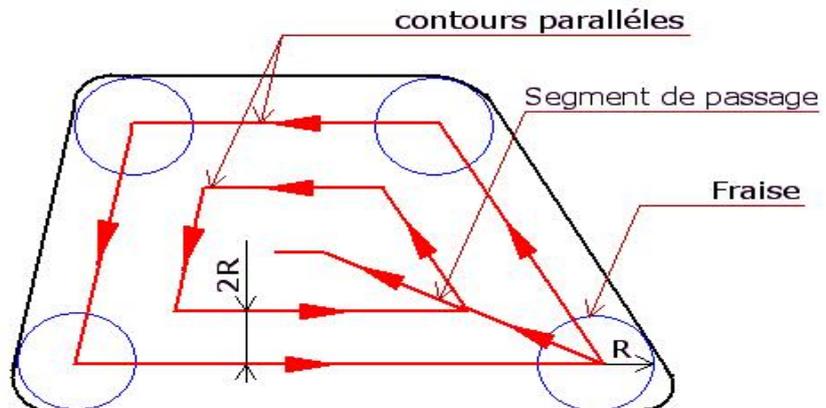


Figure I.21. Trajectoires de la stratégie contour parallèle

### I.9.2.3 Stratégie contour spirale

De même que pour la stratégie précédente la trajectoire suit le contour de la poche de façon continue jusqu'au dernier contour sans segments de passage mais au départ l'usinage doit commencer à partir de la fin du plus long segment.

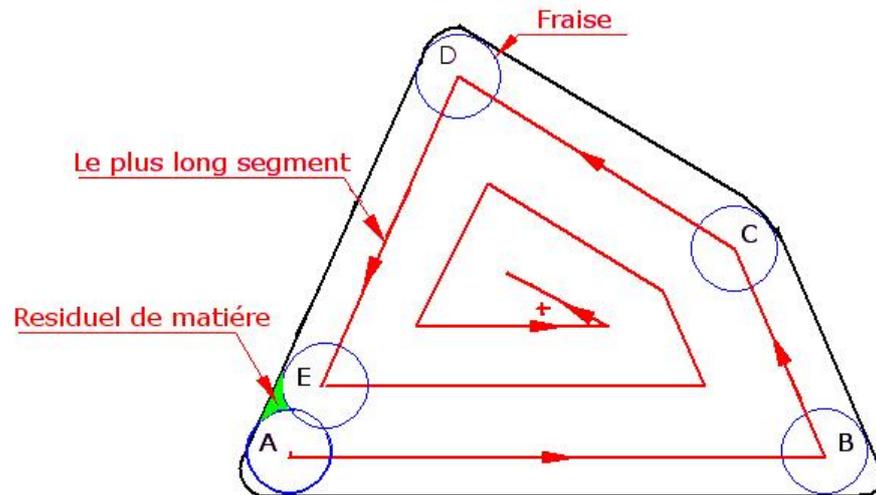


Figure I.22. Trajectoires de la stratégie contour spirale

### I.10 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre de notre étude les principaux procédés d'usinage ainsi que les outils et les stratégies utilisés dans l'évidement des poches, pour pouvoir réaliser une modélisation de trajectoires des outils de coupe.