

**Ecole Nationale Supérieure Agronomique - El Harrach – Alger**  
Département de Génie Rural  
Option : Machinisme Agricole  
Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister en sciences agronomiques

***Caractérisation et optimisation par  
simulation de la forme des surfaces  
actives des corps de charrue à socs***

Réalisé par :  
**TAIB Abdelhafidh**  
Soutenu le : 12/12/2012  
Promoteur : AMARA Mahfoud M.C.

***Devant le jury*** : Président : HARTANI Tarek Prof. Examineurs: REGUIEG Lies M.C. BAKEL  
Mohamed M.A.



# Table des matières

REMERCIEMENTS . .	5
Dédicace . .	6
RESUME . .	7
SUMMARY . .	8
ص خ لم . .	9
Liste des abréviations . .	10
Introduction générale . .	11
Partie bibliographique . .	13
Chap.1 : Généralités sur l'importance de travail du sol . .	13
Introduction . .	13
1.1. Technique conventionnelle . .	13
1.2. Technique culturale simplifiée . .	14
1.3. Semis direct . .	15
Conclusion . .	16
Chap. 2 : Mode d'action des surfaces actives des pièces travaillantes sur le sol . .	16
Introduction . .	17
2.1. Rappels sur quelques caractéristiques du sol . .	17
2.2. Principales sollicitations du sol . .	18
2.3. Interaction outil – sol . .	20
Conclusion . .	21
Chap. 3: Critères du choix des pièces travaillantes des outils aratoires . .	22
Introduction . .	22
3.1. Les conditions de sol . .	22
3.2. Les conditions de travail . .	25
3.3. Les exigences des cultures . .	27
Conclusion . .	28
Chap. 4: Caractéristiques géométriques des surfaces actives des corps de charrue. . .	28
Introduction . .	28
4.1. Caractéristiques géométriques d'un corps de charrue à socs . .	28
4.2. Conception et fabrication des surfaces actives . .	35
Conclusion . .	35
Chap. 5: Les moyens utilisés pour caractériser des surfaces actives des pièces travaillantes . .	36
Introduction . .	36
5.1. Moyens de caractérisation géométriques des surfaces actives . .	36
Partie Expérimentale . .	43
Introduction . .	43
Chap. 6. Outils aratoires à surfaces gauches . .	43
Introduction . .	43
6.1. Caractéristiques générales . .	43

6.2. Matériel et méthode . .	45
6.3. Méthodes de caractérisation . .	47
6.4. Méthodes adoptés pour notre travail . .	50
6.5. Modélisation de surface de corps de charrue . .	51
6.6. Optimisation du contour du corps de charrue . .	63
6.7. Conception du corps de charrue à socs . .	70
Conclusion . .	70
<b>Chap.7.Simulation du mode d'action de deux formes de surfaces actives de corps de charrue à socs . .</b>	<b>71</b>
Introduction . .	71
7.1. Travaux antérieurs . .	71
7.2. Choix de la forme des deux corps de charrue à socs . .	71
7.3. Equation de la forme ENPMA. . .	73
7.4. Conception de la forme du corps ENPMA . .	74
7.5. Méthodologie d'analyse des contraintes . .	75
7.6. Propriétés de masse pour les deux corps . .	76
7.7. Point d'application . .	77
7.8. Résultats de la simulation . .	78
7.9. Interprétation des résultats . .	82
conclusion générale . .	85
Références bibliographiques . .	87
Annexes . .	91

## REMERCIEMENTS

Louange à Allah, seigneur de l'univers, le tout puissant et Miséricordieux, qui m'a inspiré et comblé de bienfaits, je lui rends grâce.

Au terme de ce travail, qu'il me soit permis d'exprimer mes plus vifs Remerciements à :

Mr. AMARA Mahfoud., maitre de conférences à l'ENSA, pour la confiance qu'il m'a accordée en me proposant cette étude et aussi d'avoir bien accepté de la diriger. Je le Remercie pour toute l'aide scientifique et technique et morale qu'il m'a apportée au

Cours de la réalisation de ce travail.

Mr. HARTANI Tarek, Professeur à l'ENSA, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury. Qu'il trouve ici l'expression de mon Profond respect.

Mr. BAKEL Mohamed, Maitre assistant à l'ENSA, pour avoir accepté d'examiner  
Ce travail, qu'il trouve ici ma profonde reconnaissance.

Mr. REGUIEG Lies, Maitre de conférences à l'ENSA, qui a accepté de faire partie du jury et de juger ce modeste travail.

Je remercie également, pour leur aide, toutes les personnes qui ont bien voulu m'apporter leur appui dans la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à remercier tous qui ont contribué à la réalisation de ce modeste travail.

## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail : A mes très chers parents ; A toute ma famille et mes amis ; A tous ceux qui me connaissent de près ou de loin ;*

## RESUME

Cette étude présente une caractérisation et modélisation de la surface active du corps de charrue à socs MAGI afin de son optimisation. Le but principal est de proposer une méthode d'analyse des surfaces actives des outils aratoires les plus utilisés sur nos champs, de proposer une équation de surface de deux formes de charrue à socs. A cet effet, on a utilisé deux méthodes pour cette caractérisation, la méthode statistique à l'aide des logiciels de graphique et la méthode géométrique par courbe de Bézier afin de modéliser et d'optimiser le contour du corps de charrue. Cette étude a permis de définir la variation de la courbure de la surface active, de prévoir le cheminement et la déformation de la bande de terre sous l'effet de cette dernière.

Cette étude de forme est améliorée par une simulation du comportement mécanique de ces deux modèles par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel SolidWorks. L'analyse des contraintes a permis de définir la région la plus sollicitée et le bon choix du matériau qui résiste aux usures et chocs.

**Mots clés** : Caractérisation, modélisation géométrique, optimisation, courbe de Bézier, surface active, simulation, SolidWorks.

## SUMMARY

This study present a characterization and modelization of the working surface of the moldboard plough MAGI in order to its optimization. The principal objective is to suggest a surface working analysis method using of most tools ploughing in our fields, to suggest an equation of two shape surface of moldboard plough. For this raison two methods are used in that characterization, a statistic and geometric methods by curve of Bezier for contour modeler and optimizer. This study made it possible to define the curvature variation of working surface, to preview the trajectory of cross section under the action of this last.

This study of shape is completed by a simulation of mechanical behavior of these two models by MEF method under SolidWorks environment. The stress analysis it possible to define the most region solicits and a good choice of the material which a wear and choc resisting.

**Key words** : *Characterization, geometric modeling, optimization, curve of Bezier, surface working, simulation, SolidWorks.*



## ص خ لم

تمثل هذه الدراسة توصيف و نمذجة المساحة الفعالة لسكة محرات من نوع مختلط. الهدف الأساسي هو تقديم طريقة تحليل المساحة الفعالة للأدوات الزراعية الأكثر استعمالاً في حقولنا، كذلك تقديم معادلة المساحة الفعالة لأنواع من المحرات. لهذا استعملنا في هذا التوصيف طريقتين، الطريقة الإحصائية باستعمال برامج حاسوب وطريقة منحني بيزر من أجل نمذجة وتحسين محيط المساحة الفعالة. هذه الدراسة مكنت من تحديد نوع شكل إنحاء المساحة الفعالة و تقدير مسلك و تسوية قطعة الأرض المحروثة تحت تأثير هذه الأخيرة.

لاستكمال المرحلة الأولى، قمنا بتمثيل عددي بواسطة العناصر المنتهية للسلوك الميكانيكي لشكلين مختلفين من المحرات. تحليل التسويات على مستوى مساحة المحرات سمحت لنا من تحديد المنطقة الأكثر تسوية وكذلك مكنت من إدراك جيد لاختيار مادة الصنع التي تقاوم التآكل و قوة الصدم.

الكلمات الأساسية:

التوصيف، نمذجة هندسية، تحسين، منحني بيزر، المساحة الفعالة، تمثيل عددي، برنامج SolidWorks.

## Liste des abréviations

- **TCS** : technique culturale simplifié.
- **M.O** : Matière organique.
- **CC** : Cohésion du sol.
- **KJ .m<sup>-3</sup>** : Kilojoule par mètre cube.
- **Wopt** : Teneur en eau optimale du sol.
- **DaN** : Deca-newton.
- **Km/h** : Kilomètre par heure.
- **MPa** : Méga pascalle.
- **NURBS** : Non uniforme Rational B-Spline
- **MAGI** : Entreprise de fabrication de machines agricoles et industrielles.
- **CAO** : Conception assisté par ordinateur.
- **MEF** : Méthode des éléments finis.
- **Ft (N)** : Force de résistance à la traction (Newton).
- **N.mm<sup>-2</sup>** : Newton par millimètre carré.

---

# Introduction générale

La production des céréales en Algérie reste tributaire des facteurs édapho-climatiques, d'une part, et d'autre part, des facteurs d'ordre technique, la rotation culturale, la fertilisation et le travail du sol. Parmi les facteurs qui contribuent à la modification de la caractéristique du sol, la pratique de techniques culturales, en particulier le travail du sol, quand elle est inadaptée peut induire à la détérioration physique, chimique ou biologique du sol. Parmi les opérations culturales déterminantes permettant l'optimisation des rendements des céréales, on cite notamment la préparation du sol, les chutes de rendement attribuées aux mauvaises conditions de préparation du sol sont estimées annuellement par l'ITGC entre 30 et 40% (Hamadache., 2006).

Les outils de préparation du sol sont très nombreux, parmi ses objectifs les plus importants la transformation de l'état initial du sol qui est souvent caractérisé par un tassement excessif dû aux nombreux passages de machines agricoles, du semis jusqu'à la récolte, à un état final caractérisé par une porosité moyenne permettant une bonne infiltration de l'eau pour constituer des réserves en eau et en même temps un bon développement du système racinaire de la plante. Leur choix est très important vu l'actuel contexte économique qui est devenu de plus en plus difficile. En effet, la nécessité de réduire les coûts de production ne concerne pas uniquement le choix des formes et quantités d'engrais et de pesticides, elle s'étend à l'ensemble de l'itinéraire technique et des moyens qui sont utilisés pour le conduire.

Les problèmes rencontrés dans le domaine de la mécanisation agricole sont nombreux et peuvent être classés en deux grandes catégories, la première relative à l'économie d'énergie et surtout à la maintenance et l'entretien des équipements agricoles. La deuxième catégorie relative à l'utilisation optimale des machines agricoles pour répondre aux exigences agro-technique des cultures. Dans la méthode classique de préparation du sol agricole en vue du semis ou de la plantation, le labour constitue une séquence très importante et largement appliqué sur nos champs pour la régénération de la structure du sol qui est souvent compacte. Sa qualité est intimement liée aux caractéristiques du sol, son état initial, et des versoirs utilisés ; c'est-à-dire de la façon dont se comporte l'ensemble outil-sol.

Les effets des surfaces actives des pièces travaillantes peuvent être multiples et ces derniers ont une influence directe ou indirecte sur le profil cultural, par exemple l'impact du corps de charrue à versoir sur l'émiettement du sol et l'efficacité du contrôle des adventices au cours de l'ensemble du cycle cultural.

Pour cela le choix de la forme des surfaces actives des pièces travaillantes doit se faire de façon raisonnée, qui convient et qui va nous permettre à répondre à l'objectif agronomique et économique. Ceci est plus nécessaire car celle-ci influe sur les indices qualitatifs de travail et sur la consommation en carburant. En effet le choix de la forme du corps de charrue pour la préparation du sol, étant souvent aléatoire au niveau des exploitations agricoles de notre pays, entraînant une mauvaise réalisation de la première opération la plus importante de l'itinéraire technique ce qui conduit à une chute considérable de rendement.

Pour chaque terre, un bon choix de la forme de la pièce travaillante, dans notre cas le versoir et le soc, est à définir au début de chaque opération de travail du sol. Ceci va permettre de réaliser convenablement l'opération de travail du sol et d'économiser l'énergie. Donc un bon choix de la forme du corps de charrue ne pourrait se faire sans la connaissance des caractéristiques géométriques de ces pièces travaillantes. Ceci d'une part.

D'autre part, les pièces travaillantes des outils aratoires évoluent dans un milieu (sol) souvent très agressif par ces propriétés physico-mécaniques.

Les pièces travaillantes subissent des usures et des déformations souvent très importantes, notamment lorsqu'elles sont utilisées sur des sols abrasifs comme les sols sahariens, dont la composante et la texture dominante est le sable, et des déformations souvent causées par un mauvais choix des matériaux de construction et de réglage inappropriés. Pour cela deux formes ont été étudiées, la première a porté sur la caractérisation et la modélisation géométrique, dans ce cas c'est le corps MAGI. La deuxième partie, une étude comparative des deux formes a été réalisée pour l'étude des contraintes dont l'objectif est la simulation du mode d'action des surfaces actives de ces deux formes qui sont fabriqués localement tel que, MAGI et ENPMA, pour avoir suffisamment d'information sur la répartition des contraintes de déformations et la résistance de ses matériaux vis-à-vis au charge appliquée, afin de choisir convenablement le matériau de construction et limité les usures et chocs.

Outre le coté qualitatif qui doit être prioritaire, ainsi le coté énergétique, c'est-à-dire l'effort nécessaire pour la réalisation d'une opération de travail du sol qui doit être également pris en considération. Ces deux paramètres sont étroitement liés à la forme des surfaces actives des pièces travaillantes des corps de charrues à socs.

Tenant compte de tous ces constats, le choix de la forme et du matériau de construction des pièces travaillantes du corps de charrue doit faire l'objet d'une préoccupation primordiale. Cela ne pourrait se faire sans la connaissance des différentes caractéristiques géométriques et mode d'action de ces pièces travaillantes.

Le but essentiel que s'est fixé cette étude est d'élaborer une méthode simple de caractérisation géométrique des surfaces actives qui réalise en premier partie une quantification de la surface d'un corps de charrue de labour existant en vue d'optimiser de leur forme, il réalise en second partie une simulation du mode d'action de deux forme de corps de charrue sous un programme informatique, cette analyse porte essentiellement sur le champs de déformation et des contraintes à l'intérieur de la surface du corps de charrue.

Ce document est constitué en deux grandes parties :

- La première partie est une étude bibliographique portant respectivement sur l'importance du travail du sol, le mode d'action de la surface active des pièces travaillantes, les critères de choix des pièces travaillantes, les caractéristiques géométriques des surfaces actives et une présentation des moyens utilisés pour caractériser les surfaces actives.
- La deuxième partie portera sur une caractérisation et modélisation de la surface active du corps de charrue MAGI après une présentation de ses caractéristiques géométriques, cette caractérisation est suivie par une optimisation de la forme, enfin ce travail se termine par une simulation du mode d'action de deux formes de corps de charrues à socs fabriqués en Algérie pour choisir le matériau qui résiste le mieux aux contraintes du sol.

---

# Partie bibliographique

## Chap.1 : Généralités sur l'importance de travail du sol

### Introduction

---

Le travail du sol est une action mécanique destinée à modifier les propriétés physiques du sol par pulvérisation, découpage, inversion, afin d'améliorer les conditions de la croissance des plantes pour un meilleur rendement (Grisso et al., 1996). Entre autres, les objectifs du travail du sol sont respectivement :

- La création d'un environnement approprié pour une bonne germination de la graine,
- Le bon développement de la plante,
- Le contrôle des mauvaises herbes,
- L'emmagasinement de l'eau dans le sol.

Le travail du sol est une pratique ancestrale, dont l'un des premiers buts est de créer un environnement favorable à la germination des graines et au développement des racines (Köller., 2003). Indirectement, il affecte donc le fonctionnement du peuplement végétal (en particulier la croissance et le fonctionnement des racines (Tardieu et Manichon., 1987), la germination et la levée et par conséquent sa capacité à prélever les éléments minéraux lorsque ceux-ci sont encore dans la zone prospectée par les racines.

L'importance des opérations de travail du sol pour l'installation des cultures et la diversité pédoclimatique des ressources naturelles sont les principaux facteurs d'apparition de plusieurs techniques de travail du sol. Dans ce qui suit nous présentons les trois techniques que l'on peut rencontrer, elles se différencient principalement par la profondeur de travail ou le volume de terre travaillée. Ces trois techniques sont respectivement :

- La technique conventionnelle
- La technique simplifiée
- Le semis direct

La réussite d'une culture dépend de celle des techniques de préparation du sol. En effet du travail du sol dépend la qualité de l'enracinement. Un bon enracinement permettra une bonne nutrition de la culture.

Sur le plan de la productivité de l'agriculture, les objectifs du travail du sol sont d'assurer la mise en place des cultures et le fonctionnement du système racinaire, de favoriser la circulation de l'eau et de l'air dans le sol et de limiter les infestations de mauvaises herbes. Le labour joue un rôle important pour l'atteinte de ces objectifs, en particulier par son action sur la structure du sol, même si sa pratique comporte certains risques (par exemple la création d'une semelle de labour lorsqu'il est pratiqué par le même outil à la même profondeur).

### 1.1. Technique conventionnelle

---

Le système conventionnel de préparation du sol est caractérisé par un labour entre deux cultures, créant un lit de semence avec les opérations de reprise du labour. Pour la réalisation des labours, plusieurs formes des pièces travaillantes sont utilisées pour passer de l'état initial à l'état final.

La technique conventionnelle de préparation du sol est composée de plusieurs étapes qui sont respectivement le sous solage si le sol est très dur, sec et compact (environ tous les 5 ans), le labour et les reprises du labour et finalement les travaux superficiels pour la préparation du lit de semence. Ces étapes sont définies comme suit :

### **1.1.1. Préparation primaire ou labour**

L'objectif principal de travail du sol primaire est de créer un volume de pores suffisant pour absorber l'eau et l'air et pour permettre une pénétration facile des racines des plantes, en ameublissant le sol dans la couche cultivable (Amara., 2007).

Cette étape est basée sur le labour profond, dont la profondeur de travail varie en moyenne de 25 à 40 cm. Elle consiste à découper une bande de terre verticalement et horizontalement puis à la retourner en la jetant sur le côté (grâce au soc et versoir) (Lerat., 1999).

La qualité de labour dépend des caractéristiques du sol, de son état initial et surtout de la forme des surfaces actives des corps de charrue utilisés ; elle a une influence directe sur la facilité d'exécution des travaux de préparation secondaire du sol qui font suite au labour et une influence sur le rendement des récoltes ultérieures.

Les outils aratoires que nous avons rencontrés dans cette étape sont : la charrue à socs, la charrue à disque, le chisel, la houe rotative.

### **1.1.2. Préparation secondaire (Pseudo labours)**

Après le labour, un ameublissement plus important est nécessaire pour détruire les grosses mottes laissées par l'opération précédente.

L'objectif principal du travail secondaire est la fragmentation des grandes mottes ainsi la préparation d'un lit de semence idéal pour la plantation. Un lit de semence idéal est celui qui tient compte d'un bon contact graine-sol, conserver l'humidité requise pour la germination, et une croissance vigoureuse pour un bon développement des racines (Carroll., 2006).

Les outils aratoires utilisés dans cette étape (pseudo-labour) sont généralement à disques comme le cover-crop ou les cultivateurs à dents. La profondeur de labour (primaire) varie généralement entre 20 et 30 cm, par contre, le pseudo-labour, elle est comprise entre 12 et 20 cm. La dernière étape après la reprise du labour est la préparation du lit de semence. Ce dernier est inclus dans la préparation secondaire parce que les pièces travaillantes des outils utilisés sont très simples comme les dents des herses. La profondeur de travail au niveau de cette opération est nettement inférieure à 10 cm. Les principaux outils utilisés sont les herses, les rouleaux.

## **1.2. Technique culturale simplifiée**

---

Il existe en effet de nombreux stades intermédiaires ou itinéraires techniques, entre le travail du sol incluant un labour classique et le semi direct. (Drepsch., 2001).

Le travail minimum est un système cultural qui vise à réduire au minimum la perturbation du sol (absence de retournement du sol), tandis qu'en même temps créer un lit de semence viable pour la croissance des plantes. Les techniques culturales simplifiées sont caractérisées par une faible profondeur de travail. Le nombre des instruments utilisés et le temps de réalisation sont moins importants par rapport à la première technique. Le contrôle de mauvaises herbes est effectué par l'utilisation des herbicides. (Anderson., 2009).

Il y a différents niveaux dans l'agriculture de conservation : travail minimum, travail en bande, et non labour. Le système de zéro labour ne contient aucune opération primaire ou secondaire de travail du sol.

Dans le système de travail en bande, seulement une bande de sol est travaillée dans laquelle la culture est plantée. L'élimination de toutes les opérations primaires ou secondaires de travail du sol appelé le système de travail minimum. (Carroll., 2006).

Le développement actuel des Techniques Culturales Simplifiées (TCS) s'inscrit d'une part, dans un contexte d'augmenter l'utilisation des produits phytosanitaires (herbicides) et d'autre part les TCS ont pour concentrer les semences dans les premiers centimètres du sol, maximisant ainsi leur potentiel de germination. Cette gestion de la flore adventice est actuellement très dépendante des herbicides, ce qui traduit par le développement de populations résistantes aux molécules utilisées. Aussi, la limitation de l'utilisation des produits de synthèse constitue un problème supplémentaire dans le développement des TCS, dont la mesure où les deux principaux appuis de gestion des mauvaises herbes se trouvent réduits en même temps. (Chauvel et al., 2009).

La simplification du travail du sol, qui peut se traduire par la suppression systématique du labour, amène donc à se poser une première question : peut-on maintenir un état physique favorable à la production végétale tout en limitant les opérations de travail du sol? D'un autre côté, le fait de ne pas retourner le sol est souvent présenté comme un moyen de se prémunir contre l'érosion hydrique : une seconde question est alors de savoir dans quelles conditions cette action est vraiment efficace.

### 1.3. Semis direct

---

Le passage en TCS, et en particulier au semis direct, s'est généralement traduit par une utilisation plus importante d'herbicides pendant la culture mais aussi pendant l'interculture.

Selon Seguy et al (2001), le semi direct est un système conservatoire de gestion des sols et des cultures, dans lequel la semence est placée directement dans le sol sans retournement de celle-ci. Le remaniement mécanique du sol est confiné à la seule implantation de la semence. L'élimination des mauvaises herbes, avant et après le semi et pendant la culture, est faite avec des herbicides, les moins polluants possibles pour le sol qui doit toujours rester couvert. En d'autre terme, la couche arable superficielle n'est retournée, ni entraîné, ni cisailé et ni soulevée comme dans le cas de travail conventionnel. (Bourarach et al., 2001).

Le semis direct est une nouvelle technique qui repose sur quatre principes: 1). supprimer les labours; 2). Couvrir en permanence le sol par une couverture morte constituée de résidus de récolte; 3). Semer directement à travers cette couverture protectrice à l'aide d'outils appropriés et 4). Contrôler les mauvaises herbes sans perturbation du sol.

Le système non labour ne peut être durable que par la maîtrise de la propagation des mauvaises herbes (El Brahli et al., 1997). Les graines de mauvaises herbes enfouies ne sont pas exposées à la surface comme c'est le cas par le travail primaire.

Pour réussir la conduite du non-labour, il est essentiel de disposer de semoirs adaptés. Le semis est réalisé à l'aide d'un semoir spécial qui peut semer et déposer les engrais dans un sol non perturbé et couvert de résidus de récolte. (Mrabet, 2001).

## **Conclusion**

---

Il apparaît donc que les techniques de préparation du sol sont différenciées par plusieurs paramètres tel que, le retournement ou non du sol, la profondeur de travail, ainsi nombres et formes des machines utilisées.

Le mode de fragmentation et déformation de sol dépendent des états de sol (tels que la force de sol, l'humidité de sol et les ruptures ou les fissures préexistantes), et le type et la géométrie de l'instrument de labour.

Dans les systèmes labourés, la structure du sol est principalement créée par les opérations de travail du sol tandis que dans les systèmes non travaillés (semis direct) la structure est principalement créée par l'action du climat (en surface dans les régions tempérées) et par des processus biologiques. Il en résulte que la structure d'un sol labouré est extrêmement hétérogène. Elle est composée de l'assemblage de sol fin, de mottes compactées ou non (décimétriques), de résidus de cultures répartis le long de la bande de labour, de vides et de fissures issus de l'action de retournement, de déplacement et de fragmentation de la charrue sur la couche de sol labourée. A l'inverse, la structure d'un sol non travaillé est plus homogène et présente souvent une structure plus massive composée de macro-pore d'origine biologique. Les fissures et les vides sont en général moins importants dans les sols non travaillés et dans les systèmes de travail du sol réduit du type chisel.

Il serait cependant plus que nécessaire de s'intéresser à l'évolution de l'état structural du sol quand ces deux dernières techniques sont pratiquées. Après trois ou quatre campagnes, le sol présente un état structural tassé et parfois même très compact, donc le retour à la méthode conventionnelle devient impératif.

Le choix de la forme des surfaces actives pièces travaillantes est très important pour atteindre les objectifs de travail du sol. Un bon choix des pièces travaillantes permet de réaliser un travail optimal et de minimiser l'énergie de travail.

Pour cela une caractérisation géométrique des surfaces actives doit faire l'objet d'une préoccupation primordiale pour comprendre l'action des celle-ci dans le sol et le comportement du sol vis-à-vis de la pièce travaillante.

Et pourtant, le choix de l'une ou l'autre technique n'est pas sans conséquence, que ce soit sur le développement de la culture elle-même, sur la quantité totale d'azote qu'elle piégera (ou au contraire, dont elle sera à la base de la minéralisation) et en fin sur la réussite de la culture principale qui suivra. Ces différences de comportement sont amplifiées lors de conditions climatiques extrêmes, comme ce fût le cas durant les mois d'août et de septembre de l'année 2009, caractérisés par des précipitations particulièrement faibles.

## **Chap. 2 : Mode d'action des surfaces actives des pièces travaillantes sur le sol**

---



---

## Introduction

---

Chaque outil travaille le sol en combinant plusieurs actions mécaniques élémentaires dont les résultats sont très dépendants de l'humidité, au sein d'un sol de texture donnée et dans un état structural initiales donné.

La réaction mécanique du sol agricole aux sollicitations des outils de travail du sol est fortement conditionnée par les propriétés physiques de son état initial, d'où l'intérêt de les bien définir et prévoir l'incidence de leurs valeurs sur la structure mécanique : sol-outil.

L'effortEEE et besoins en énergie, basés sur le sol courant et les conditions de travail, sont considérés des paramètres importants pour la conception et la fabrication des instruments aratoires améliorés. Ainsi la quantification de ces paramètres en ce qui concerne différents modèles de déformation de sol rend nécessaire avoir la bonne connaissance de l'interaction sol-outil

### 2.1. Rappels sur quelques caractéristiques du sol

---

Le sol agricole est généralement caractérisé par son hétérogénéité et son anisotropie, ces deux caractères dépendent de la texture du sol.

#### Texture

La texture d'un sol désigne l'ensemble des propriétés qui résultent principalement de sa composition granulométrie, et aussi sa teneur en matière organique et en calcaire. La terre « fine » celle qui intéresse l'agriculteur, est caractérisée par des particules inférieures à 2mm.

La détermination de la texture du sol est très importante pour réalisation du travail du sol et la culture à mettre en place. Une texture argileuse lourde exige une énergie de travail très important que d'un sol léger ainsi que la surface active est subit une grande sollicitation et les contraintes de déformation sont très importantes. Alors que dans un sol sableux les pièces travaillantes subit des usures de type abrasif très important.

#### Structure

La structure du sol résulte de la façon dont sont associés les constituants élémentaires de la terre. Cette association aboutit à des éléments structuraux. Ceux-ci sont formés par les particules élémentaires du sol (M.O, Calcaire, Argile) agglomérées par un liant.

L'effet des différentes techniques de travail du sol sur la structure diffère selon le type de sol. Les sols sensibles aux tassements, comme les sols sableux, se prêtent moins à l'abandon du labour car leur faible activité structurale limite la régénération de la structure du sol par les phénomènes naturels de retrait-gonflement (Munkholm et al., 2003).

Le travail du sol affecte les propriétés structurales de sol comme le diamètre moyen de pores, la taille globale, la distribution de grandeurs globale, la porosité, la distribution de grandeurs de pore et le flux de l'eau de sol. L'ampleur de ce changement dépend de l'opération de travail du sol effectué. Pendant les opérations de travail du sol, la macrostructure de sol est habituellement changée et la taille globale moyenne peut être réduite en raison de la fragmentation répétée (Ojeniyi et Dexter., 1979 in Mutsa., 1995).

#### Humidité

L'humidité du sol influe directement sur le comportement et le conditionnement du sol au cours de l'opération de travail du sol. Pour beaucoup de sols, le coefficient de frottement augmente avec une augmentation en humidité jusqu'à une certaine valeur puis diminuent.

---

Kuiper et Kroesbergen, (1966) ont rapporté que la cohésion de sol est diminuée avec l'augmentation du contenu d'humidité de sol, Chancellor (1994) a noté que la cohésion du sol ( $c$ ) augmente avec l'humidité mais elle est maximum à un certain niveau intermédiaire. Elle est plus apparente en sol fin qu'en sol à grain grossier.

Le facteur le plus important qui influe sur la distribution globale de structure de sol pendant le travail du sol est le contenu d'humidité de sol au cours du labour (Lyles et Woodruff., 1962 in Mutsa C M., 1995).

- Force de cohésion

Elle est définie comme force interne de liaison du sol qui ne dépend pas de la force appliquée. Koolen et Kuipers (1983), autrement comme force de liaison entre les particules de sol par unité de surface. En effet, la propriété de sol est affectée par beaucoup de facteurs comprenant le type de sol, le contenu d'humidité, le nombre et le volume de pore. Dans la mécanique de sol, les sols argileux sont classés en tant que sols cohérents où les sols sableux sont déterminés en tant que sols incohérents ou de friction, donc un sol cohérent exige une énergie de travail très important alors que c'est le contraire pour le sol incohérent.

La cohésion de sol augmente avec l'augmentation de la densité en bloc de sol (Mulqueen et al 1977 ; Schmertmann 1975 ; Kuipers et Kroesbergen 1966 ; Smith 1964 ; Wes 1964). Ils ont exprimé que ce rapport dépend du type de sol et du contenu d'humidité. On a conclu que, les sols granuleux bruts (haute fraction de sable) ont une faible cohésion et un angle de friction plus élevée, par contre, les sols granuleux fin (fortement contenu d'argile) ont une valeur plus élevées de cohésion. (AshrafiZadeh., 2006).

De manière générale, les techniques de préparation du sol et plus particulièrement les labours, consistent donc à réduire la cohésion de la couche arable et à modifier sa porosité.

## **2.2. Principales sollicitations du sol**

---

### Traction

Durant l'opération de travail du sol, et sous l'effet des outils aratoires, tel que celle de corps de charrue à socs, le sol subit des transformations complexes et combinées dont les principales sont respectivement, le cisaillement et le début du soulèvement de la bande de terre par le soc, ensuite celle-ci est comprimée puis retournée par torsion par la courbure du versoir.

- Compression

Dans le cas de l'action des outils, Magnan, (1991) a rapporté qu'il ya deux modes de rupture ont été observés :

- les ruptures par glissement sur une surface.

- les ruptures par plastification et écoulement d'une masse de sol.

Ces deux ruptures sont respectivement appelées déformation par cisaillement et déformation par compression.

En effet, comme dans tout matériau, la bande de terre sollicitée par un outil aratoire, réagit par des déformations normales et tangentielles dues aux contraintes normales (compression) et tangentielles (cisaillement), réparties dans l'espace tel que montré sur la figure suivante :

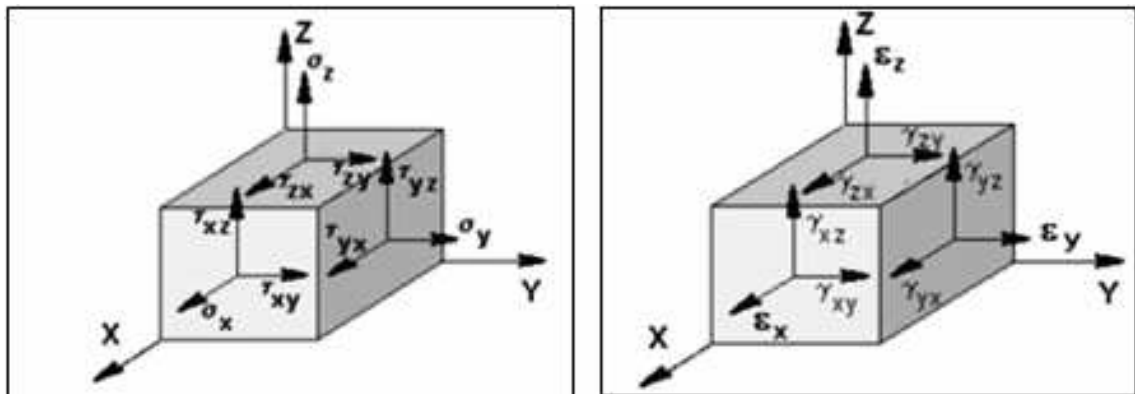


Figure 1 : Contraintes de déformation normales et tangentielles. (Amara., 2007).

Contrainte normale ( $\sigma$ ), contrainte tangentielle ( $\tau$ ) Déformation normale ( $\epsilon$ ), déformation tangentielle ( $\gamma$ )

La figure gauche représente la réaction de la bande de terre par des contraintes normales (compression) et tangentielle vis-à-vis à l'action de la surface active, la figure droite représente la déformation de celle-ci pendant l'opération de labour.

#### Cisaillement

Le découpage de sol comporte la déformation mécanique du sol, qui se produit habituellement en mode de cisaillement le long des surfaces internes de rupture dans le sol, et souvent à la frontière entre le sol et la surface d'outil de coupe (McKyes, 1985).

L'équation de Mohr-Coulomb est la méthode de caractéristiques d'effort sont la plus extensivement utilisé pour représenter l'état d'effort ou de contrainte à un point dans un corps de sol qui est déformée par le cisaillement. L'équation d coulomb (Coulomb, 1776 in Karmakar., 2005) est définie comme suit :

$$\tau_{\max} = c + \sigma_n \cdot \tan\phi$$

Avec:

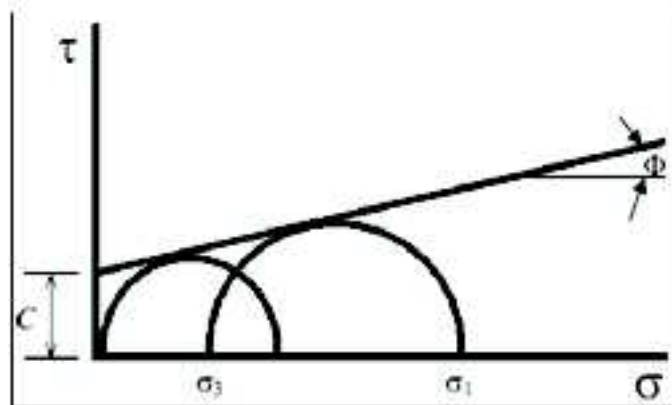
$\tau_{\max}$  = taux maximal de cisaillement (Pa).

$c$  = cohésion du sol (Pa).

$\sigma_n$  = contrainte normal (Pa).

$\phi$  = angle de frottement interne ( $^{\circ}$ ).

Cette relation est déterminée expérimentalement, elle est plus pratique pour l'analyse des contraintes dans le sol, cela nécessite cependant des appareils appropriés tel que le sharegraphe ou appareil triaxial.



**Figure 2** : Schématisation de la théorie de Mohr-coulomb (AshrafiZadeh., 2006).

D'après le schéma on constate que plus les contraintes normales augmentent avec l'angle de frottement interne plus le taux de cisaillement est élevé, ce qui correspond à un sol argileux lourd en condition moyennement sèche.

### 2.3. Interaction outil – sol

---

- Intérêt de cette étude

Il s'agit de la compréhension et de la prévision de la réaction du sol aux différentes actions mécaniques citées précédemment. Cela permettra de définir des critères du choix de la forme des outils aratoires à utiliser dans des conditions de sol et de climat données.

Pour étudier l'interaction sol-outil, il est important d'avoir une compréhension fondamentale de la déformation de sol et des facteurs affectant. La géométrie d'outil et les propriétés, les conditions de sol doivent être considérées dans toutes les études d'interaction sol-outil.

D'autre part, les propriétés comportementales décrivent la réaction d'un sol à un système de forces appliquées.

Un outil de travail du sol applique une force au sol et déplace le sol par changements de son état initial. Ainsi, pour décrire la réaction de sol aux outils de travail du sol, ses propriétés comportementales devraient être considérées.

Beaucoup d'expériences ont été entreprises pour étudier l'interaction sol-outil. Puisque les sols sont des matières composites et complexes, il n'est pas facile d'expliquer leurs comportements. Ils peuvent avoir les caractéristiques élastiques, plastiques, viscoélastiques, viscoplastiques, et élasto-plastiques.

Quelques chercheurs pensent que le sol agricole déforme par des mécanismes qui sont différents du cisaillement simple (Rajaram et Oida., 1992). Selon la forme d'outil et la condition de sol plusieurs combinaisons de cisaillement, recourbement, tension, compression, et écoulement de sol peuvent exister.

Pendant l'interaction outil -sol, les efforts complexes se développeront dans le sol, qui va au-dessus de la limite d'élasticité. Ils atteignent une valeur maximum dans la gamme de la déformation plastique de sol. Quand cet effort excède la résistance au cisaillement du sol, le cisaillement du sol se produit et une partie du sol glisse sur l'autre partie. La surface de rupture n'est pas d'une manière satisfaisante encore définie, mais on sait que le modèle de déformation est successivement produit en avant de l'outil de travail du sol. La surface

initiale de déformation est soudainement créée avec le déplacement vertical de sol vers le haut, propageant des fissures dans la masse de sol qui peut se prolonger à la surface de sol. Le corps d'outil peut causer des déformations secondaires dans la masse de sol déjà déformé.

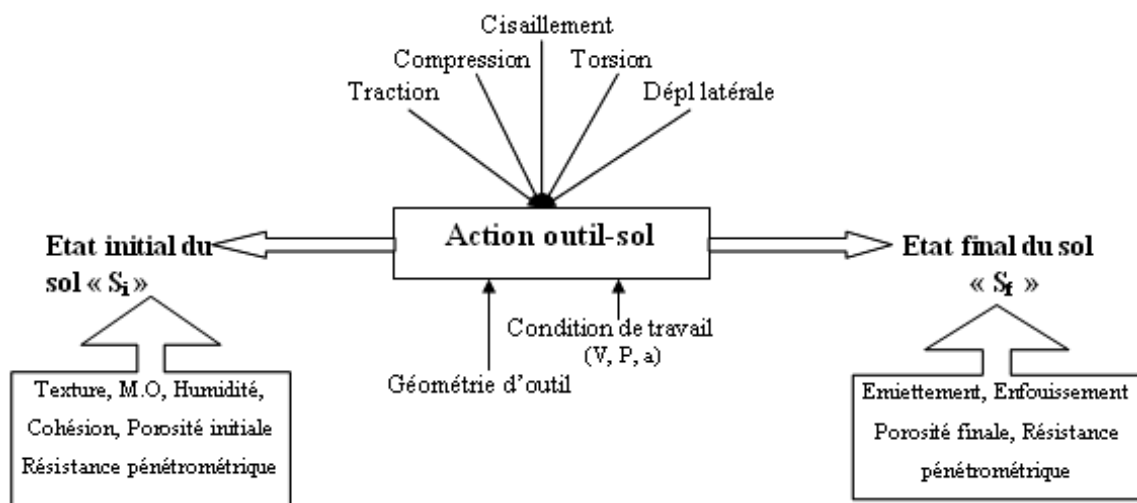
- Déformation du sol

Dans les opérations de travail du sol, les surfaces de frontière se développent entre les corps adjacents de sol et également dans le sol et la surface d'outil de travail du sol. En général, il y a effort agissant à travers l'élément de surface entre deux corps. Le composant tangentiel de l'effort est l'effort de cisaillement dû au frottement à l'élément de surface (Koolen et Kuiper, 1983). Si un petit effort de cisaillement est appliqué, un petit mouvement relatif se produira. L'application d'un plus grand effort de cisaillement lance un mouvement relatif qui continue.

- Forme d'outil

La forme des outils influe sur la distribution d'effort dans le sol qui est un facteur important dans le procédé de travail du sol. Ainsi, il détermine le chemin de l'écoulement des particules de sol. Selon la forme d'outil et l'état de sol, l'outil peut glisser dans le sol comme un couteau sans collant à sa surface. Le frottement sol-métal devient un facteur principal en décrivant l'interaction sol-outil. (Sharifat., 1999).

Afin d'illustrer et localiser tous les facteurs mis en jeu dans la description du processus de l'action d'un outil aratoire sur le sol, nous reproduisons ci-dessous un schéma explicatif de ce phénomène mécanique.



**Figure 3** : Schéma synoptique montrant tous les facteurs influençant l'interaction entre l'outil aratoire et le sol. (Source : Ros V et al., 1995).

## Conclusion

La connaissance des caractéristiques physico-mécaniques du sol au moment de l'intervention mécanique est donc un élément de base pour la compréhension du mode d'action d'un outil aratoire. Cela permettra de prévoir correctement l'état structural final du sol par un choix judicieux de la forme des outils aratoires et surtout des versoirs des corps de charrue à socs à utiliser.

Le mode d'action d'un outil sur le sol ainsi que l'effort nécessaire à cette action sont conditionnées par la forme géométrique de sa surface active ainsi que des conditions de travail comme la vitesse d'avancement et l'état initial du sol.

L'étude de la relation outil-sol et les caractéristiques physico-mécaniques du sol sont permises de comprendre le mode d'action de la surface active et par conséquent, de faire un bon choix de la forme de la surface active, ainsi que elle est très utile pour la conception des surfaces actives des pièces travaillantes minimisant l'effort de traction et résistantes aux usures.

## **Chap. 3: Critères du choix des pièces travaillantes des outils aratoires**

### **Introduction**

---

Les outils sont définis comme étant les moyens d'atteindre des objectifs précis, en tenant compte des contraintes particulières. Leur choix est très important vu l'actuel contexte économique qui est devenu de plus en plus difficile.

En effet, la nécessité de réduire les coûts de production ne concerne pas uniquement le choix des formes et quantités d'engrais et de pesticides, elle s'étend à l'ensemble de l'itinéraire technique et des moyens qui sont utilisés pour le conduire. Pour mieux comprendre et optimiser l'utilisation de ces outils aratoires nous nous intéresserons à une description des conditions de travail et les exigences des cultures (système racinaire).

### **3.1. Les conditions de sol**

---

Les conditions de travail sont définies comme étant le milieu ou l'environnement de fonctionnement de la pièce travaillante, qui sont définis principalement par : l'humidité du sol, la texture et la structure du sol.

#### **3.1.1. Le sol**

Le sol étant le milieu d'intervention et d'action des outils aratoires, la maîtrise de ses propriétés physico-mécaniques est plus que nécessaire pour toutes études des outils aratoires. Il est le facteur et/ou le critère le plus important dans le choix de la forme de la pièce travaillante, lors des opérations de préparation du sol. L'influence de ce paramètre est très significative pour atteindre les objectifs recherchés par l'agriculteur, puisque le sol est le support de la machine, de l'homme et de la plante. Le sol est défini par ces propriétés physiques, mécaniques, chimiques et biologiques telles que la texture, la structure, et l'état du sol (humidité, compactage).

Selon AshrafiZadeh (2006) la force exigée pour cisailer le sol est fonction des états du sol, des caractéristiques d'outil, et des paramètres de travail utilisés pendant l'opération de travail du sol. Naderloo et al (2009) rapporte aussi que la profondeur de travail, la texture et la teneur en eau du sol sont des paramètres importants qui ont un effet sur l'effort de traction.

##### **3.1.1.1. La texture**

La texture est la composition granulométriques contenue dans un sol, elle conditionne d'une manière importante la résistance à la traction des instruments aratoires.

Les travaux de Binesse (1997), présentent une comparaison de deux types de sols de textures différentes, la première argileuse et la deuxième limoneuse (ces deux sols sont dans les mêmes conditions). Cette étude comparative montre qu'il existe une différence d'exigence d'énergie entre les deux types de sols et que les sols argileux demandent une plus grande quantité d'énergie pour être travaillé.

Les résultats des travaux de Amara et al., (2006) dont les essais ont été réalisé sur un sol de texture sableux ont montré que le rendement est influencé par la résistance spécifique du sol et ont constaté que l'utilisation de la charrue à socs donne le rendement le plus faible du blé, car le sol est de texture légère et ne nécessite pas l'utilisation d'une charrue à socs .

Par ailleurs Harrad et Mezioud, (1998) confirment que la force de traction varie avec le type de sol. En effet les sols dits légers (texture sablonneuse) sont moins exigeants que les sols lourds ou à forte cohésion.

Perdok et Werken (1982) ont étudié le besoin en énergie de différents instruments de travail du sol sur différentes textures. Ces résultats sont représentés dans le tableau suivant :

L'instrument aratoire	Type de sol				
	Sable	Sablo-Limoneux	Limons	Limono-Argileux	Argile lourde
Charrue à socs	30 ± 5	40 ± 5	60 ± 8	80 ± 10	120 ± 20
Chisel	20 ± 4	27 ± 4	40 ± 6	55 ± 7	80 ± 10
Cultivateur	18 ± 3	24 ± 4	36 ± 5	48 ± 6	65 ± 8
Herse à disque	18 ± 3	22 ± 4	30 ± 4	40 ± 5	55 ± 7
Rotovateur	150 ± 15	75 ± 20	210 ± 25	250 ± 30	320 ± 40
Herse oscillateur	45 ± 8	60 ± 10	88 ± 12	118 ± 15	175 ± 20
Herse animé	120 ± 10	50 ± 15	165 ± 20	90 ± 25	250 ± 30

**Tableau 1** : Le travail spécifique ( $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ) pour les principaux instruments de travail du sol dans plusieurs types du sol.

**Source:** (Perdok et Werken 1982).

D'après le tableau (1) nous constatons que les besoins d'énergie varient en fonction de la texture du sol et le type d'outil de travail utilisé. Ainsi le besoin d'énergie est plus important dans le sol argileux que dans le sol sableux. Concernant la machine, les outils animés par la prise de force sont beaucoup plus consommateurs en matière d'énergie par contre, les outils à dents simples sont moins consommateurs d'énergie par rapport aux autres.

Donc, en fonction de la composition textural du sol et de la teneur en eau, le choix de l'outil à utiliser pour la réalisation de travail du sol sera : la charrue à socs pour les sols lourds et moyens, tandis que les outils à dents peuvent être utilisés sur des sols légers. (Amara., 2007).

### 3.1.1.2. La structure

La structure du sol a deux états, l'un initial avant le travail du sol et l'autre final après l'opération de travail. Sur le plan physique, la structure de sol est déterminée par un système poreux (porosité structurale) caractérisé par un arrangement des agrégats et une masse volumique apparente.

Pour les nouvelles techniques de préparation du sol, comme le semis direct et les techniques simplifiées, la structure du sol après le passage des machines, a généralement une densité apparente élevée par rapport au sol travaillé avec les méthodes classiques (charrue à socs). Les sols ayant une densité apparente élevée possèdent moins de pores ou d'espaces vides, ce qui donne un mauvais développement du système racinaire, ainsi une mauvaise infiltration de l'eau entraînant et par conséquent une faiblesse de réserve en eau, ce qui n'est pas sans conséquences sur le développement de la culture et surtout sur les efforts exigés pour régénérer la structure après quelques années.

Les sols sont généralement tassés sous l'effet de passage des instruments agricoles utilisés pour les traitements et les récoltes. Ce tassement rend le sol compact et difficile à travailler, ce qui nécessite la pratique des opérations de travail du sol après chaque campagne agricole pour corriger la structure. Cette situation de sol demande l'utilisation des outils bien conçus pour permettre une bonne régénération de la structure (création d'un bon lit de semence), afin de conférer à la plante un milieu adéquat à son développement. Le degré d'affinement du sol pourra varier toutefois selon la stabilité structurale de la terre et le degré de tassement qu'on souhaite lui donner (Dalleine., 1977).

On obtient un bon lit de semence pour la semence de petites graines lorsque, plus de 50% d'agrégats ont moins de 5 millimètres. Quand la structure du sol est très fragile, des dents ou des socs larges peuvent être d'avantageux pour l'obtention d'une terre fine, que des dents plus étroites. (Keller et Arvidsson., 2010)

### 3.1.1.3. Humidité du sol

L'humidité du sol est l'un des facteurs le plus important pour la réalisation des opérations de travail du sol, car il influe directement sur la déformation de sol, d'où l'intérêt de son choix au moment d'intervention. La teneur en eau du sol a également un effet certain sur la valeur de l'effort de résistance à la traction.

L'humidité et la texture de sol affectent sur le comportement et la force mécanique du sol. Les sols qui ont les mêmes conditions mécaniques, environnementales mais, ont une texture différente se comportent différemment à l'instar des outils aratoires.

selon AshrafiZadeh (2006) a rapporté que les paramètres de résistance au cisaillement des sols granuleux fins diminuent avec l'augmentation de l'humidité. Cependant, la densité du sol diminue avec l'augmentation de l'humidité.

La fragmentation de sol par le labour est considérablement influencée par la teneur en eau du sol c'est-à-dire si le sol est trop humide lors de labour, la structure peut être endommagée, alors que si le sol est labouré dans des conditions très sèches, il exige de grandes quantités d'énergie et produit des grandes mottes. Pour cela, il est important d'effectuer des opérations de travail du sol à l'état optimal d'humidité de sol (Dexter et Bird, 2001).

Le schéma suivant (fig.4) permet d'exprimer l'état du sol par rapport à la réaction prévue pendant le travail et de quantifier sa consistance (Hoogmoed., 1999).



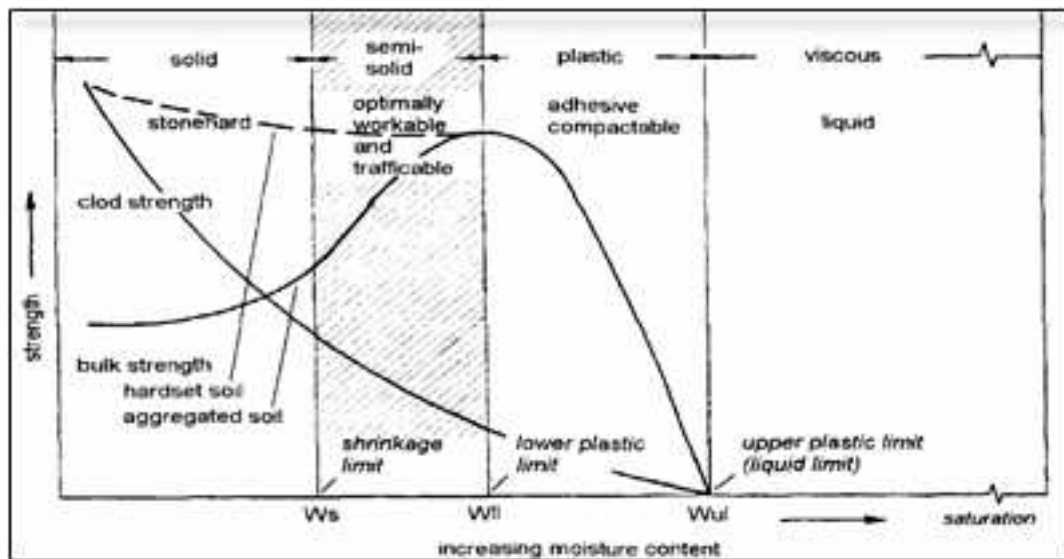


Fig.4. Limites de consistance et intervalle de travail optimal en fonction du contenu d'humidité.

$W_s$ ,  $W_{pl}$  et le  $W_{ul}$  des valeurs sur l'axe X sont respectivement: teneur en eau au pf, à la limite Plastique inférieure et à la limite de plasticité supérieure.

La caractérisation du sol en différents états fonction de la teneur en eau permet d'indiquer ou de choisir le moment d'intervention avec les outils aratoires. Un état favorable pour l'intervention mécanique est défini quand le sol peut être déformé sans gâchis ou destruction de la structure ou bien quand l'énergie demandée pour cette transformation d'un état à un autre n'est pas trop élevée. L'humidité optimale pour le labour ( $w_{opt}$ ) a été définie comme la teneur en eau à laquelle la production de petits agrégats est plus grande, ainsi la production de grands agrégats (grosses mottes) est petite (Dexter et Bird., 2001), et la surface spécifique des agrégats produite est plus large (Keller et al., 2007).

Selon Keller et Arvidsson (2010), l'explication physique pour l'existence d'une teneur optimum de l'eau de sol pour le labour est basée sur l'hypothèse que la fragmentation de sol due au labour se produit par une propagation des fissures préalables (devant le soc).

D'après tous ces constats, On constate que l'humidité du sol au moment des interventions est déterminante, en interaction avec le type de sol et d'équipement pneumatique. Nous concluons ainsi que, dans des conditions de sol très compact et sec on utilise une sous-soleuse ou décompacteur pour fissurer le sol. Lorsque le sol est légèrement compact et sec on utilise le chisel qui est mieux adapté à la largeur et à la vitesse de travail.

Par contre dans des conditions humides du sol et en présence de couvert végétal on utilise la charrue à soc pour obtenir un meilleur enfouissement de débris végétaux et un bon émiettement de la terre.

### 3.2. Les conditions de travail

Les conditions de travail, l'état initial du sol, la profondeur et la largeur de travail, vitesse d'avancement, le moment d'intervention, le type et la forme des machines utilisés, sont d'autant de paramètres à prendre en considération pour la réussite de toutes opérations culturales.

### **3.2.1. L'état initial du sol**

Le tassement du sol peut être provoqué par les machines agricoles lourdes, ou par l'action des outils de labour, si le même outil est utilisé à la même profondeur de travail dans les opérations successives. Trousse (1985) et Guérif (1994) *in* Amara (2007) ont mis en évidence que la semelle de labour est induite par les passages répétés successivement de la charrue et des roues de tracteur en conditions humides.

Les semelles de labour limitent la croissance verticale de racines, ce qui réduit l'extraction de l'eau et des éléments nutritifs des couches plus profondes et par ceci une réduction du rendement des cultures. Dans ces conditions, la sous-soleuse et les outils à dents sont généralement utilisés pour détruire les semelles de labours et pour fournir des voies pour que l'eau et les racines pénètrent dans le sous-sol.

### **3.2.2. La profondeur et largeur de travail**

La profondeur et la largeur de la coupe, forme d'outil (tranchants y compris), arrangement d'outil, et la vitesse de travail sont des facteurs qui peuvent affecter l'effort et l'efficacité d'utilisation d'énergie pour un état spécifique de sol. Les effets de ces paramètres changent avec différents types d'instruments et avec différents états de sol (Kepner et al., 1972). Les facteurs tels que la texture du sol, l'humidité de sol, tassement de sol, la géométrie de l'outil, profondeur de travail, la vitesse d'avancement, et l'angle de support d'outil affectent évidemment le besoin en énergie d'une opération de travail du sol (AshrafiZadeh., 2006).

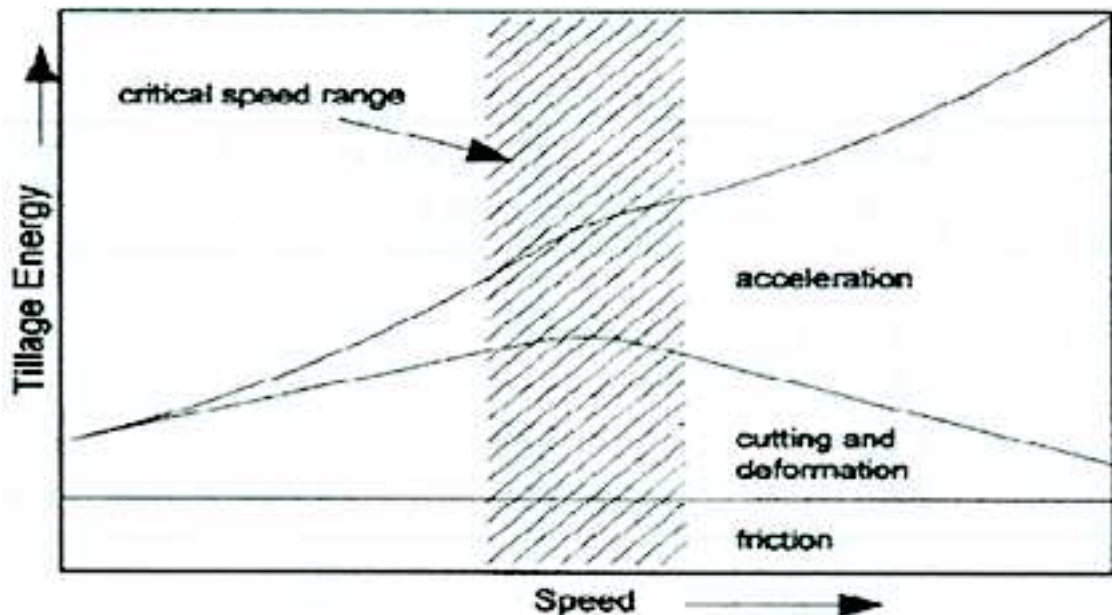
La profondeur de travail dépend du type de culture (système racinaire), par exemple la culture de pomme de terre ou de betterave elles ont un système racinaire évoluent qui exigent beaucoup d'émiettement et d'enfouissement des débris végétaux en profondeur (travail profond avec la charrue plus une reprise du labour). (Spoor et Godwin., 1978).

### **3.2.3. La vitesse de travail**

La vitesse d'avancement est un paramètre qui influe sur l'effort de résistance à la traction, les résultats des travaux de Delacotte (1981) rapportent que l'effort de résistance à la traction est diminué avec l'augmentation de la vitesse de travail. Il y a eu aussi les travaux de Leonard et al, (1985) *in* Benchabla, (2004) qui montrent que l'effort de résistance à la traction dans le cas d'une reprise de labour diminue avec l'augmentation de la vitesse d'avancement, et passe d'une valeur de 1380 daN pour une vitesse de 6.5 Km/h à 880 daN pour une vitesse de 9 Km/h. Ceux-ci pourraient s'expliquer par une étude dynamique. En effet l'augmentation de la vitesse entraîne une ouverture du sol devant la pièce travaillante, ce qui explique la diminution de l'effort de traction ; ceci est évidemment valable pour les outils à dents, comme le chisel et cultivateur, dans un sol sec qui éclate devant le soc. Dans le cas d'un sol humide l'effort augmentera avec la vitesse car il y aura une accumulation de la terre sur la pièce travaillante. Les meilleurs outils adaptés à une vitesse élevée et une grande largeur de travail sont le chisel et les outils de reprises du labour.

Kushwaha et Linke (1996) ont édité un graphique d'énergie de travail du sol en fonction de la vitesse d'outil qui présente l'influence de la vitesse sur ces composants d'énergie (Fig. 5). Comme représenté sur la figure 4, les valeurs d'énergie de coupure et de déformation chutent après une gamme critique de vitesse, énergie de friction reste constante, et l'énergie d'accélération continue d'augmenter après la gamme critique de la vitesse. La gamme critique de la vitesse a été estimée entre 3 et 5 m/s. Puisque l'énergie totale de travail du sol est l'addition de ces composants d'énergie, on a conclu que le besoin en énergie augmente

au-dessus de la gamme critique de la vitesse et devient moins important au-dessous de celle-ci.



*Fig.5 : Illustration schématique montrant l'influence de la vitesse de travail sur composants d'énergie de travail du sol (Kushwaha et Linke., 1996).*

### 3.3. Les exigences des cultures

Les façons culturales ont une influence profonde sur la forme et le développement des racines puisqu'elles touchent de nombreux aspects de l'environnement racinaire, à savoir : l'humidité, la température du sol, l'espace entre les pores et la concentration en oxygène, la répartition de la matière organique, la mobilisation des substances nutritives et la configuration physique des sols en surface.

Ces effets varient suivant la technique employée, la nature des caractéristiques défavorables des sols et les caractéristiques des cultures (Van Lerberghe., 1999).

Les racines jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement et donc dans la production des plantes. C'est grâce à elles que se fait l'approvisionnement en eau et en éléments minéraux de celle-ci. Or les racines croissent dans un milieu contraignant avec une résistance à la pénétration variable mais souvent élevée, en particulier dans les milieux secs et peu structurés des régions sèches. Un bon développement racinaire des cultures est un facteur essentiel de leur productivité et surtout de leur tolérance aux aléas, en particulier climatique (Maertens., 1964 ; Chopart et Nicou, 1976 cité in Amara., 2007).

Un des rôles essentiels du travail du sol est de faciliter la croissance des racines dans ce milieu contraignant. Pour cela, il permet souvent de diminuer la résistance du sol à la pénétration des racines à travers une amélioration de sa structure et parfois de son humidité. Il améliore aussi l'aération du sol, facilitant les échanges gazeux au niveau de la racine. Le système racinaire devrait donc être un critère important d'évaluation, par les agronomes et les agriculteurs, de la nécessité ou non d'une amélioration des caractéristiques physiques du profil cultural par le travail du sol, puis après réalisation, de l'efficacité de celle-ci.

Les résultats des travaux de Taylor et *al* (1966) in Mckyes, (1985) indiquent que, le nombre de racines de la plante de coton pénétrant le sol a été réduit rigoureusement pendant que la résistance de pénétration approchait la pression de 2 MPa. En fait, aux sols compacts à la résistance plus de 2 MPa, pratiquement aucune racine ne pouvait se développer.

## **Conclusion**

---

Cette analyse nous montre que les paramètres du sol et les conditions de travail sont les principaux critères de base sur le choix des pièces travaillantes des outils aratoires. De ce fait, la connaissance en détail ces deux paramètres nous permettent d'utiliser notre matériel en condition optimale pour avoir une meilleure efficacité de travail des outils, ainsi que présentent un intérêt dans le domaine de la conception et la fabrication des outils aratoires améliorés. Ces paramètres influent indirectement sur l'énergie, la qualité de travail du sol et le rendement de la culture. Ainsi la quantification de ces paramètres rend nécessaire pour avoir la bonne connaissance de l'interaction sol-outil.

# **Chap. 4: Caractéristiques géométriques des surfaces actives des corps de charrue.**

## **Introduction**

---

Les outils sont définis comme étant les moyens d'atteindre des objectifs précis, en tenant compte des contraintes particulières. Leur choix est très important vu l'actuel contexte économique qui est devenu de plus en plus difficile.

En effet, la nécessité de réduire le coût de production ne concerne pas uniquement le choix des formes et quantités d'engrais et de pesticides, elle s'étend à l'ensemble de l'itinéraire technique et des moyens qui sont utilisés pour le conduire. Pour mieux comprendre et optimiser l'utilisation de ces outils aratoires nous nous intéresserons à une description des pièces travaillantes en insistant sur les caractéristiques géométriques.

Dans ce chapitre nous allons aborder les caractéristiques géométriques d'un outil de travail profond qui ont des surfaces actives complexes.

### **4.1. Caractéristiques géométriques d'un corps de charrue à socs**

---

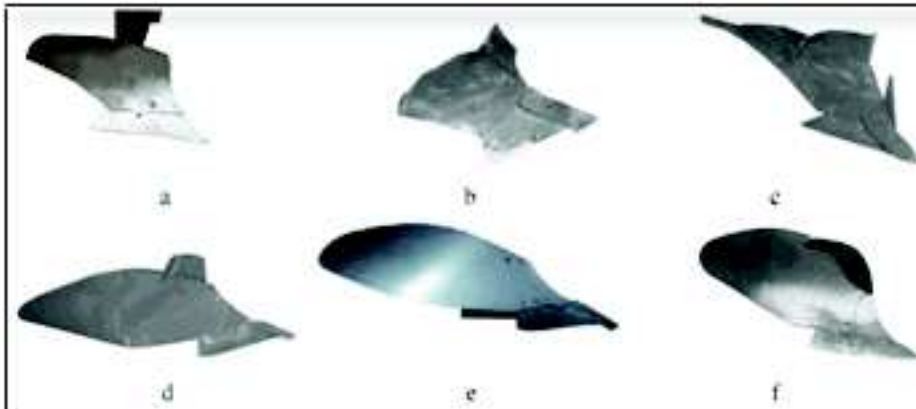
La surface active du corps de charrue est composée de deux parties, le soc et le versoir. Le soc il a une forme de surface plane, par contre le versoir il a une forme spatiale avec géométrie complexe (cylindroïde, cylindro-hélicoïdale ou mixte et hélicoïdale).

Le rôle essentiel de la charrue à soc est le soulèvement du sol, le déplacement latéral et le retournement du sol, d'où l'intérêt de l'analyse de la forme de sa surface active, ces surfaces actives sont dites surfaces gauches car elles n'ont pas de symétrie contrairement aux surfaces qualifiées de simples. (Amara., 2007).

Un corps de charrue à socs est défini par les dimensions (largeur, longueur, hauteur, épaisseur) et les angles constructifs de travail.

#### 4.1.1. La forme générale

- Les corps cylindriques sont géométriquement les plus simples. Le rayon de courbure de la surface cylindrique peut varier légèrement entre l'une et l'autre extrémité du corps. Cette orientation est différente selon la vocation du corps, par exemple le défonceur ou le déchaumage. Ces versoirs sont en principe bien adaptés à la réalisation de labour dressés et profonds.
- Les corps hélicoïdaux, vus de dessus, leur contour offre sous un angle donné, un rétrécissement central important. Les surfaces dites hélicoïdales apparaissent plus au moins rabattues vers les bandes labourées dont elles complètent le retournement. On rencontre cette forme sur des sols lourds avec une couverture végétale importante. (Amara., 1983).
- Les corps universels sont fortement contournés, mais conservant une portion antérieure de leur surface nettement cylindrique. il convient le plus souvent aux sols légers et moyens. (Dalleine., 1977).



**Fig.6** : Différentes formes du corps de charrue à versoir. (Vilde., 2008).

(a) versoir universel court. (b) et (c) versoir semi-hélicoïdale long. (d) versoir cylindrique. (e) versoir hélicoïdale. (f) versoir universel.

Les formes ainsi définies peuvent se présenter sous divers angles, par rapport à la surface du sol comme par rapport au sens de l'avancement. Les principaux angles de la charrue sont :

#### 4.1.2. Les angles

- A. Les angles du soc :
  - Angle d'entrure

C'est l'angle qui est responsable de la pénétration du soc dans le sol. Il est compris entre 20° à 25° par rapport au plan horizontal. Il est aussi appelé angle de piquage, parfois réglable selon le constructeur.

- Angle de coupe

L'angle de coupe ou l'angle d'attaque, détermine la largeur de labour et permet de découpage du sol. Il varie entre 30° à 40° selon la forme du versoir.

- B. Les angles du versoir :
  - Angle moyen de versoir

C'est l'angle du versoir délimité par la muraille et la droite qui joint l'extrémité du soc à celle du versoir. Il se traduit par une longueur d'accompagnement de la bande de terre pendant son retournement. Il varie de  $22^\circ$  à  $28^\circ$  pour les corps hélicoïdaux et de  $30^\circ$  à  $35^\circ$  pour les corps cylindriques et mixtes.

- Angle de bord supérieur de versoir

C'est l'angle aigu formé entre le plan vertical par le bord supérieur du versoir et le plan de la muraille. Il détermine le dégagement plus ou moins important de la raie de labour.

- Angle du bord inférieur

Détermine la trajectoire de la partie inférieure de la bande de terre.

- Angle du bord latéral inférieur ou angle de fuite

Il forme un dégagement évitant le bourrage latéral.

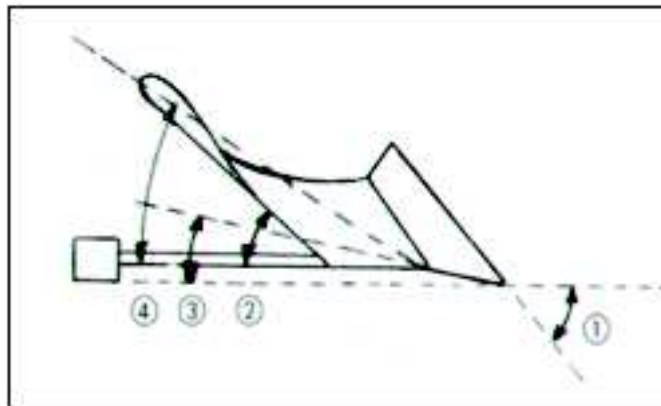
- C. Les angles de l'ensemble du corps :

- Angle de montée de terre

C'est l'angle moyen formé entre le plan du fond de raie et la trajectoire de la partie supérieure de la bande de terre le long du versoir. Il atteint environ  $30^\circ$  pour le versoir hélicoïdal et  $40^\circ$  pour les versoirs mixtes.

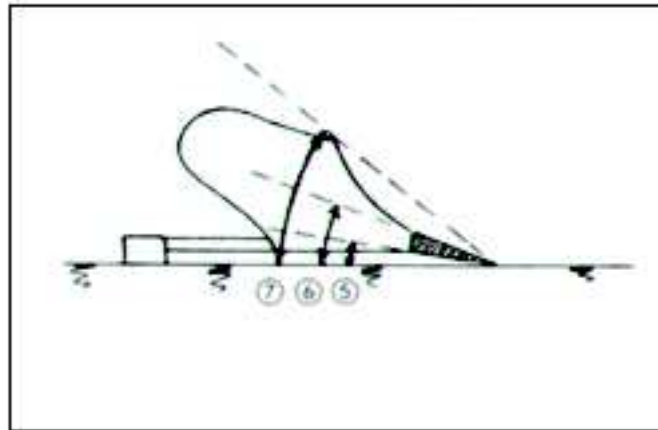
- Angle général du corps de charrue

Formé dans le plan perpendiculaire au plan du sep par le plan du soc et le plan horizontal ( $25^\circ$  à  $30^\circ$ ), il amorce le basculement de la bande de terre.



**Fig.7** : Les angles caractéristiques du corps de charrue à soc. (Lerat P., 1999)

1- Angle d'attaque ou de coupe 2- Angle du bord supérieur 3- Angle général du corps de charrue 4- Angle moyen du versoir



5- Angle d'inclinaison 6- Angle d'entrure 7- Angle de montée de la terre

Ces angles ont une influence sur l'émiettement de la terre : plus leur valeur est grande, plus les contraintes appliquées à sa surface active sont grandes. Lorsqu'ils sont plus faibles, ces angles tendent à réduire l'effort de traction et permettent un labour rapide.

Pour un même objectif d'émiettement, l'utilisation de corps avec des angles plus faibles permet d'accroître la vitesse de labour. Les résultats obtenus en fonction des angles caractéristiques des corps sont très dépendants de la texture, de l'humidité et de l'état initial du sol.

Type de versoir	Angle d'attaque	Angle d'entrure	Angle de courbure
Forme cylindrique	22 – 20°	15 – 20°	40 – 50°
Forme cylindro-hélicoïdale	22 – 28°	14 – 18°	35 – 45°
Forme hélicoïdale	20 – 25°	12 – 15°	30 – 35°

**Tab.2 :** Valeurs des angles initiaux pour différentes formes de versoirs.

Source : Binesse, (1970).

#### 4.1.3. Les longueurs générales (Dimensions)

Les formes des versoirs sont très nombreuses et complexes, afin de les distinguer les unes des autres, l'analyse des dimensions (longueurs) est nécessaire.

Ces dimensions sont à rappeler car elles jouent un rôle sur la taille des mottes obtenues lors des labours, ce qui n'est pas sans effet sur la suite des opérations culturales (pseudo-labours et travaux superficiels) ainsi que sur la stabilité structurale du sol. Ces dimensions sont également nécessaires pour la projection et la conception des corps de charrue à socs.

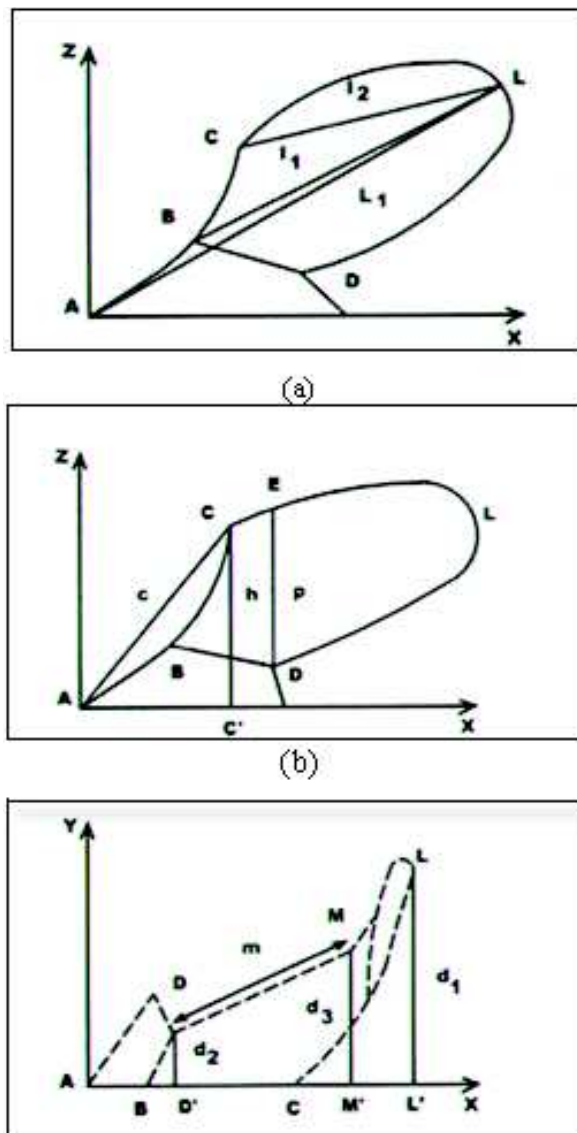
Deux corps de charrues à socs peuvent avoir la même hauteur, la même largeur de travail et la même longueur entre la pointe du soc et l'extrémité du versoir sans pour autant avoir la même forme de la surface active.(Amara., 2007).

Pour cela d'autres dimensions sont à mettre en évidence, parmi elles nous avons :

- L = AL : Longueur maximale de corps,
- l<sub>1</sub> = BL : La plus grande longueur du versoir,

- $l_2 = CL$  : Longueur de bord supérieur du versoir,
- $m = DM$  : Largeur de bord inférieur jusqu'au point de courbure maximale,
- $h = CC'$  : Hauteur de chute du point C jusqu'au fond de labour d  $C'$ ,
- $c = AC$  : Distance entre la pointe de soc et le point d'inflexion C,
- $d_1 = LL'$  : Largeur arrière du versoir,
- $d_2 = DD'$  : Largeur de gorge du corps de la charrue ou largeur minimale,
- $d_3 = MM'$  : Largeur de versoir au point de courbure maximale.

Ces différentes longueurs ou dimensions sont illustrées sur la figure suivante :



**Fig.8** : Caractéristiques dimensionnelles d'un corps de charrue à socs

(a) vues de profil pour les longueurs, (b) vue de profil pour les hauteurs et (c) vue de dessus pour les largeurs. (Amara., 2007).

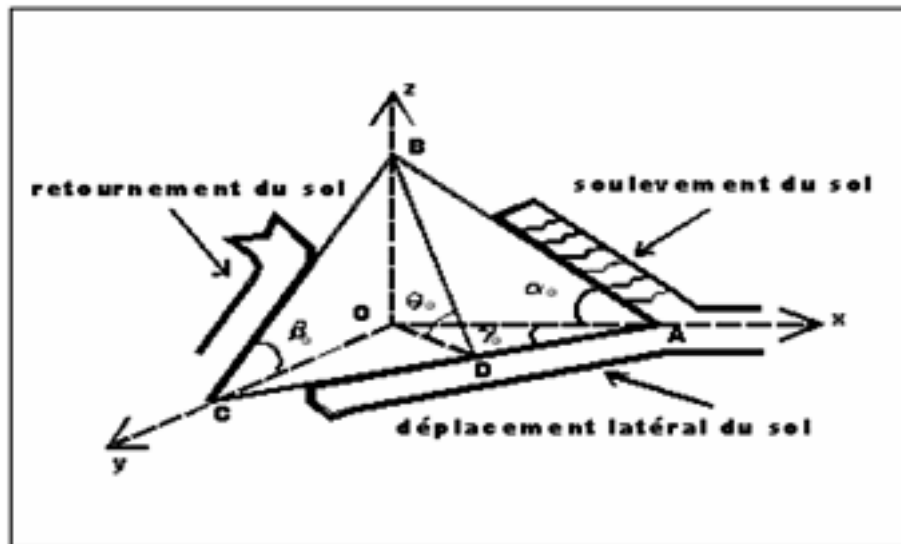
La hauteur maximale du versoir au dessus du sol, ou celle du point de départ du bord supérieur, est intéressante à connaître pour juger de l'adaptation du corps de charrue aux



labours profonds. Bien entendu, il convient de tenir compte de la découpe qui peut élever, de quelques centimètres, la hauteur du point de départ du bord supérieur. (Dalleine., 1977).

#### 4.1.4. Schématisation du mode d'action d'un corps de charrue à soc

Afin de comprendre le mode d'action de la surface active d'un corps de charrue à socs sur le sol, cet outils est assimilé à une clavette tétraédrique composée de trois clavettes simples caractérisées chacune par un angle bien défini, ce qui est illustré par les figures suivantes.

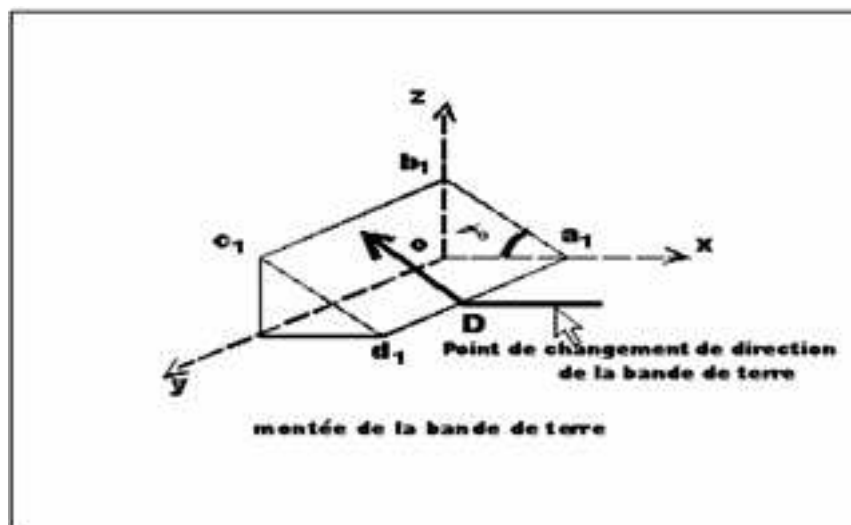


**Fig.9** : Tétraèdre simulant l'action du corps de charrue à soc. (Sandru., 1975).

La forme générale du tétraèdre de la figure précédente montre le comportement théorique du sol sous l'action d'un corps de charrue à socs à savoir le soulèvement, le déplacement latéral et le retournement du sol, ainsi que les angles constructifs initiaux.

Ce tétraèdre est décomposé comme suit :

La première clavette (fig. 10) met évidence l'angle d'entrure ( $\alpha$ ), qui permet le soulèvement de la bande de terre, cette clavette correspond au soc du corps de charrue.



**Fig.10** : Clavette illustrant le soulèvement de la bande de terre.

La deuxième clavette (fig. 11) schématise le déplacement latéral de la bande de terre et délimite l'angle d'attaque ( $\gamma$ ).

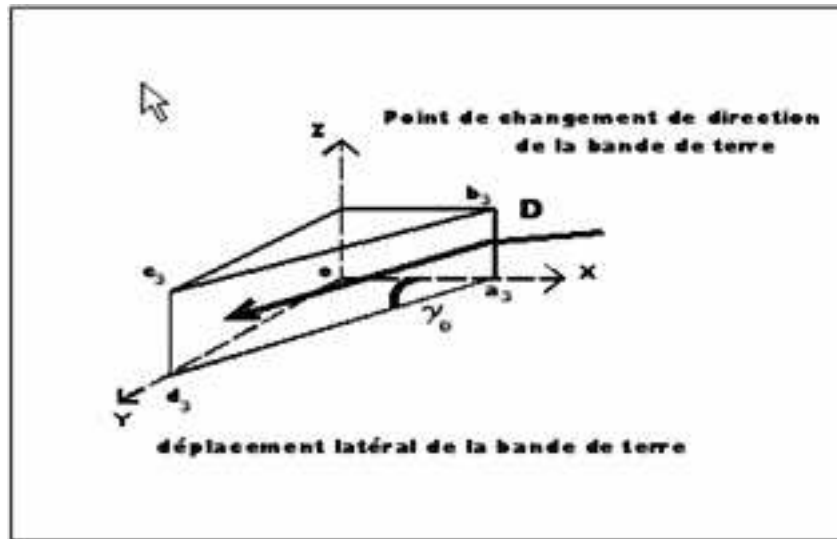


Fig.11: Clavette illustrant le déplacement latéral du sol.

La troisième clavette (fig. 12) fait ressortir le retournement ou le renversement de la bande de terre et met en évidence l'angle de retournement de la bande de terre ( $\theta$ ). Cet angle est également appelé l'angle d'inclinaison du versoir.

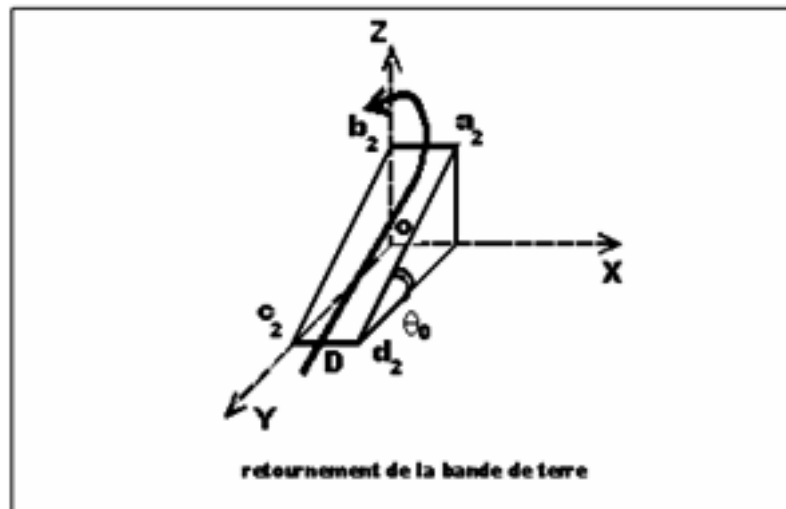


Fig.12 : Clavette illustrant le retournement de la bande de terre. (Sandru., 1975).

#### 4.1.5. Remarques sur un mauvais réglage de la charrue

La plupart des agriculteurs ignorent les conséquences et l'influence du réglage inapproprié des charrues sur la qualité de travail et le coût de réalisation des opérations de travail du sol. Les erreurs de réglages sont généralement à l'origine de dénivèlement du sol, c'est-à-dire inégalité de sillons, qui est plus difficile à effacer par les façons ultérieures.

Un mauvais aplomb transversal fait jumeler la charrue: certains corps prennent plus profond que l'autres et laissent un relief plus accusé et le profil obtenu seront différents.

Une charrue qui piquerait quelque peu vers l'avant, par suite d'une réduction de longueur du troisième point par exemple, aurait tendance à dresser les mottes et à accroître le nombre de crevasses et le microrelief le long de la bande labourée ; par contre, le sol se trouverait davantage émietté.

Un mauvais devers de pointe, une position inadaptée par rapport à la tête de la charrue, ou une longueur de voie du tracteur qui ne conviendrait pas, laissent une première bande labourée plus large ou plus étroite que les autres, avec un relief différent du reste du labour.

L'accroissement de la profondeur de travail au-delà d'une certaine limite, variable selon les corps de charrue, tend, lui aussi, à accroître la quantité de terre fine produite. Par contre, l'accroissement de la largeur de travail de chaque corps favorise les mottes de plus grande dimension et par conséquent une consommation excessive d'énergie.

## 4.2. Conception et fabrication des surfaces actives

La surface active subit des contraintes de déformations très importantes lors de son évolution dans le sol. La principale contrainte, est l'usure sol-métal, c'est pour cette raison les différentes opérations effectuées dans la fabrication des pièces travaillantes portera principalement sur le matériau choisi à cette fin, ainsi que les traitements thermiques qui conditionnent de la manière primordiale la dureté des pièces travaillantes donc la résistance à l'usure et leur durée de vie.

La conception et la fabrication d'une pièce travaillante d'un outil aratoire demande donc une organisation précise, basé principalement sur une étude théorique qui cerne l'objectif attendu et d'un choix sélectif des matériaux. Cette conception est basée sur : le concept du système sol-outil, l'établissement des équations mathématiques pour la surface active et la dynamique de l'ensemble sol-outil.

Parmi les critères pris en considération sont principalement :

- Les caractéristiques de la bande de terre comme sa longueur, sa largeur et sa profondeur.
- Les caractéristiques dimensionnelles du corps de charrue (hauteur, longueur, largeur) et les angles initiales.
- Le milieu d'action (état initiale du sol) pour les pièces travaillantes comme les socs, le choix du matériau et des caractéristiques géométriques seront variables en relation avec la texture et la cohésion du sol ainsi que la densité du couvert végétale.
- Les traitements des pièces travaillantes doivent permettre une grande résistance à l'usure d'où un traitement de surface approprié.
- Les conditions finales du sol qui représente l'objectif à atteindre (indices qualitatifs).

La fabrication d'un versoir est complexe. Le traitement des ses aciers doit lui procurer une grande résistance à l'usure tout en lui conservant une relative souplesse. Pour ces raisons, les versoirs sont souvent fabriqués en trois couches d'acier traitées :

- Les couches extérieures et surtout celle de la face travaillante d'une épaisseur de 2 à 4 mm, sont en acier très dur pour résister à l'usure.
- La couche du milieu procure au versoir la souplesse nécessaire (versoirs triplex).

## Conclusion

D'après les caractéristiques de cet outil, on déduit que la géométrie des surfaces actives de leurs pièces travaillantes à un très grand rôle dans la détermination de la qualité de travail recherché en tenant compte les conditions de travail.

Un labour traditionnel est la meilleure solution quand il faut enfouir de résidus de récolte et lorsque la capacité de travail n'est pas limitant.

## **Chap. 5: Les moyens utilisés pour caractériser des surfaces actives des pièces travaillantes**

### **Introduction**

---

L'hétérogénéité géométrique des surfaces actives existant dans les corps de charrues à versoir est la raison pour laquelle la modélisation des efforts de résistance à la traction exclue l'introduction des caractéristiques géométriques particulièrement angulaires. Un autre problème est à mettre en évidence, il s'agit de l'absence de moyens de mesure précis pour la caractérisation de ces surfaces gauches. Cependant la détermination des coordonnées tridimensionnelles (3D) des points sur la surface de versoir de la charrue est absolument nécessaire pour modéliser sa surface géométrique. (Aguilar., 2005).

A cet effet, la quantification et la caractérisation des surfaces actives des pièces travaillantes ont un intérêt pratique pour le concepteur qui doit réaliser une surface permettant à l'agriculteur d'obtenir ou rapprocher les objectifs agronomiques recherchés lors de la préparation du sol.

Cette quantification et la caractérisation de la forme des surfaces actives exigent des méthodes, moyens et matériel spécifiques qui sera l'objet de ce chapitre.

### **5.1. Moyens de caractérisation géométriques des surfaces actives**

---

La caractérisation des outils aratoires a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche ayant chacun une orientation bien précise.

La première grande orientation proposée par Faure, (1970) *in* Amara, (2007) est celle relative au mode d'action de l'outil étudié ; elle se base sur l'évolution de l'état structural du sol avant et après le passage des pièces travaillantes. Cette première orientation intéresse beaucoup plus les agriculteurs qui doivent choisir la forme des outils aratoires en tenant compte des conditions d'interventions et des objectifs recherchés.

La seconde, qui est relative à la conception des outils aratoires, porte sur les caractéristiques géométriques des surfaces actives et de leurs améliorations en vue de l'optimisation de leurs utilisations sur terrain. (Amara., 2007).

Dans ce qui suit ci-dessous, nous allons décrire les moyens couramment utilisés pour la quantification et l'identification de la surface active des pièces travaillantes des outils aratoires.

#### **5.1.1. Le profilographe**

---

Ce dispositif est très simple et facile à utiliser, il est constitué de deux plaques en bois perpendiculaires liées entre elles en constituant les axes de référence (X, Y, Z). La première opération est de mettre le corps de charrue sur la plaque horizontale (plan horizontal) de telle sorte que son orientation est correspond à la position de travail dans le terrain, ainsi que la pointe du soc est au point (0.0.0). Ce dispositif est permet de mesurer les coordonnées de tous les points de la surface active et les points du contour du corps de charrue, sachant que les mesures suivant Y et Z sont variés par un intervalle constant de 2 cm. La mesure est fait par le passage d'une baguette de petite diamètre par les trous jusqu'à se touche à la surface du corps de charrue puis on va prendre la distance entre ces deux point d'extrémité, tout en respectant l'horizontalité pendant la mesure.

Cette méthode permet la caractérisation des surfaces actives par des projections sur les trois plans de travail. L'axe Ox est la direction du déplacement et le plan xOy est un plan horizontal délimitant le fond de labour, le plan xOz est un plan vertical longitudinal et s'appelle la muraille du sillon et le plan yOz est un plan vertical transversal (frontal).

#### **5.1.1.1. Evolution du profilographe**

Les améliorations des pratiques en matière de travail du sol et de la conception des équipements de travail du sol sont de grande importance. En outre, pour contrôler l'exactitude du surfaces du versoir avant la fabrication, la surface et ses angles après la fabrication, une lame doit être considérée sur le profilographe (Bernacki et al., 1979).

Thomas Jefferson a développé une approche physique pour analyser une surface de versoir. White et Ashby ont développé des méthodes graphiques à cette fin. La première photographie a été développée par Soehne (Kepner et al., 1978).

Ringleman a inventé un profilographe manuel, qui pourrait dessiner les profilograms verticaux. Dans le dernier profilographe, le versoir fixé sur un support et est déplacée par une vis manœuvrée à intervalles égaux pour dessiner le profil vertical (Coupan, 1915 in Massah., 2004).

Marvel et al., (2000) ont développé un profilographe, qui a eu deux bras à différentes directions. Les bras avec des roues ont été utilisés pour mesurer la courbure extérieure considérée. La courbure mesurée a été transférée à un enregistreur.

Massah, (2004) a conçu un profilographe électromécanique (Fig. 13). Le profilographe développé utilise un micro commutateur situé sur le bout de tige d'aspiration, qui suit la courbure de surface du versoir, et un stylo d'aspiration sur une règle mobile à dessiner la courbure appropriée. Après que la règle soit atteinte à l'extrémité de sa course, un micro-commutateur fonctionne pour dessiner le prochain profilograms.



*Fig. 13 : Profilographe automatique conçu de versoir par Massah.*

L'objectif de cette recherche était d'améliorer la performance du l'ancien profilographe développé, dans lequel une sonde optique et un moteur DC avec contrôleur rapide ont été utilisés au lieu d'un micro commutateur. En utilisant le dispositif de mesure avec une meilleure exactitude et une réponse en fréquence plus élevée sur le profilographe étudié, l'objectif était de minimiser l'erreur de dessin.

### **5.1.2. Profilographe avec sonde optique**

Dans le précédent profilographe, pour suivre la surface du versoir, un micro-commutateur retardé a été utilisé. Dans cette approche, une lame coupe et relie les deux contacts du micro-commutateur pour changer la rotation de moteur (l'axe x) et assurer le contact de la tige de tiroir avec le versoir. Pour améliorer le dernier mécanisme, une sonde optique a été utilisée pour éviter les erreurs provoquées par le contact avec le versoir (fig.14).

La distance entre la tige inclinée où la sonde optique a été installée et la surface considérée est mesurée à l'aide de la sonde optique avec une exactitude de  $\pm 1$ mm. Quand une différence entre la distance prédéterminée et la distance mesurée est trouvée, une commande de rétroaction est envoyée au moteur de changer cette distance. Si cette distance s'avère plus haute que la distance prédéterminée, une commande est envoyée à la tige de tiroir à déplacer vers le versoir et vice versa.

L'appareillage automatique de profilographe du versoir consiste en deux pièces principales : l'appui du versoir et le tiroir. (Massah., 2008)



*Fig.14. Mécanisme de fonctionnement de tige mobile avec la sonde optique.*

### 5.1.3. Pantographe

Un pantographe est un instrument de dessin, formé de tiges articulées qui permet de faire des agrandissements ou des réductions en utilisant les propriétés de l' homothétie pour conserver les proportions entre le dessin original et la copie. Un premier bras est fixe par rapport au support, le bras central est prolongé par un petit pointeur, et le dernier est muni d'un crayon. En déplaçant le pointeur sur le diagramme, une copie du diagramme est réalisée par le crayon sur une autre feuille de papier. La dimension de l'image produite peut être changée en modifiant la dimension du parallélogramme (Daxecker., 1992).

Généralement, le moyen le plus répandu est le pantographe simple (Fig.15a). Souvent, les chercheurs utilisent un système de mesure basé sur les rayons laser (Fig.15b).



*Fig.15a. Pantographe (Bentaher et al., 2005)*

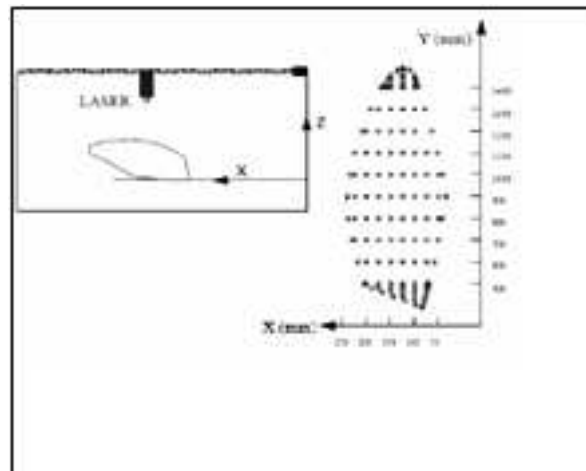


Fig.15b. Profilographe à faisceau laser

#### 5.1.4. Laser scanner (sonde de laser)

Dans les études précédentes, la mesure des points des coordonnées de versoir a été obtenue avec un pantographe, dont l'exactitude dépend entre autres des dégagements entre les liens et ce qui était manuellement utilisé. Pour éviter ces inconvénients, un module scanner utilisant d'une sonde de laser est conçu et permet la mesure sans contact des distances. Quand le laser est utilisé dans son premier mode scanné, la réflectivité extérieure doit être comportée entre 6 et 36%.

La surface de versoir, qui est nouvelle, apparaît noir mat et sa réflectivité est située dans le range indiqué. La distance de mesure maximum est égale à environ 2000 millimètres et la résolution est 1mm. Le laser peut se déplacer le long de x et les directions de y se rapportant à la position de charrue et mesurer coordonnées de z. Dans chaque direction, une vis place-filetée de puissance ayant un lancement égal à 3mm est conduite grâce à un petit moteur et assure le mouvement de laser. Les signaux produits du laser sont envoyés par l'intermédiaire d'une interface RS232C à un ordinateur équipé du logiciel de LABVIEW et les fichiers de données sont alors transférés pour être analysés par AutoCAD. Un dispositif automatique entier est ainsi créé pour analyser la surface de versoir, permettant la mesure facile des coordonnées de n'importe quel point situé sur le versoir. (Destain., 2005)

#### 5.1.5. Méthode de Modèle géométrique de la surface active

Le modèle géométrique de la surface active a été développé pour calculer les coordonnées de la forme spatiale d'un nombre fini de points sur la surface active réelle. Ceci a été exécuté par un système de détection capable de déterminer les coordonnées spatiales x, y, z avec une précision élevée. Un tel dispositif est relié à un système d'acquisition de données pour enregistrer les trois coordonnées de chaque endroit surveillé.

Le système de détection a été constitué par trois barres situées le long des trois axes cartésiennes du système de référence, avec des axes X et Y situés sur le plan horizontal et la normale Z-axis au plan vertical. Sur chaque barre, il y a un indicateur de glissement, axialement réglable par une vis micrométrique, pour mesurer des déplacements le long des axes de X, Y et de Z, respectivement. Le système de pointage a été constitué par une petite armature protégeant un micromètre qui a été attaché au dispositif de déplacement le long de l'axe de Z. Ce dispositif de déplacement, appelé un «Newall spherosyn micrométric slider» (électronique de Newall, Columbus, USA), a une exactitude de mesure de 1 $\mu$ m. Les



données de position des indicateurs micrométriques ont été enregistrées par le système d'acquisition de données, et converties en coordonnées spatiales dans le système de référence pour la charrue à versoir, comme montré dans la figure 16.

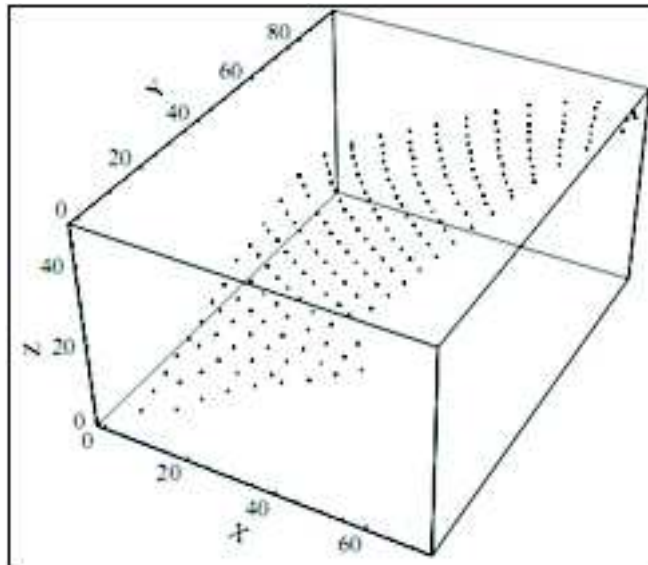


Fig. 16: Les points détectés et le système de référence employé.

L'axe X – axe latéral de charrue, normal à la direction de travail ; l'axe de Y- axe de charrue longitudinal à la direction de travail ; l'axe de Z- axe vertical de charrue, perpendiculaire au plan XY. Les coordonnées ont été détectées seulement quand le micromètre du système de pointage, indiquait la valeur de 0.001mm comme confirmation de contact entre le micromètre et la surface du versoir de la charrue.

Les points détectés appartiennent aux courbes de l'intersection sur la surface active de versoir de charrue avec le plan XZ, à des intervalles de 40mm dans la direction de Y (Iso-Y courbes). L'espacement de point au long de l'axe Z n'est pas plus grand que 20mm. En effet, la maille de détection n'était jamais plus grande que 20mm par 40mm, rapportant 208 points au total sur la surface active de versoir de charrue (fig. 16).

Le modèle géométrique a été validé en employant deux coordonnées spatiales pour différents points afin de déterminer le troisième du même rang spatial (avec deux répliques) et en comparant le résultat moyen à la valeur obtenue par une mesure directe. La différence détectée dans la hauteur maximum du versoir de charrue était moins de 4%.

De tels points ont été examinés par le programme «Mechanical Desktop», et les courbes «Spline» obtenues avec les points qui ont eu la même valeur de y ont été dessinées comme courbes de «Iso-Y». Plus tard, deux courbes de frontière ont été dessinées en utilisant la fonction du programme «Spline». Puis, la surface a été constituée en utilisant des courbes «Iso-Y» comme sections transversales, et les deux «Spline» de frontière comme chemins.

Ceci a été effectué par une méthodologie intégrée du «NURBS» (Non-Uniform Rational B-Spline), qui facilite la conception du modèle géométrique comme surface tridimensionnelle complexe (Ravonison et Destain, 1994 ; Ros et al., 1995). Cette étude est complétée par une analyse numérique de la distribution des contraintes normales, et les forces et les moments agissant sur les éléments de surface active du modèle géométrique. Ainsi par une analyse expérimentale pour détecter et enregistrer la distribution

des contraintes normales sur la surface active du versoir lors du travail à l'aide de capteurs piézo-résistive relié à un système d'acquisition des données (Formato et al., 2005).

### **5.1.6 Méthode photogrammétrique**

La détermination des coordonnées Photogrammétrique 3D est basée sur l'équation de colinéarité, le quel localise simplement ce point d'objet, le centre de camera projectif et le point d'image se trouvent sur une ligne droite. La détermination des coordonnées 3D d'un point défini est réalisée par l'intersection de deux ou plus des lignes droites. Par conséquent, chaque point d'intérêt devrait apparaître au moins en deux photographies. Après, les étapes suivies pour mesurer les coordonnées 3D dans les points situés sur la surface de charrue à versoir en utilisant la méthode Photogrammétrique proposée ci-dessus sont détaillées. (Aguilar et al., 2005)

### **Conclusion**

L'identification et la caractérisation des surfaces actives des corps de charrue sont intéressés par plusieurs chercheurs notamment celle des travaux de (Coupan, 1915) qui ont utilisé le profilographe pour quantifier la surface du versoir, après il commence à évoluer progressivement par des techniques et méthodes de mesure à l'aide des appareils et des outils informatiques très efficaces que celles des méthodes empiriques classiques.

La difficulté de la quantification des surfaces actives gauche, qui est identifié et analyser à la première fois par (Amara, 2007) (thèse de doctorat), comme suit :

- la complexité de la forme des surfaces actives des versoirs.
- les résultats obtenus sont moins précis, engendrant des erreurs
- les outils utilisés ne sont pas compatibles aux opérations de mesures des coordonnées.
- manipulation très lente.

### **Conclusion bibliographique**

Au niveau de cette partie bibliographique nous avons fait ressortir l'importance de la forme géométrique des outils aratoires dans l'itinéraire technique et son effet sur les indices qualitatifs et quantitatifs des opérations de préparation du sol qui représente l'une des étapes élémentaires de la production agricole. Pour cela la caractérisation géométrique des surfaces actives des pièces travaillantes des outils aratoires permettra de choisir la forme qui convient pour satisfaire les besoins de la plante, toute en économisant l'énergie de travail et l'obtention d'une meilleure qualité de travail et donc un bon rendement.

Cette caractérisation ne peut se faire sans connaître les différentes techniques de travail du sol ; les moyens utilisés dans la quantification des surfaces actives des pièces travaillantes ; les caractéristiques géométriques des pièces travaillantes, dans notre cas on a choisi un outil de travail primaire sachant que la charrue à soc ; les critères de choix des pièces travaillantes qui représente les paramètres du sol et les conditions de travail y compris les exigences de la culture.

---

# Partie Expérimentale

## Introduction

La partie expérimentale portera donc sur la caractérisation géométrique de la surface active d'un outil aratoire, il s'agit de la surface active du corps de charrue fabriquée au niveau de l'entreprise MAGI de Rouïba.

L'intérêt de cette caractérisation géométrique est la modélisation et l'optimisation de la forme de la surface active, afin de satisfaire les objectifs recherchés lors des opérations du travail du sol que ce soit l'aspect agronomique et économique (qualité de travail et consommation d'énergie).

Par ailleurs, cette étude sera complétée par une étude du comportement mécanique du versoir. Cela permettra le choix d'un matériau qui résistera mieux aux contraintes du sol.

### **Objectifs :**

Les objectifs retenus pour notre travail :

- Proposition de méthodes d'analyse des surfaces actives de deux formes de surfaces actives des outils aratoires les plus fréquemment utilisés sur nos champs.
- Proposition d'équations de surfaces pour ces deux surfaces actives.
- L'intérêt de ces deux parties est de fournir aux agronomes des critères scientifiques pour le choix des pièces travaillantes des outils aratoires à utiliser dans des conditions pédoclimatiques prédéfinies pour l'obtention d'un état du sol favorable au bon développement des cultures à mettre en place.
- Ce travail permettra également aux concepteurs des outils aratoires d'avoir des indications ou paramètres à prendre en considération pour la fabrication des surfaces actives répondant aux conditions pédoclimatiques prédéfinies.

## Chap. 6. Outils aratoires à surfaces gauches

### Introduction

---

Le corps de charrue à socs est classé parmi les outils à surfaces gauches vu sa complexité et sa variabilité sur le plan spatial. Ce chapitre portera sur l'étude de corps de charrues MAGI fabriqué en Algérie, en premier temps nous avons commencés par une caractérisation géométrique après on fait une modélisation suivie par une optimisation de sa forme afin d'obtenir un travail approprié et de minimiser l'énergie de travail.

#### 6.1. Caractéristiques générales

---

Le corps de charrue utilisé dans notre travail, est représenté sur les figures suivantes :



**Fig. 17** : Corps de charrue (vue latérale XOZ).

Corps de charrue (vue de face YOZ).



Corps de charrue (vue de dessus XOY).



Les principales caractéristiques géométriques de corps de charrue à socs « MAGI » (figure 17) sont enregistrées dans le tableau ci-dessous :

Caractéristiques	Corps de charrue (MAGI)
Forme du soc	Carrelet
Angle d'entrure ( $\alpha_0$ )	24
Angle d'attaque ( $\gamma_0$ )	38
Angle d'inclinaison ( $\theta_0$ )	35
Angle de montée de terre ( $\beta_0$ )	40
Angle moyen du versoir	44
Angle de bord supérieur du versoir	61

*Tab.4 : Caractéristiques constructives du corps de charrue à soc.*

### 6.1.1. Les longueurs

Les valeurs des différentes longueurs du corps de charrue sont enregistrées dans le tableau ci-dessous :

Dimensions (cm)	Charrue à soc « MAGI »
Plus grande dimension du versoir ( $l_1$ )	73
Longueur du bord supérieur du versoir ( $l_2$ )	54
Largeur du bord inférieur jusqu'au point de courbure maximale (m)	22
Hauteur de chute du point C jusqu' au fond de labour C' (h)	30
Distance entre la pointe de soc et le point d'inflexion C (c)	51
Largeur arrière de versoir ( $d_1$ )	44
Largeur de la gorge du corps de la charrue ou largeur minimale ( $d_2$ )	25
Largeur du versoir au point de courbure maximale ( $d_3$ )	34
Hauteur de corps (H)	42
Longueur projetée (l)	94
Largeur de corps (b)	42
Longueur maximale de corps $L_1$	90

*Tab.5 : Dimensions principales caractérisant le corps de charrue « MAGI ».*

### 6.1.2. Les Angles initiaux

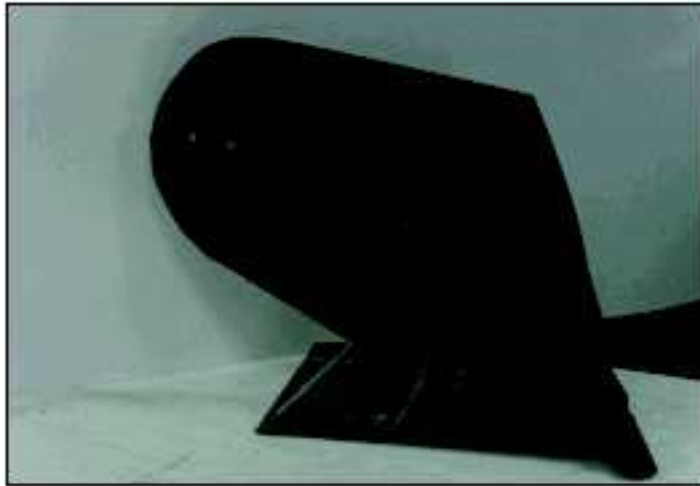
Ces angles sont ceux mentionnées dans le tableau 1. Leurs valeurs sont déterminantes sur les caractéristiques des labours, telle que la facilité de pénétration du corps de charrue dans le sol au début du sillon et donc sur l'énergie exigée pour le cisaillement du sol par le soc.

En effet l'angle d'entrure ou appelé également angle de piquage, détermine la pénétration du corps de charrue dans le sol. Plus cet angle est important, plus la charrue pénètre bien dans le sol, mais l'effort de résistance à la traction en sera plus important.

## 6.2. Matériel et méthode

### Matériels

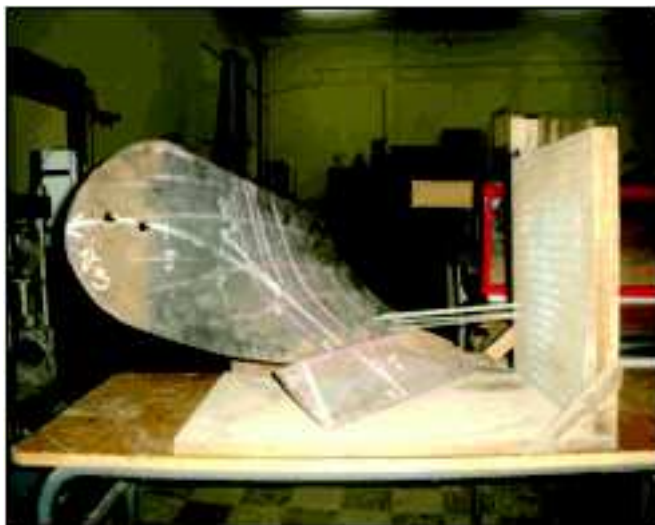
La réalisation de notre travail est faite sur un type d'outil aratoire, tel que, un corps de charrue à versoir universel. La surface active est caractérisée par une forme géométrique complexe (surface active spatiale). Cette forme a été choisie parce qu'elle est souvent utilisée sur les exploitations agricoles algériennes. Le type de travail réalisé par cet outil est le labour profond (jusqu'à 30 cm). A cette profondeur, l'effort demandé pour la traction de la charrue est très important. D'où l'intérêt d'une analyse de la forme de la surface active en vue de son optimisation. Le corps de charrue utilisé pour notre travail est représenté sur la figure suivante.



*Fig. 18 : Corps de charrue à soc « MAGI ».*

### **6.2.2. Dispositif utilisé**

Afin de déterminer les différentes coordonnées des points des surfaces actives, le dispositif représenté à la figure (19), a été utilisé au niveau de laboratoire Machinisme Agricole à l'INA. Ce dispositif est composé de deux plaques en bois montées perpendiculairement l'une par rapport à l'autre. La plaque verticale est percée par des trous équidistants entre eux, à travers lesquels passent des baguettes graduées pour relever les coordonnées des différents points de la surface active.



**Fig. 19** : Dispositif de mesure des coordonnées de la surface active du corps de charrue (profilographe).

### 6.3. Méthodes de caractérisation

Les corps de charrue à soc sont des formes géométriques complexes variant en fonction du type de sols et de son couvert végétal. La forme varie d'une forme cylindrique à une forme hélicoïdale en passant par plusieurs formes intermédiaires.

Dans le but d'optimiser de la forme du corps de charrue à soc et de simuler son mode d'action sur le sol pendant le labour, il est nécessaire de caractériser et modéliser sa surface active par des équations mathématiques ou des courbes mettant en évidence principalement les courbures en chaque point.

En outre, la définition complète de la forme du versoir est indispensable pour la comparaison et l'analyse des performances des différentes charrues et pour les besoins de conception et de fabrications optimales satisfaisant les conditions de travail données.

Selon Richey *et al.*, 1989, Ros *et al.*, 1995 ; Suministrado *et al.*, 1990 cités *in* Craciun *et al.*, 2004, Les recherches faites sur l'identification des formes de versoirs et de socs ont conduit en général à distinguer deux visions, proposées respectivement par Reed et White :

- La première repose sur une méthode empirique classique qui consiste à mesurer les coordonnées des contours horizontaux espacés régulièrement (intervalle vertical constant) et obtenir ainsi des vues planes du versoir (Reed, 1941 cité *in* Ravonison et Destain., 1994).
- Quant à la deuxième vision, elle s'appuie sur l'utilisation des modèles mathématiques pouvant décrire la forme de ces surfaces (White cité *in* Ravonison et Destain., 1994). En 1918, White a utilisé des paraboloides hyperboliques pour représenter le versoir.

Plus tard, en 1932, Nichols et Kummer cité *in* Ravonison et Destain, (1994) ont proposé la définition de toute la surface de la charrue par des arcs circulaires rotatifs au long de la ligne qui passe par la partie pointue du soc.

Ces méthodes permettent de définir la surface active d'une façon précise et sa représentation graphique en 3D. Ainsi, il sera possible d'optimiser son design pour satisfaire les objectifs du labour, d'une part, et d'autre part, d'analyser les contraintes qui lui sont appliquées. (Sherata., 2001).

Les méthodes utilisées pour la caractérisation des surfaces actives des corps de charrue à socs sont respectivement :

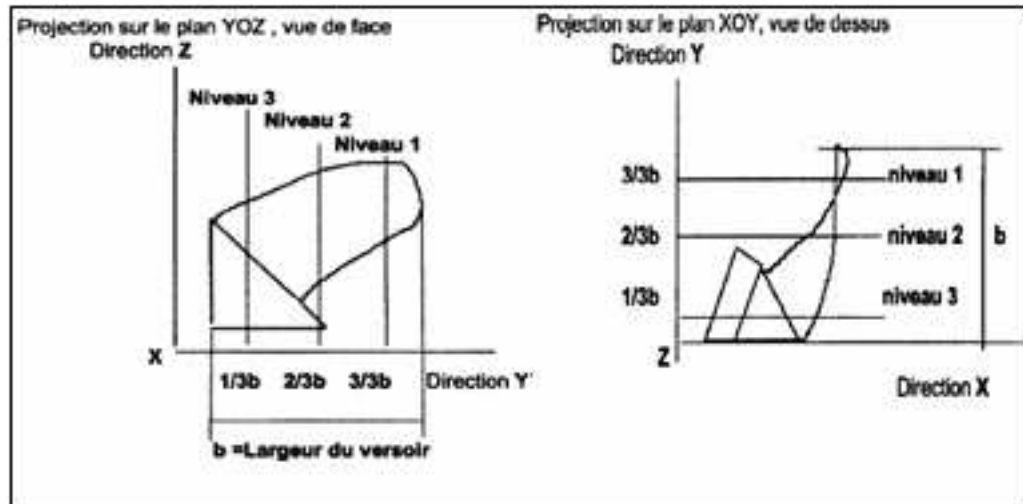
- La méthode statistique
- La méthode géométrique
- La méthode numérique
- La méthode analytique

#### 6.3.1. Méthode Statistique

Cette méthode est basée sur l'analyse statistique des coordonnées des différents points de toute la surface active du corps de charrue (Amara, 1998).

L'identification de la surface active est faite par relevé des points sur la surface de la charrue par l'utilisation d'un pantographe simple qui permet de déterminer les différentes coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$  de toute la surface et des coordonnées du contour du corps de charrue.

L'analyse consiste à diviser la surface active en plusieurs parties suivant la largeur de travail de la surface active et la longueur de travail (Fig.20) du corps de charrue afin de voir la courbure moyenne que suivra la bande de terre et de prévoir ainsi son comportement ou sa déformation.



**Fig.20.** Les plans de projection des parties analysées. (Amara, 1998).

### 6.3.2. Méthode Géométrique

C'est une méthode largement utilisée dans les logiciels de graphiques pour produire des formes de contours par lissage.

Dans cette méthode, la technique proposée par Ravinson et Destain, (1994) est basée sur les équations paramétriques cubiques de Bézier et fait intervenir un algorithme pour améliorer l'efficacité de l'approximation de la surface théorique à la surface réelle.

Les résultats de ce travail sont comparés aux mesures par un pantographe simple. (Ravinson et Destain, 1994). En 2002, Raves et al., ont relevé les valeurs par utilisation un pantographe Laser.

### 6.3.3. Méthode Numérique

Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un logiciel de conception et de dessin assisté par ordinateur (CAO-DAO). Les méthodes discutées dans cette partie utilisent les logiciels AutoCAD et SolidWorks. L'utilité de ces méthodes est la visualisation du profil de la surface active en 3D ainsi que la préparation d'un fichier utilisable par les logiciels de simulations.

#### Logiciel AutoCAD

La méthode consiste à utiliser la fonctionnalité du logiciel AutoCAD (Destain, 1995). Il s'agit de tracer les contours de la charrue à soc par 4 Splines puis reconstituer la surface gauche entre ces derniers par un maillage polygonal. Cette méthode est la plus simple et a montré une précision acceptable.

Elle possède deux inconvénients : (Bentaher et al., 2005)

1- l'absence du point de contrôle à l'intérieur de la surface du versoir, ce qui ramène à l'imperfection de la méthode géométrique auparavant;



2-la surface reconstituée est un maillage ne pouvant pas être utilisé par les logiciels de modélisation par élément finis. Ces derniers font intervenir des solides 3D (ayant une épaisseur définie), donc l'exploitation du maillage polygonal par les logiciels de simulation n'est pas possible.

- Logiciels SolidWorks :

La méthode consiste à découper la surface gauche de la charrue à soc avec des plans verticaux espacés d'une distance donnée. Dans chaque plan, on esquisse la section exacte reproduite par un pantographe ou un profilographe à faisceau laser. Cette méthode donne des résultats très satisfaisants quant à la forme de la surface et aboutit à un solide 3D utilisable directement par les logiciels de simulation. (Bentaher et *al.*, 2005).

### 6.3.4. Méthode Analytique

Cette méthode de modélisation des formes des outils de labour est basée sur le développement d'une équation mathématique (Ros et *al.*, 1995; Craciun et *al.*, 2004).

Cette équation tient compte des différents paramètres géométriques et peut décrire la modélisation de plusieurs outils de labours passifs.

Les paramètres géométriques du profil de la surface active de charrue à soc sont décrits en se basant sur le trièdre élémentaire ABC dessiné sur le repère cartésien OXYZ.

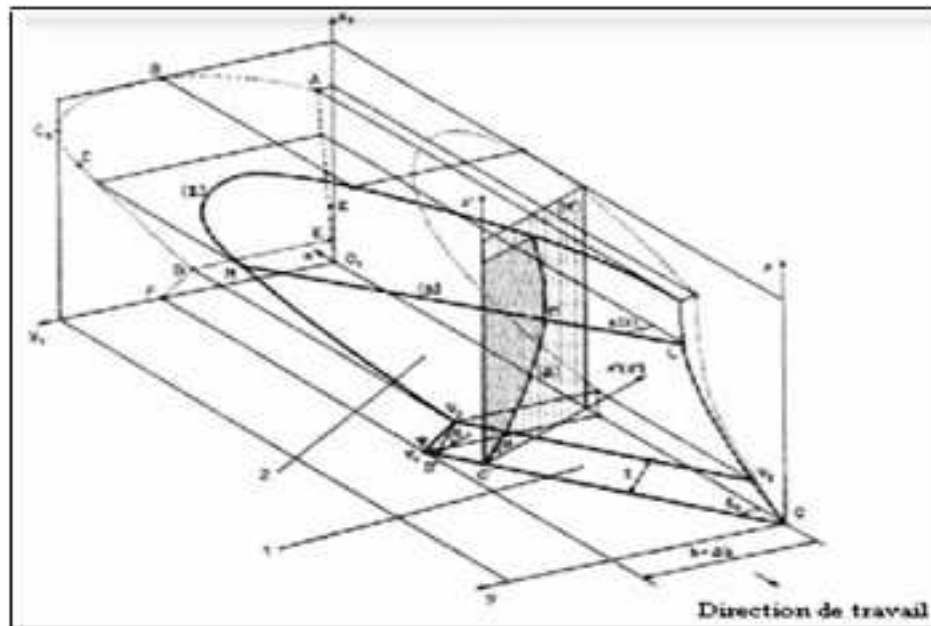
- OX : direction de mouvement de l'outil ;
- $\gamma_0$  : Angle maximal entre le plan ABC et le plan horizontal XOY ;
- $\theta_0$  : Angle que fait l'arête de coupe horizontale avec la direction de coupe OY. Cet angle confère au sol un certain foisonnement en assurant le déplacement latéral de la bande de terre;
- $\alpha_0$  : angle mesuré dans le plans YOZ que fait le plan ABC avec OY, Cet angle relève la bande de terre en l'émiettant;
- $\beta_0$  : angle mesuré dans le plan XOZ que fait le plan ABC avec OX. Cet angle provoque le renversement de la bande de la terre.

Pour la surface active de charrue à soc les angles,  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$ ,  $\theta_0$  et  $\gamma_0$  sont des fonctions qui varient avec Z, la hauteur du corps de charrue, ce qui permet d'obtenir différentes formes des surfaces actives : Cylindrique, hélicoïdale ou cylindro-hélicoïdale (Bentaher et *al.*, 2005). Ces angles sont reliés entre eux par la relation suivante :

$$\text{tg } \alpha_0 = \text{tg } \gamma_0 \cdot \sin \theta_0 = \text{tg } \beta_0 \cdot \text{tg } \theta_0$$

Parmi les auteurs qui ont utilisés la méthode analytique, nous citerons particulièrement Craciun et Leon, (1998).

Pour l'étude géométrique de la forme du corps de charrue, ce dernier positionne le corps de charrue dans un système de coordonnées cartésien Oxyz (Fig.21), avec la disposition de la pointe de soc sur l'origine des axes. L'axe Ox est la direction de travail où le mouvement au sens négative. Les plans xOy, xOz et yOz représentent, respectivement, le plan horizontal, le plan vertical-longitudinal appelant la muraille et le plan vertical- transversale (le plan de face).



**Fig. 21.** Vue perspective de la surface active d'un corps de charrue (Craciun et al., 1998).

Cette étude présente une méthodologie complète pour résoudre analytiquement le problème lié au versoir à géométrie cylindroïde, à savoir:

- L'équation mathématique du versoir et de la surface active du corps de charrue dans le système de coordonnées cartésien  $(O, x, y, z)$ .
- Les équations des courbes résultantes d'intersections du corps de charrue avec les plans verticaux-longitudinaux,  $y = \text{constant}$ .
- Les équations des courbes résultantes d'intersections du corps de charrue avec les plans verticaux-transversaux,  $x = \text{constant}$ .
- Les équations des courbes résultantes d'intersections du corps de charrue avec les plans verticaux perpendiculaires à la partie affûtée de soc.
- Les coordonnées des points du contour de la partie arrière plane du versoir.

En conclusion, les quatre méthodes citées ci-dessus seront choisies en fonction de la précision recherchée pour l'étude des surfaces actives gauches des corps de charrue. Pour notre cas, pour la caractérisation géométrique, nous avons opté pour la méthode statistique pour attribuer des relations mathématiques aux différentes parties de la surface active et à son contour.

#### 6.4. Méthodes adoptés pour notre travail

Pour atteindre les objectifs de notre travail, nous allons adoptés les trois méthodes de travail afin d'avoir d'un meilleur résultat. Ces trois méthodes sont définies comme suit :

- la méthode statistique pour analyser la courbure de la surface d'une part et d'autre part la projection du contour du corps de charrue suivant les trois plans de travail.
- la méthode géométrique pour optimiser et modéliser la forme de la surface active complexe d'un corps de charrue à socs.
- la méthode numérique pour faire la simulation du mode d'action de la pièce travaillante sur le sol pour deux formes de corps de charrue à socs.

### 6.4.1. Méthodologie d'analyse

Après avoir déterminé les différentes coordonnées, la surface active à été divisée suivant le plan YOZ en cinq parties, on passe d'une surface cylindrique à l'avant du corps (deux premières sections), une partie centrale à tendance hélicoïdale et la partie arrière qui est une surface plane. Cette division permettra de prévoir l'évolution du comportement de la bande de terre sur la surface active du corps de charrue.

Chacune de ces parties a été analysée en utilisant la méthode des régressions polynomiales du deuxième ordre pour définir les courbures des différentes parties de surface.

L'analyse du contour du corps de charrue est réalisée pour déterminer la surface de pression de la surface active avec un objectif, son optimisation.

Nous avons déterminés après avoir défini les coordonnées du contour, la variation de la trajectoire moyenne ainsi que la simulation partielle du plan de cisaillement de la bande de terre sur la surface active. En ce qui concerne le contour du corps de charrue, nous avons réalisé un ajustement polynomial du deuxième ordre pour donner une forme régulière en éliminant toutes les erreurs expérimentales.

## 6.5. Modélisation de surface de corps de charrue

Dans cette partie il est question de la caractérisation de la surface active du corps de charrue en utilisant des ajustements polynomiaux permettant d'obtenir des équations illustrant correctement la variation de la courbure de la surface active, ainsi que de corriger les erreurs expérimentales due aux mesures.

### 6.5.1. Analyse de la courbure de la surface active du corps de charrue (MAGI)

Méthodologie d'analyse :

La surface active est donc divisée en cinq parties suivant la largeur de travail(Y) du corps de charrue. L'intérêt de cette division est de voir la courbure moyenne que suivra la bande de terre et d'en prévoir son comportement ou sa déformation, et sur tous les deux centimètres. Les résultats de notre analyse sont illustrés par les représentations graphiques suivantes :

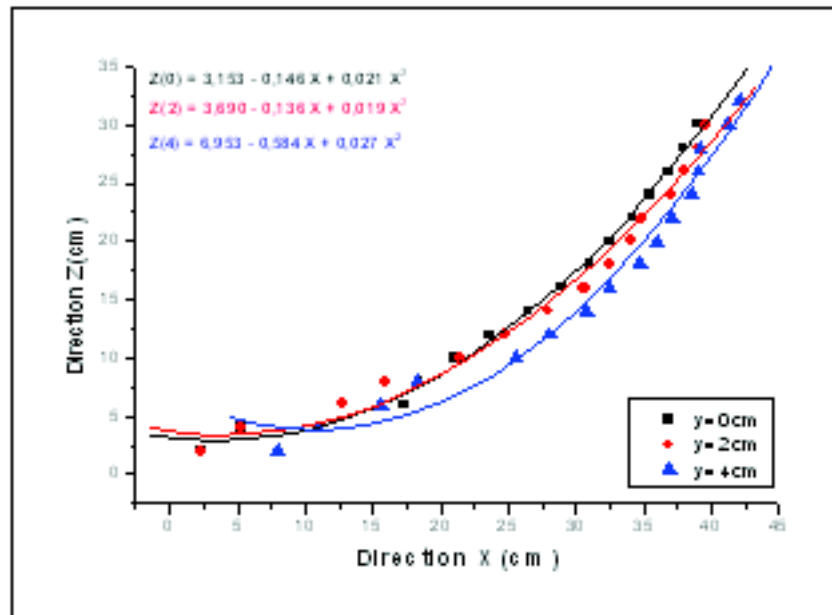


Fig. 22 : variation de courbure de la surface active du corps de charrue pour Y (0 à 4cm).

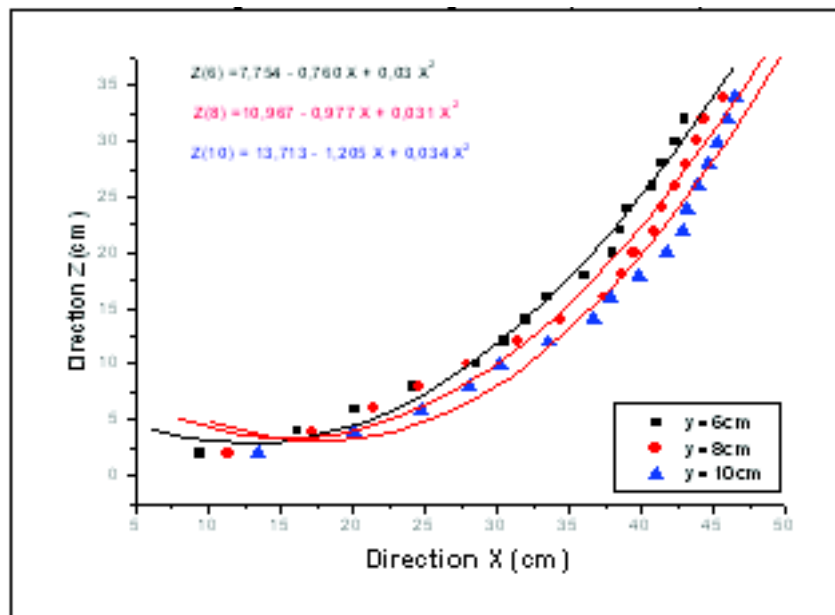
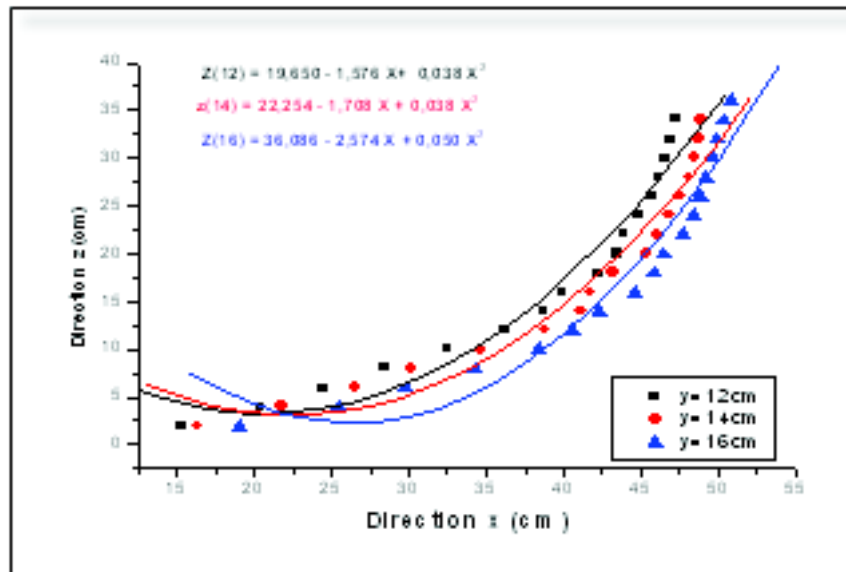
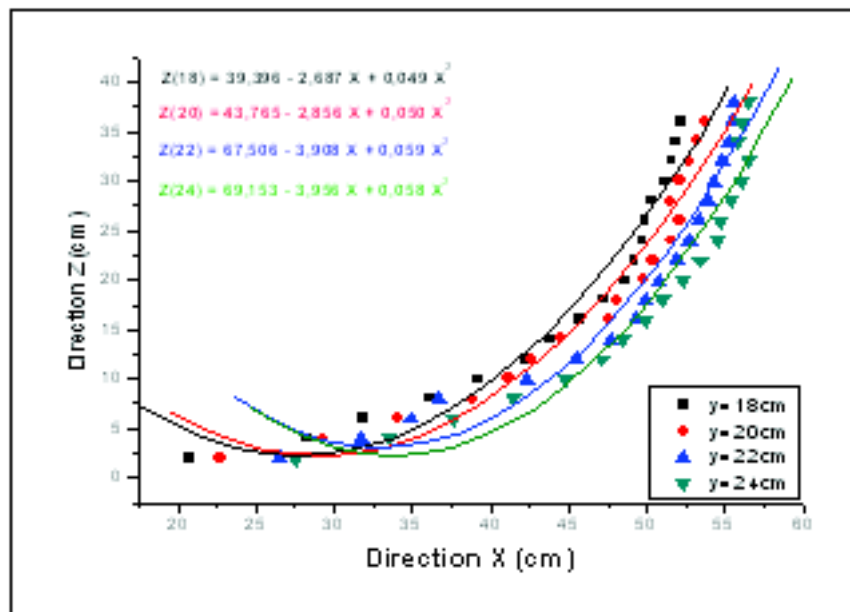


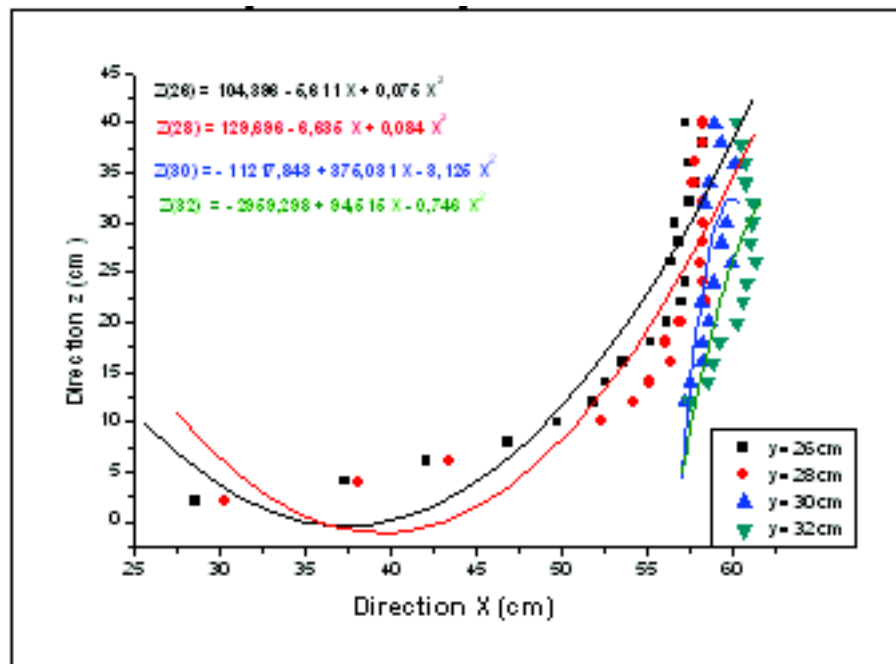
Fig. 23 : variation de courbure de la surface active du corps de charrue pour Y = 6 à 10cm.



**Fig. 24** : Variation de courbure de la surface active du corps de charrue pour  $Y = 12$  à  $16$ cm.



**Fig. 25** : Variation de courbure de la surface active du corps de charrue pour  $Y = 18$  à  $24$ cm.



*Fig. 26: Variation de courbure de la surface active de corps de charrue pour Y = 26 à 32cm.*

#### Analyse des graphes

Ces graphes représentent la variation de la courbure de la surface active suivant la direction (X) et ce pour les différentes sections suivant le plan vertical perpendiculaire (YOZ) à la direction d'avancement du corps de charrue. La première remarque est que la courbure est de plus en plus importante de l'avant du corps de charrue vers l'arrière.

Les équations obtenues montrent que la courbure de la surface active est de plus en plus importante jusqu'à la valeur de Y = 28 cm.

A partir de y = 30 cm, la courbure ne prend plus la forme d'un polynôme de second degré. La partie arrière est plutôt plane, ce qui donne des équations de premier ordre.

Toutes ces variations ont un effet sur la déformation de la bande de terre et plus particulièrement sur le retournement et donc sur l'enfouissement des résidus végétaux qui le rôle principal des labours. D'où l'intérêt de l'analyse de la forme des surfaces actives des pièces travaillantes et notamment de leur optimisation.

En prenant les différentes équations obtenues il est possible de montrer par simulation, les différents plans de cisaillement que subirait la bande de terre en passant sur les six différentes parties de la surface. Ceci est illustré dans ce qui suit par les figures suivantes:

### 6.5.2. Représentation des surfaces actives partielles du corps de charrue et simulation des plans de cisaillement de la bande de terre.

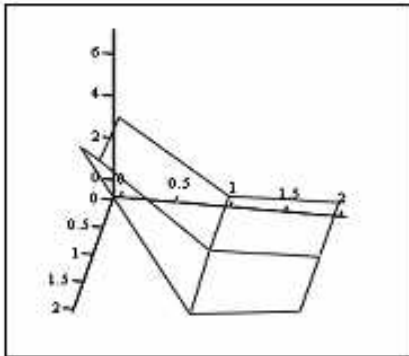
Les figures ci-dessous représentent respectivement :

- La discrétisation ou la décomposition en facettes, des cinq premières différentes parties (schéma de gauche).
- la simulation des plans de cisaillement que subirait la bande de terre sous l'action des différentes facettes (schéma de droite).

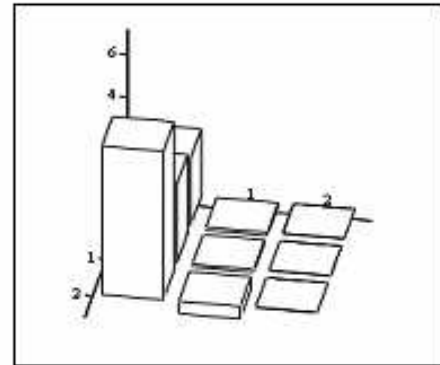
Ces trois représentations simulent les plans de déformation de la bande de terre sur la surface active du corps de charrue étudié et ce respectivement sur les trois plans de travail (xoy, yoz et xoz) et pour les différents tronçons.

- Premier tronçon de surface (y varie de 0 à 4 cm)

$$X := \begin{pmatrix} 3.153 & -0.146 & 0.021 \\ 3.69 & -0.136 & 0.019 \\ 6.953 & -0.584 & 0.027 \end{pmatrix}$$



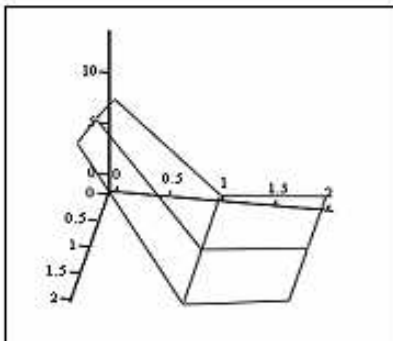
X



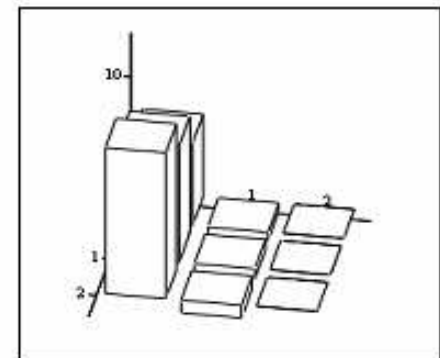
X

- Deuxième tronçon de la surface (y varie de 6 à 10 cm)

$$Y := \begin{pmatrix} 7.754 & -0.740 & 0.03 \\ 10.947 & -0.977 & 0.031 \\ 13.713 & -1.205 & 0.034 \end{pmatrix}$$



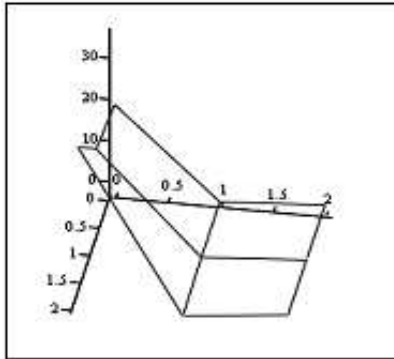
Y



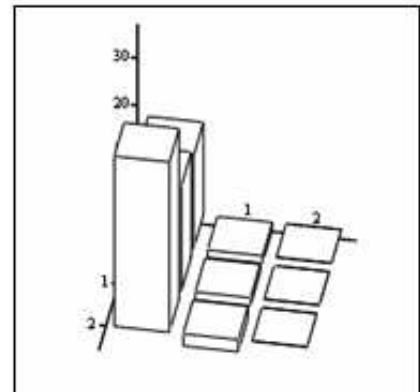
Y

- Troisième tronçon de la surface (y varie de 12 à 16 cm)

$$Z := \begin{pmatrix} 19.650 & -1.576 & 0.038 \\ 22.254 & -1.708 & 0.038 \\ 36.086 & -2.574 & 0.050 \end{pmatrix}$$



z



z

### 6.5.2.1. Analyse et interprétation de ces représentations

Ces différentes représentations montrent clairement la variation de la trajectoire de la bande de terre sur la surface active du corps de charrue à socs et surtout les différents plans de cisaillement que subirait la bande de terre.

Ceci explique le changement de cette trajectoire, qui a un effet sur la déformation de la bande de terre ; en effet celle-ci monte progressivement pour « y » variant de 0 à 24 centimètres, à partir de y=26 cm, nous constatons le retournement de la bande de terre.

Les schémas de gauches (histogrammes) montrent clairement que le plan de cisaillement est très grand à la première partie qui correspond à la partie tranchante du soc qui joue le rôle de coupe et le soulèvement du sol. Ensuite il ya une régression totale parce que il n'ya plus de cisaillement c'est le retournement de la bande de terre sous l'effet de la géométrie de la surface du versoir.

Ces remarques confirment l'effet de la courbure de la surface active du corps de charrue sur la déformation de la bande de terre. Ce qui induit donc une variation de l'effort qui sera demandé pour la déformation de la bande de terre.

### 6.5.3. Analyse du contour de la surface active du corps de charrue.

Si l'analyse de la surface active est intéressante pour la compréhension du mode d'action sur le sol, l'analyse du contour est nécessaire pour l'optimisation de la forme du point de vue énergétique. Le contour de la surface définie en effet la surface de pression sur le sol, plus celle-ci est importante plus l'effort demandé est important. La réduction de cette surface est donc nécessaire pour réduire l'effort, il ne faut cependant pas oublier le coté qualitatif du labour.

La surface étant une surface gauche (spatiale), il est indispensable de faire une décomposition du contour en trois parties,

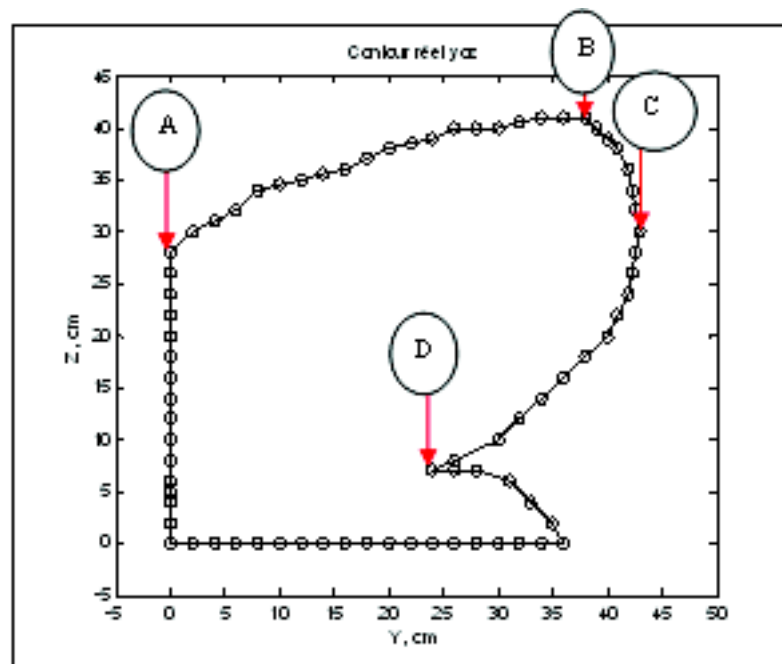
- la première partie est le contour supérieur (segment AB),
- la deuxième est celle de la partie arrière du versoir (segment BC)
- la troisième la partie arrière latérale du versoir (segment CD).



Pour chacune de ces parties de la projection sur le plan transversal perpendiculaire à la direction d'avancement (YOZ), nous affecterons une équation de second degré obtenue après un ajustement par régression polynomiale du second degré. La figure suivante indique les trois parties (segments) du corps de charrue que nous allons ajustés.

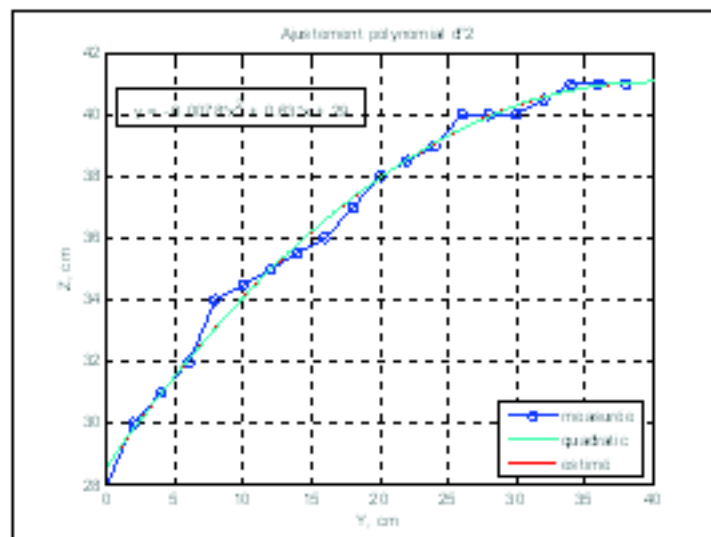
### 6.5.3.1. Ajustement polynomial du contour suivant le plan YOZ

La figure ci-dessous montre les trois parties, AB, BC et CD du contour suivant le yoz.



**Fig.28. Division du contour réel de la surface active du corps de charrue « MAGI »**

L'ajustement polynomial de ces différentes parties du contour a donné les résultats suivants :



**Fig.29 : Ajustement du contour supérieur.**

$$Y = -0,007x^2 + 0,625x + 28,59 \quad R^2 = 0,992 \quad P < 0,0001$$

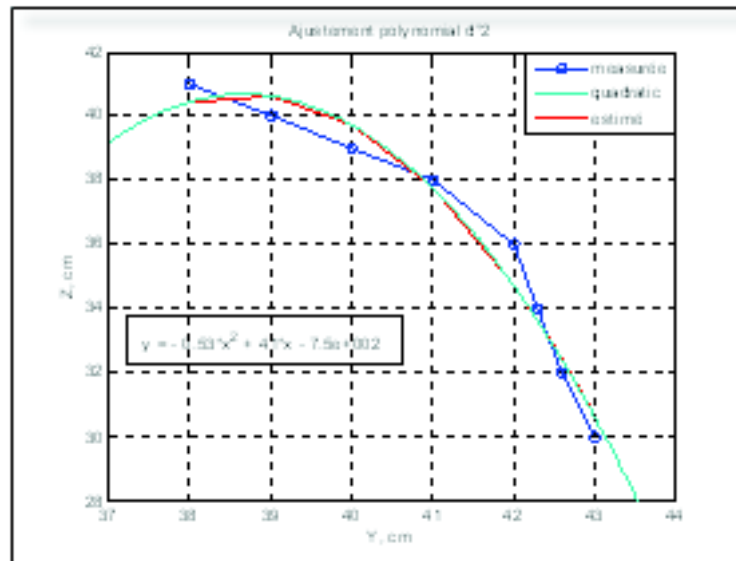


Fig.30 : Ajustement du contour arrière.

$$Y = -0,53x^2 + 41,1x - 753,8 \quad R^2 = 0,967 \quad P < 0,0001$$

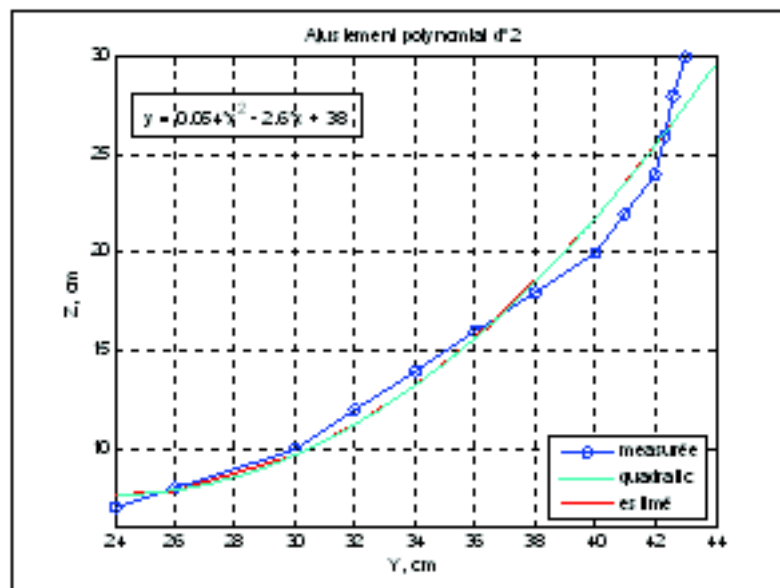
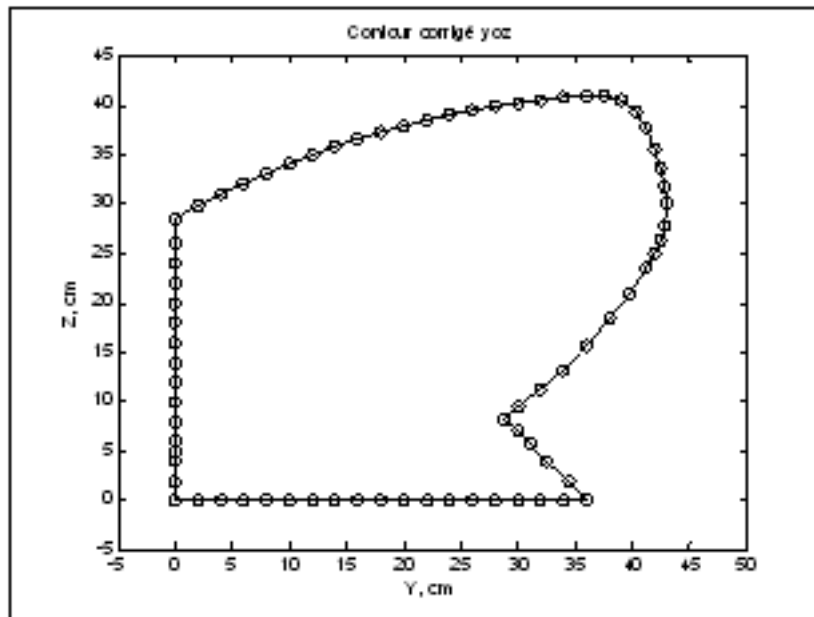


Fig.31: Ajustement du contour latéral.

$$Y = 0,05x^2 - 2,57x + 38,21 \quad R^2 = 0,974 \quad P < 0,0001$$

### 6.5.3.1.1. Analyse des courbes

Cette méthode analytique (ajustement polynomial) a permis de corriger l'erreur de la mesure expérimentale et bien évidemment de rendre la forme du contour beaucoup plus régulière, ceci est illustré par la figure 34. Cette méthode d'ajustement est basée sur l'estimation de l'erreur, après correction des coordonnées et on obtient la forme finale du corps de charrue.

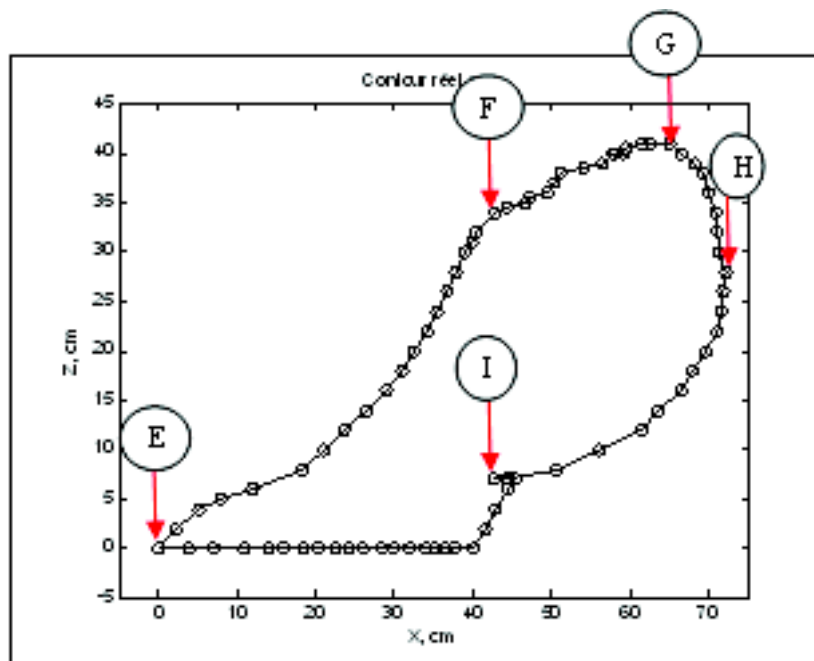


**Fig.32 :** Contour corrigé de la surface active suivant  $yOz$ .

Les équations obtenues sont significatives car le coefficient de détermination est compris entre 0,95 et 0,99 avec une probabilité inférieure à 0,05.

### 6.5.3.2. Ajustement polynomial du contour suivant le plan XOZ

Avec la même procédure que précédemment, on continue la correction de l'erreur expérimentale mais dans ce cas, suivant le plan XOZ. La figure n°33 montre les quatre parties du contour EF, FG, GH et HI.



**Fig.33.** Contour réel de la surface active.

Les résultats sont repris sur les figures suivantes.

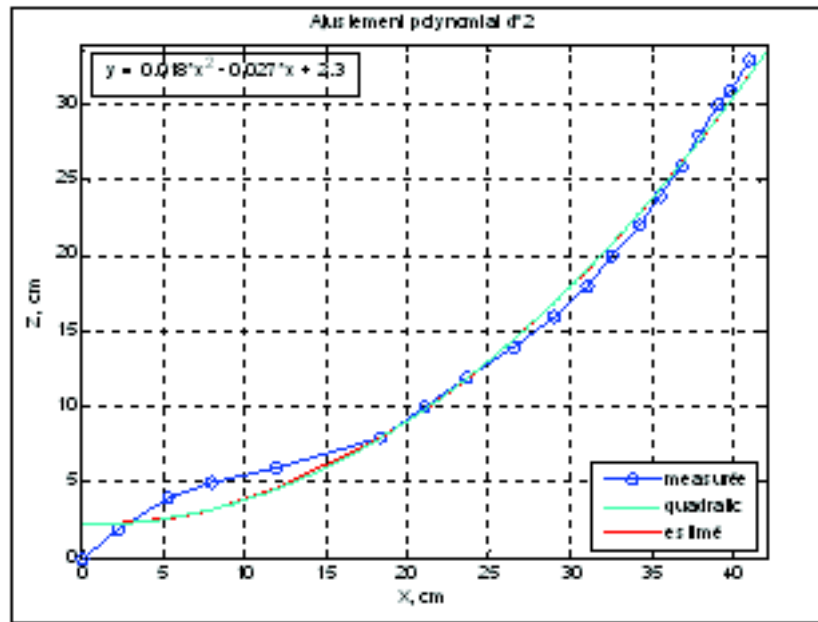


Fig.34: Ajustement du contour partie avant suivant xOz.

$$Y = 0,01x^2 - 0,02x + 2,31 \quad R^2 = 0,99 \quad P < 0,0001$$

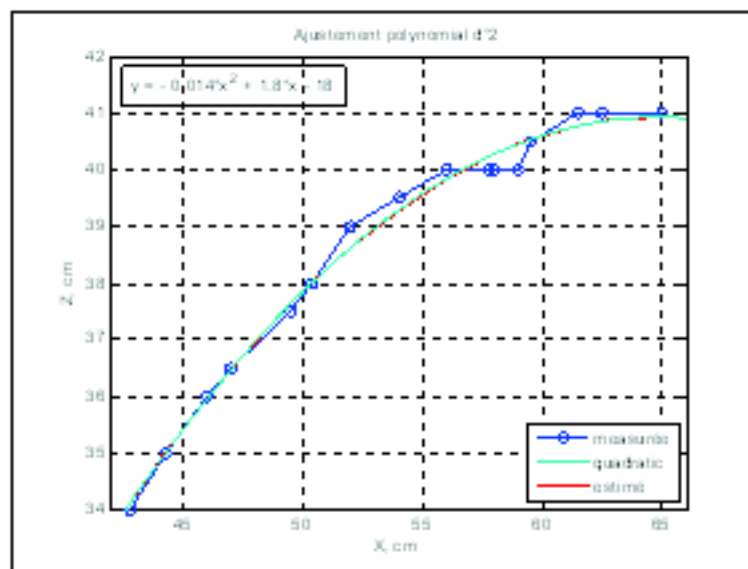
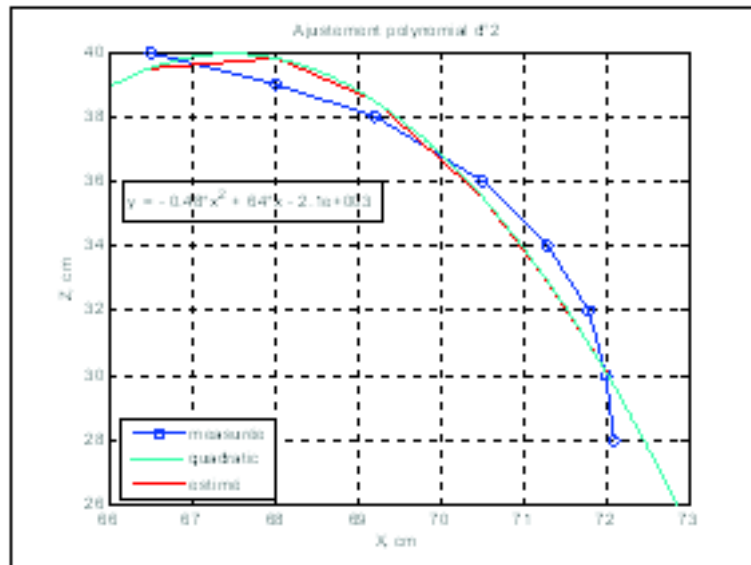


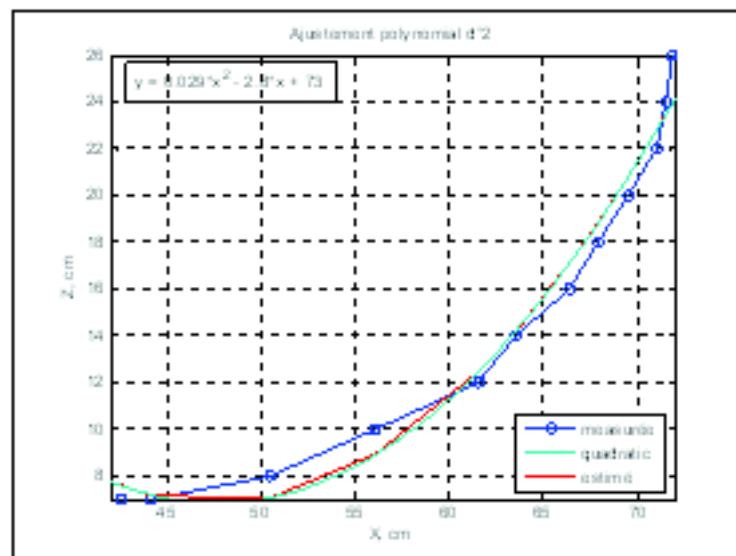
Fig.35 : Ajustement du contour partie supérieure suivant xOz.

$$Y = -0,01x^2 + 1,82x - 18,18 \quad R^2 = 0,99 \quad P < 0,0001$$



**Fig.36:** Ajustement du contour partie arrière suivant xOz.

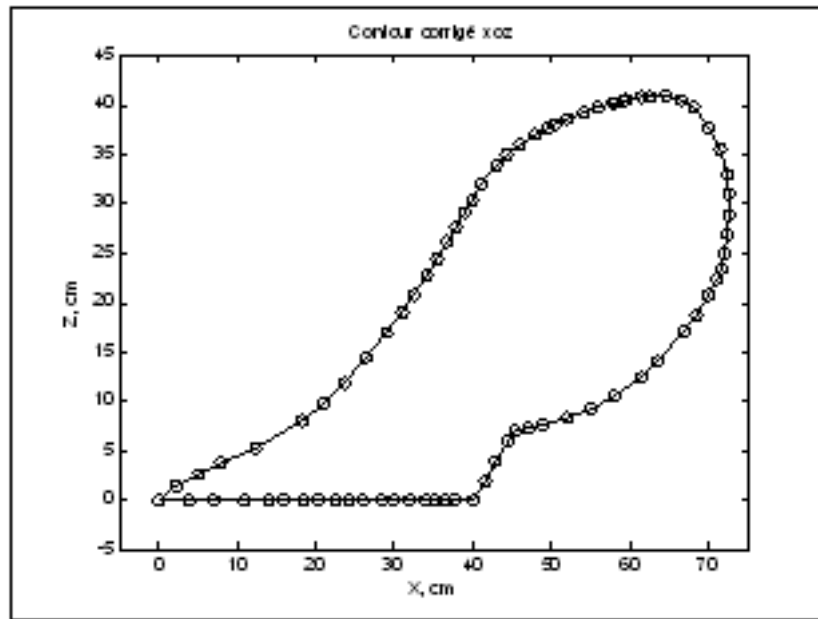
$$Y = 0,03x^2 + 2,79x - 73,4 \quad R^2 = 0,97 \quad P < 0,0001$$



**Fig.37:** Ajustement du contour partie latérale suivant xOz.

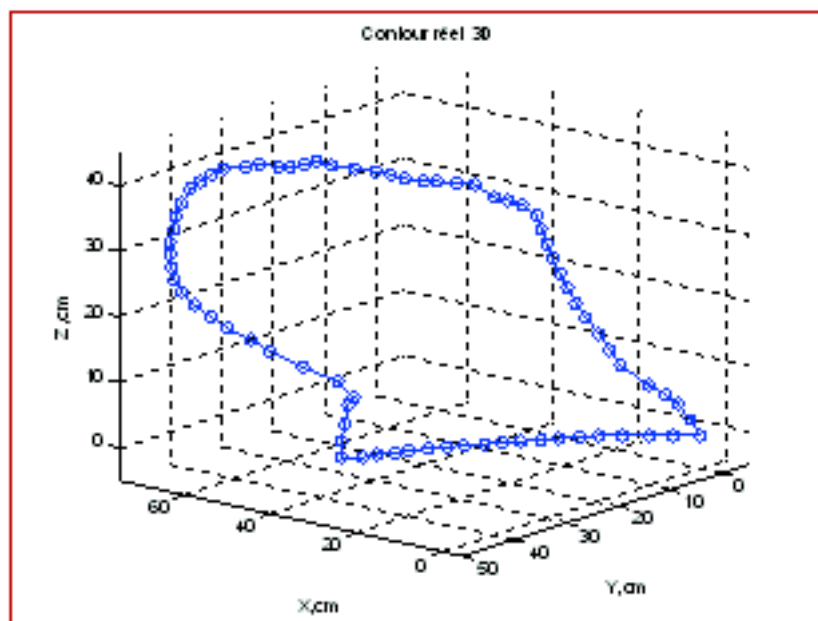
$$Y = -0,47x^2 + 64,17x - 2124 \quad R^2 = 0,95 \quad P < 0,0001$$

Après l'ajustement des trois parties du contour du corps de charrue, nous obtenons une nouvelle forme avec un contour plus régulier qui est représenté dans la figure (38) ci-après :

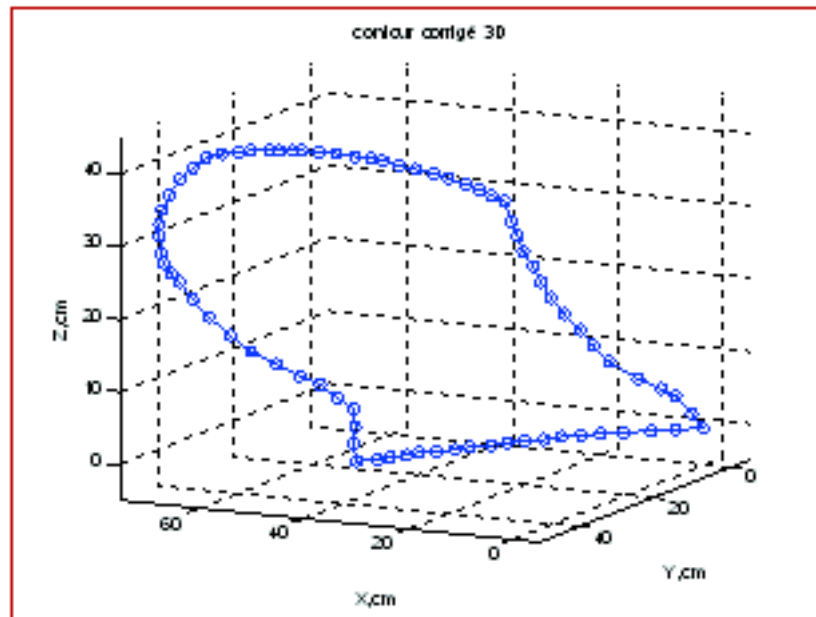


**Fig.38.** Contour corrigé de la surface active suivant XOZ

Dans les figures ci-après nous allons montrés la forme du contour du corps de charrue en trois dimensions avant ajustement (fig.39), c'est-à-dire avec les points prélevés expérimentalement. La deuxième figure suivante (fig.40) représente le contour en 3D après correction finale avec élimination des erreurs expérimentales.



**Fig.39.** Contour réel en 3D.



**Fig.40.** Contour corrigé en 3D.

Cette démarche d'ajustement en partie a contribué à l'amélioration des caractéristiques géométriques du corps de charrue d'une part, et d'autre part, elle facilite la procédure d'optimisation proprement dite qui fera l'objet de la partie qui suit.

L'utilisation des coordonnées, des contours corrigés des surfaces actives, obtenues à partir des équations d'ajustement polynomiaux du second ordre, a permis pour une première étape de corriger le contour de la surface active. L'optimisation de la surface active se fera par la méthode des courbes paramétriques de BEZIER. Cette méthode permettra l'amélioration du contour en supprimant les formes angulaires qui sont souvent sources d'efforts supplémentaires.

## 6.6. Optimisation du contour du corps de charrue

L'objectif de cette optimisation est de déterminer les caractéristiques géométriques définissant la forme de la surface du versoir du corps de charrue admissible ou acceptable pour un travail du sol avec des objectifs recherchés.

L'objectif de notre travail est donc de chercher à trouver ou à donner une forme optimale pour un corps de charrue à soc fabriqué en Algérie (MAGI) avec comme objectif une recherche de la minimisation de l'effort de résistance à la traction (gain de puissance) toute en conservant la qualité du travail qui satisfait les objectifs du labour.

### 6.6.1. Méthode des courbes de Bézier

Du nom d'un ingénieur de Renault (Pierre Bézier) qui développa ce modèle de courbes pour la conception de carrosseries de voitures. C'est dans le domaine de la CAO que les courbes de Bézier ont été inventées et plus précisément dans l'industrie automobile. Dans les années 1960, les machines à commandes numériques sont apparues, il fallait donc décrire les formes (comme les courbes de carrosserie) avec des équations mathématiques.

L'idée révolutionnaire des courbes de Bézier est l'utilisation de points de contrôle et non de points d'interpolation. Cela veut dire que la courbe ne passe pas par les points donnés

mais les approche. Les courbes de Bézier ne sont donc pas des interpolations mais des approximations (Thomas Guillod, 2008).

La relation utilisée à cet effet est :

$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(t) P_i$$

Avec :

$$B_{i,n} = C_i^n t^i (1-t)^{n-i} \quad ; \quad C_i^n = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

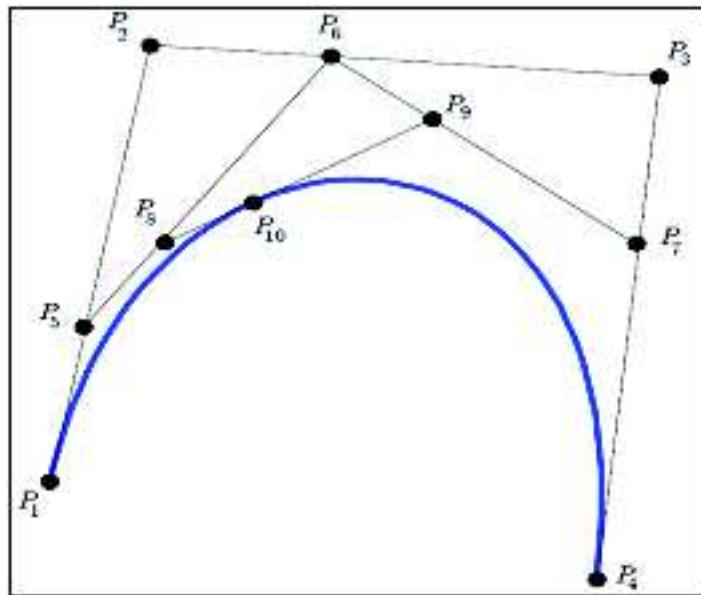
- $B_{i,n}$  sont les polynômes de Bernstein.
- $P_i$  sont les points contrôle.
- $n$  est le nombre de points de contrôle utilisés (degré de la courbe + 1).



- le paramètre  $t$  (nombre d'itérations varie de 0 à 1, par dixième, centième ou millième en relation avec la précision recherchée. C'est-à-dire de 0 à 1 nous avons 10 itérations si  $t$  est égal à 0,1 ou 100 itérations si  $t$  est égal à 0,01 etc... c'est la précision du lissage.
- Principe de la courbe de Bézier est défini comme suit :

La courbe de Bézier cubique est définie par quatre points :  $P_1, P_2, P_3, P_4$ . Elle passe par les points d'extrémité  $P_1$  et  $P_4$  et elle est tangente aux deux segments  $P_1P_2$  et  $P_3P_4$ , les segments  $P_1P_2, P_2P_3$  et  $P_3P_4$  forment le polygone caractéristique de la courbe et les deux points  $P_2$  et  $P_3$  sont les points de contrôle (fig.41). Les points  $P_5, P_6, P_7$  sont situés au tiers des segments  $P_1P_2, P_2P_3$  et  $P_3P_4$  respectivement, on relie ces points entre eux, ensuite on relie les deux points de tiers de ces deux nouveaux segments on obtient la tangente de la partie convexe de la courbe, là où se situe le point  $P_{10}$  où  $t$  égale  $1/3$ . Donc la courbe passe par la tangente dans ce point et se termine par  $P_4$ .





**Fig.41.** Courbe de Bézier avec 4 points de contrôle. (Thomas G., 2008).

- La courbe ne passe pas, en général, par les points de contrôle à l'exception du premier et du dernier.
- la courbe est toujours contenue dans l'enveloppe convexe des points de contrôle.
- une courbe fermée peut-être générée en prenant le même point comme premier et dernier point de contrôle.
- pour deux points de contrôle, l'approximation correspond à une interpolation linéaire.

$$P(t) = (1 - t)P_0 + tP_1.$$

- pour trois points de contrôle :  $P(t) = (1 - t)^2 P_0 + 2t(1 - t)P_1 + t^2 P_2.$
- pour quatre points de contrôle (Bézier cubiques) :

$$P(t) = (1 - t)^3 P_0 + 3t(1 - t)^2 P_1 + 3t^2(1 - t)P_2 + t^3 P_3.$$

### 6.6.2. Utilisation des courbes de Bézier

Nous avons utilisés la méthode de courbe de Bézier pour son utilité et sa précision dans les formes en composition graphiques et géométriques.

L'application du principe des courbes de Bézier a été faite après l'ajustement du contour du corps de charrue, c'est-à-dire après la minimisation de l'erreur expérimentale, afin de définir la surface de pression suivant les trois plans.

L'intérêt de ces courbes est particulièrement de réduire la surface active et d'améliorer en même temps le contour de la surface active du corps de charrue à socs. Pour cela l'utilisation d'un programme informatique (Mathcad) a été nécessaire. Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures suivantes :

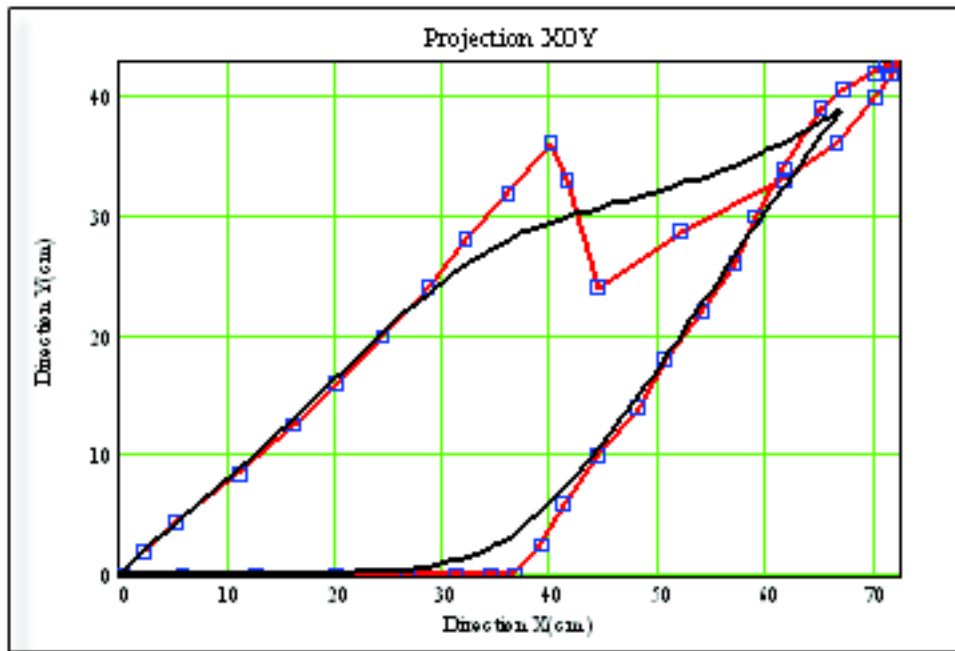


Fig. 42 : Projection du contour de charrue sur le plan XOY.

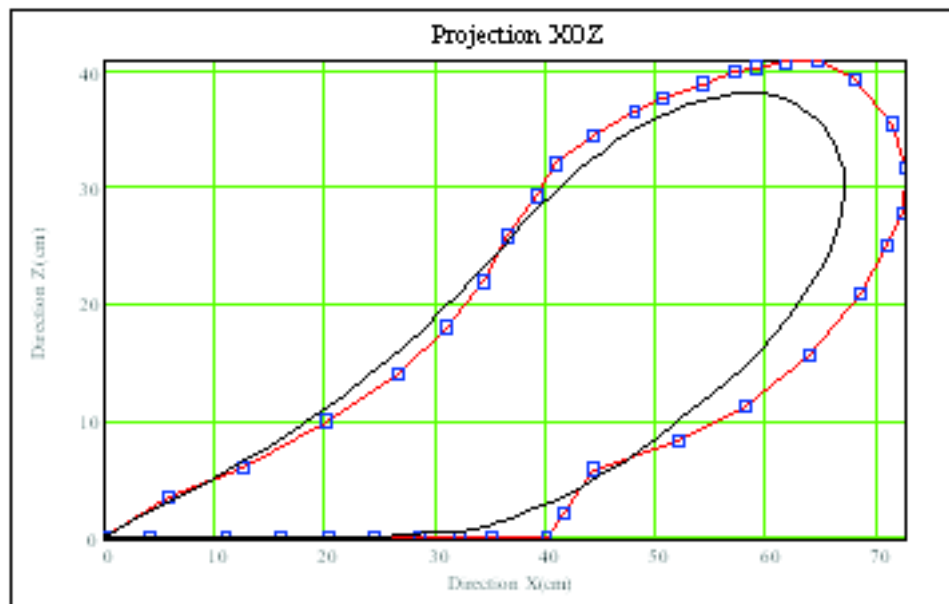
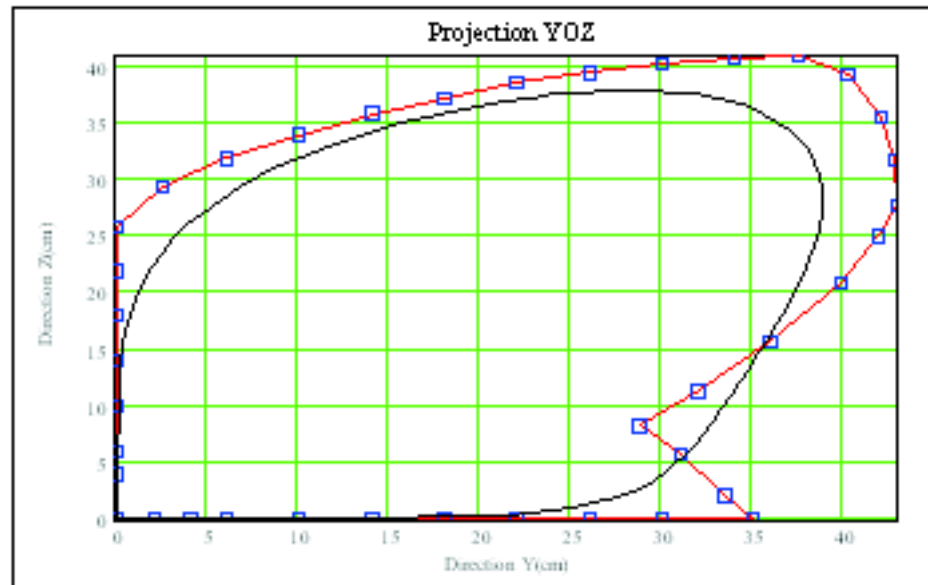
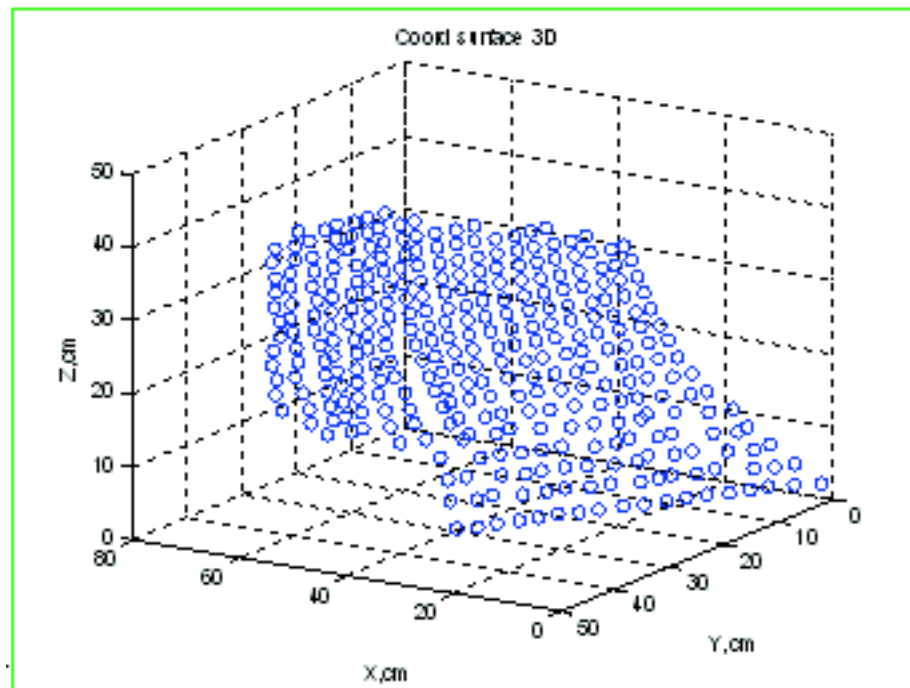


Fig. 43: Projection du contour de charrue sur le plan XOZ.

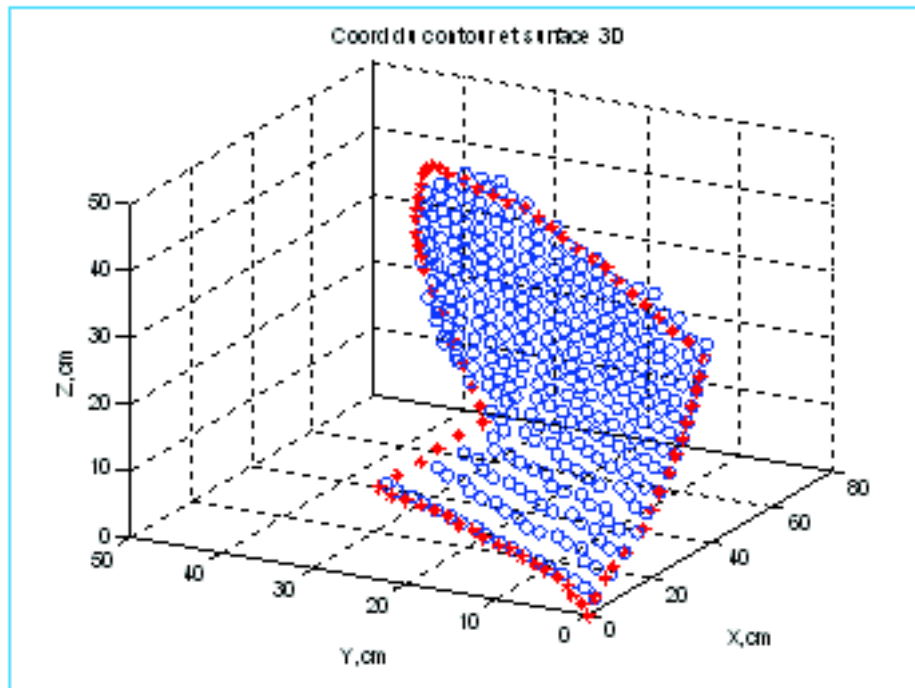


**Fig. 44 :** Projection du contour de charrue sur le plan YOZ.

Après la finalisation de la forme du contour, nous passons à la représentation géométrique des points de la surface active du corps de charrue à socs en 3D.



**Fig.45.** Points des coordonnées de la surface active du corps de charrue en 3D.



**Fig.46.** Points des coordonnées de la surface active et du contour du corps de charrue en 3D.

· Analyse des résultats

Les différentes représentations du contour optimisé avec courbe de Bézier suivant les trois plans, montrent qu'il y a une diminution de la surface active ce qui entraîne une diminution de la surface de pression du corps de charrue sur le sol, par conséquent un abaissement du centre de gravité. Cette modification des caractéristiques géométrique est très importante pour l'amélioration des indices qualitatifs et énergétiques de travail du sol.

**6.6.3. Equation de la surface active du corps de charrue MAGI**

La méthode utilisée est la méthode analytique, pour cela un programme informatique a été utilisé (MATLAB). (Annexe IV). Ce programme a permis, en premier étape, une interpolation cubique en utilisant les coordonnées des points de la surface active (annexe I) qui est représenté dans la figure (47). En deuxième étape, nous avons établis un autre programme informatique qui nous a permis de faire un ajustement polynomial du deuxième ordre et d'établir un model mathématique représentant la surface active du corps de charrue (figure 48).

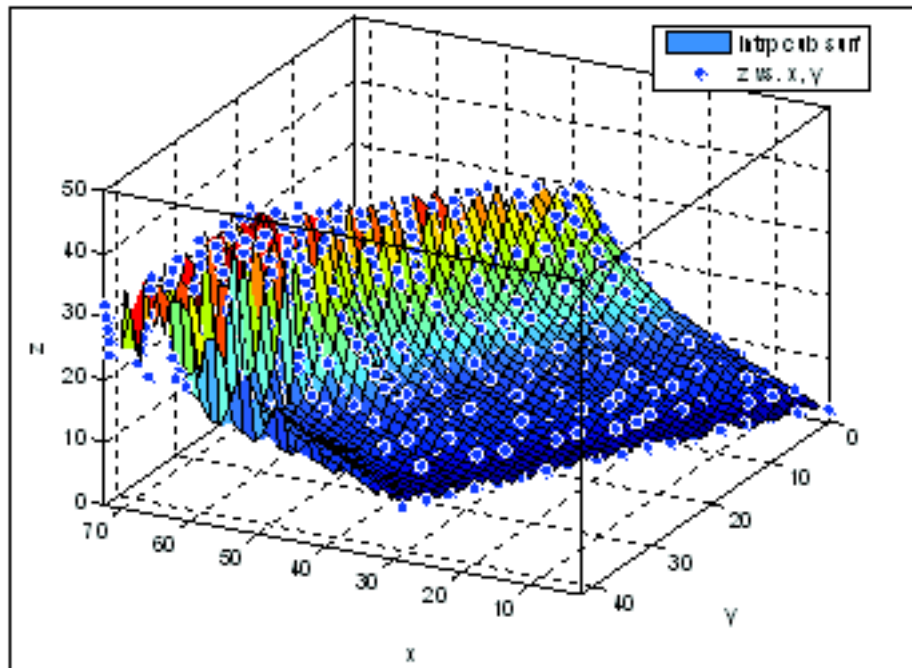


Fig.47. Interpolation cubique de la surface active du corps de charrue MAGI.

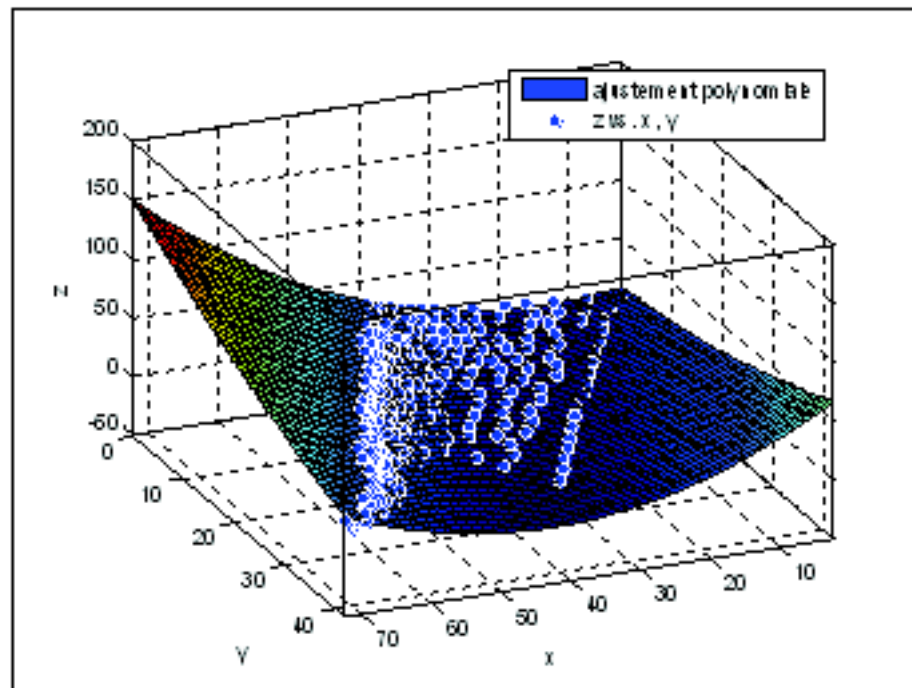


Fig. 48. Ajustement polynomiale d°2 de la surface active du corps de charrue MAGI.

A l'aide du programme MATLAB, nous avons de réalisé un model mathématique de la surface du corps de charrue MAGI, le principe utilisé par MATLAB est celui d'un ajustement polynomiale du second degré des points de sa surfaces actives. Le résultat est illustré par la figure 51. Le model mathématique est défini par la relation suivante:

$$Z=f(x,y) = p00 + p10*x + p01*y + p20*x^2 + p11*x*y + p02*y^2$$

$$p00 = 11.75 ; p10 = -1.11 ; p01 = 0.65 \quad p20 = 0.04 ; p11 = -0.05 ; p02 = 0.02$$

En remplaçant les coefficients on obtient l'équation suivante:

$$Z = F(x,y) = 11.75 - 1.11x + 0.65y + 0.04x^2 - 0.05xy + 0.02y^2$$

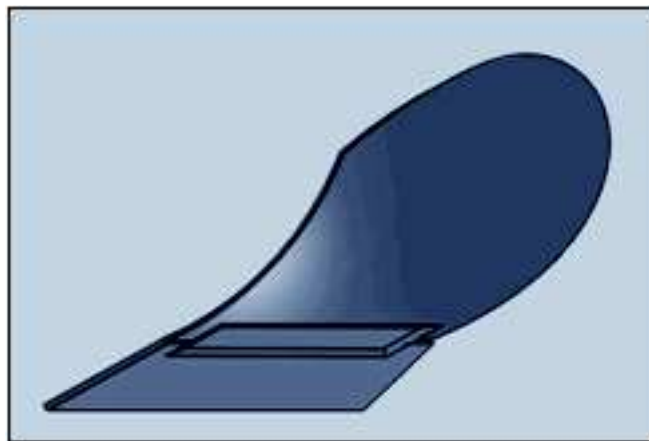
Avec  $R^2 = 0.87$ , pour une surface gauche, cette valeur justifie la validité de l'équation.

## 6.7. Conception du corps de charrue à socs

---

Le développement des outils informatiques et des logiciels destinés à la conception mécanique Assisté par Ordinateur (CAO) ont aidé considérablement à leur réalisation.

L'utilisation du programme informatique SolidWorks a permis de réaliser une simple conception géométrique du corps de charrue à l'aide des données numériques expérimentales obtenues avec l'utilisation du profilographe. Cette opération est basée premièrement sur une approximation géométrique à l'aide de la méthode des courbes paramétriques de Bézier. Cet outil à nous permis de faire un contrôle et une modification rapide de la forme de la surface active grâce au paramétrage de points de contrôles cités ci-dessus. Le model conçu du corps MAGI qui sera étudié son comportement mécanique est représenté dans la figure suivante :



*Fig.49. Model du corps de charrue MAGI.*

## Conclusion

---

Dans cette partie nous avons obtenu une méthode de caractérisation et d'analyse des surfaces actives des pièces travaillantes des outils aratoires les plus couramment utilisés sur nos terres agricoles.

Cette méthode géométrique est basée principalement sur des données numériques déterminés à partir des modèles réels fabriqués dans des entreprises locales.

Une optimisation géométrique de la forme du corps de charrue a été également réalisée par l'utilisation des courbes paramétriques de Bézier, ce qui a permis de minimiser la surface de pression de la surface active.

Ensuite une équation mathématique illustrant la surface active de la forme MAGI a été proposée.

---

Afin d'avoir une base de données scientifique complète pour la fabrication des outils aratoires, il est nécessaire de faire une analyse sur le comportement mécanique de la surface active sous l'action d'une charges simulant la force de traction sur le sol, c'est ce qui fera l'objet de la partie qui suit.

## **Chap.7.Simulation du mode d'action de deux formes de surfaces actives de corps de charrue à socs**

### **Introduction**

---

Ce chapitre portera sur une étude comparative de deux formes de corps charrues à socs fabriqués en Algérie, MAGI et ENPMA.

Notre objectif est la réalisation d'une simulation numérique du mode d'action de ces deux formes différentes par la méthode des éléments finis « MEF » avec le code de calcul Cosmos Works sous environnement SolidWorks.

L'étude portera sur la simulation des forces qu'oppose le sol à l'avancement de la charrue à socs pendant le labour.

Pour satisfaire ces exigences, un modèle analytique basé sur l'utilisation de la méthode des éléments finis (MEF) semble être l'outil le plus adéquat pour fournir une solution théorique du phénomène du mode d'action de la surface active du corps de charrue sur le sol avec des conditions de chargement très variées.

### **7.1. Travaux antérieurs**

---

Yong et Hanna (1977) ont été les premiers à proposer un modèle en éléments finis pour simuler une déformation plane bidimensionnelle du sol sous l'action d'une lame large, leur modèle considère l'effet de la rupture progressive du sol et suppose une déformation plane de la terre.

Desai (cité dans Chi et Kushawa, 1991) a appliqué la MEF pour un problème de déformation tridimensionnelle.

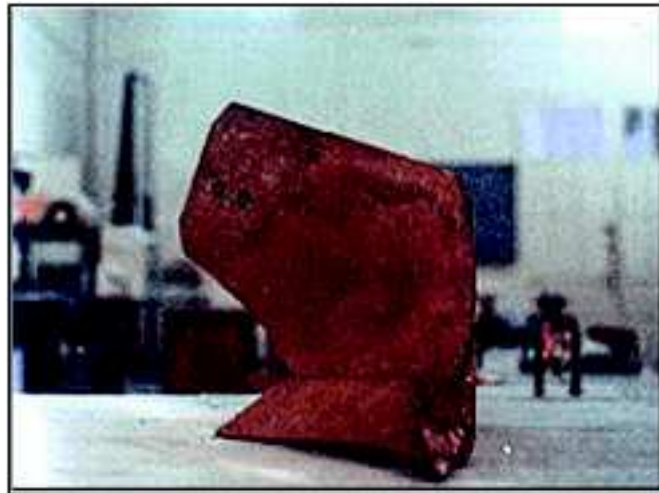
Formato ; Faugno et Paolillo (2005) ont été constaté que la surface active est subi une pression très élevé, d'environ 0,03 MPa au niveau de la pointe du soc et de 0,0025 MPa au niveau de la partie supérieure de la surface active (versoir). L'intensité de la pression est variable suivant les trois axes X, Y et Z, d'une façon décroissante. Donc, la pression est due particulièrement à la profondeur et la largeur de travail.

### **7.2. Choix de la forme des deux corps de charrue à socs**

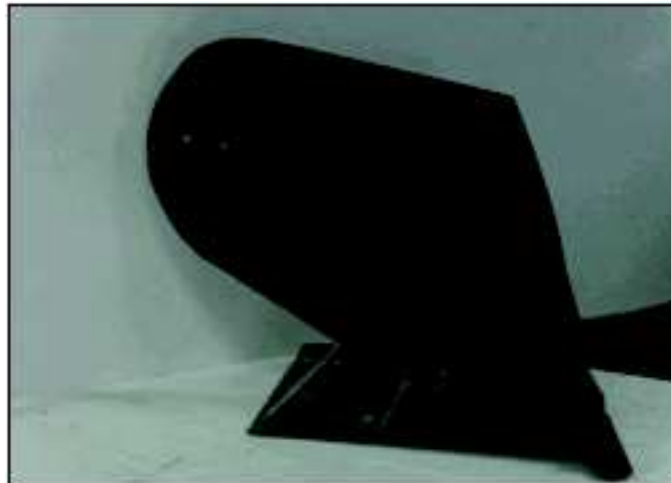
---

Nous avons choisi deux corps de formes différentes, ces outils sont fabriqués en Algérie et sont les plus répandus sur le marché interne. Ils sont caractérisés par deux formes de versoires, l'un cylindrique fabriqué par ENPMA pour lequel les données sont établies sur un modèle réduit à l'échelle 1/2 de la taille réelle (Fig.50), l'autre cylindro-hélicoïdale,

fabriqué par MAGI, cylindrique à l'avant, hélicoïdale en milieu et relativement plane à l'arrière (Fig.51).



*Fig.50. Corps de charrue forme ENPMA.*



*Fig.51. Corps de charrue forme MAGI.*

### 7.2.1. Analyse des deux formes de la charrue à socs

Dans cette analyse, nous nous intéressons sur une comparaison entre le corps de charrue MAGI qui est de forme cylindro-hélicoïdale avec celle de la forme ENPMA (forme cylindrique) à partir des coordonnées des points de mesure des surfaces actives, les courbures à différents des deux versoirs. Le tableau suivant récapitule les équations des courbures des trois niveaux pour les deux types de versoirs :

Niveaux	ENPMA	MAGI
N 1	$Y = 10.91 - 0.31x - 0.001x^2$	$Y = -2959.3 + 94.51x - 0.74x^2$
N 2	$Y = 14.39 - 0.73x - 0.01x^2$	$Y = 67.5 - 3.91x + 0.06x^2$
N 3	$Y = 3.15 - 0.98x + 0.02x^2$	$Y = 6.95 - 0.58x + 0.03x^2$

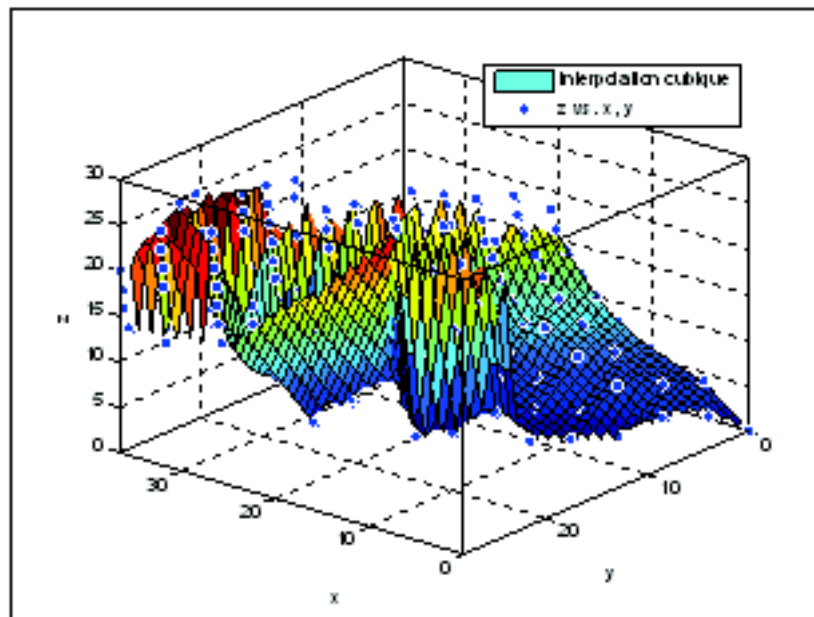


Les travaux de Amara (2007) sur le corps de charrue à socs de type ENPMA montrent que il a une forme cylindrique et la courbure de sa surface active est moins accentuée par rapport au forme SACRA.

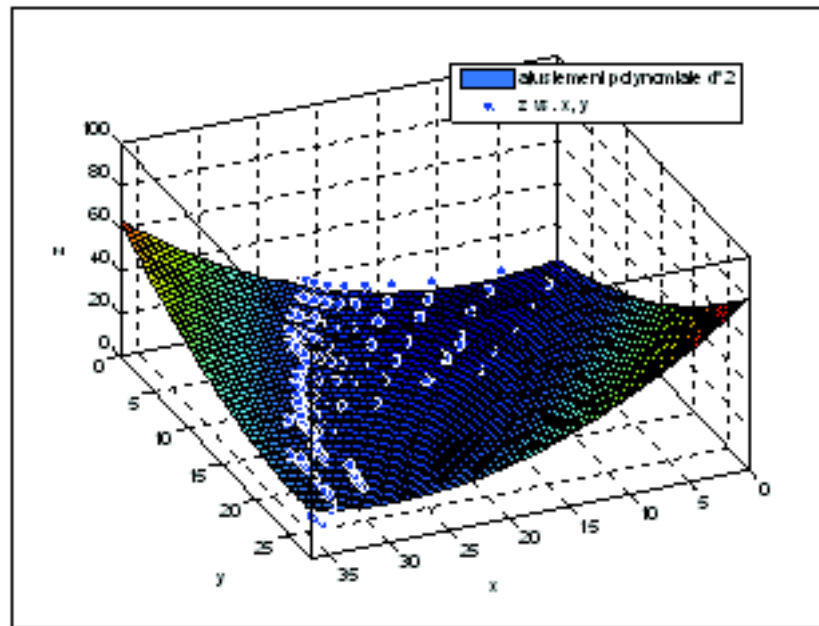
D'après l'étude que nous avons faite au début de cette partie sur la courbure de la surface active du corps MAGI, et selon l'étude de Amara (2007) dans sa thèse de doctorat, nous constatons que, la variation de la courbure de la forme MAGI est plus importante que celle de la forme ENPMA. Ceux-ci implique que, ces grandes variations ont un effet sur la déformation de la bande de terre et plus particulièrement sur le retournement et donc sur l'enfouissement des débris végétaux. Cette modélisation permet de voir la forme de la surface sur laquelle se déplacera la bande de terre pendant le travail, et d'en voir la déformation du sol, celle-ci sera plus accentuée sur la surface de la forme MAGI particulièrement à l'arrière du versoir. C'est ce qui définit le retournement de la bande de terre qui devra être plus important sous l'action de la forme MAGI.

### 7.3. Equation de la forme ENPMA.

Dans ce cas, on a appliqué la méthode numérique à l'aide du programme informatique Matlab 7.9 avec l'utilisation du coordonnées de la surface du corps de charrue ENPMA comme des données dans le programme cité en annexe IV. L'exécution du programme nous a donné les modèles géométrique représente respectivement, une interpolation cubique (figure 52) et un ajustement polynomiale du second ordre (figure 53) plus le model mathématique de la surface active.



*Fig.52. Interpolation cubique de la surface active du corps de charrue ENPMA.*



**Fig. 53.** Ajustement polynômiale d'2 de la surface active du corps de charrue ENPMA.

$$F(x,y) = p00 + p10*x + p01*y + p20*x^2 + p11*x*y + p02*y^2$$

Avec  $R^2 = 0.52$

Les coefficients du model sont définis comme suit :

$$p00 = 3.99 ; p10 = -0.99 ; p01 = 1.16$$

$$p20 = 0.07 ; p11 = -0.12 ; p02 = 0.06$$

En remplaçant les coefficients par le model on obtient l'équation suivante:

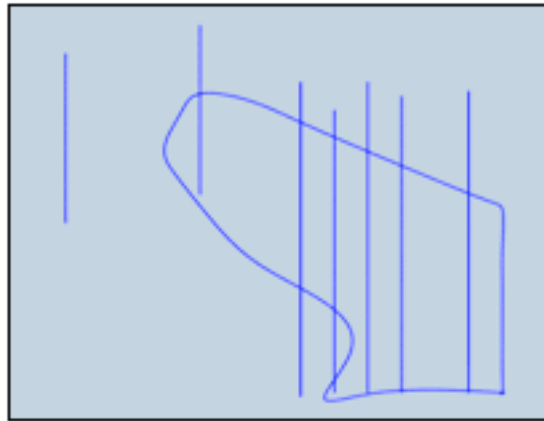
$$f(x,y) = 3.99 - 0.99*x + 1.16*y + 0.07*x^2 - 0.12*x*y + 0.06*y^2$$

$$Z = F(x,y) = 3.99 - 0.99 x + 1.16 y + 0.07 x^2 - 0.12xy + 0.06 y^2$$

## 7.4. Conception de la forme du corps ENPMA

Les annexes I et II récapitulent les coordonnées des points relevés sur la surface d'un versoir prototype à l'échelle 1/2 type ENPMA cylindrique (Amara, 2007) et le versoir cylindro-hélicoïdale type MAGI (échelle 1).

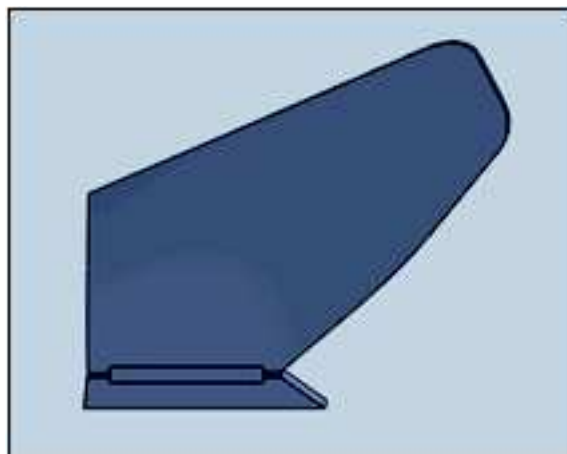
Dans notre travail, les points ont été ordonnés suivant « y » est constante. La distance entre les lignes est choisie égale à 2 cm pour le versoir ENPMA et 6 cm pour le versoir MAGI. Les deux références fournissent également les coordonnées des points des contours de ces versoirs (annexe III et VI). L'utilisation du SolidWorks a permis de visualiser les lignes relevées sur chacun d'eux (Fig.54).



**Fig.54.** Lignes des courbures de la surface du corps ENPMA.

Ces lignes sont ensuite lissées en courbes de B-Spline en choisissant le principe de l'approximation des points de contrôle (Fig.54)

La fonction de Surface remplie disponible dans le logiciel SolidWorks, permet de définir les frontières de la surface à réaliser. Dans notre cas, ce sont les contours du versoir et soc à la fois. Sous la même fonction, l'option Contrôle de la courbure aide à définir la forme de la surface correspondant aux lignes de contrôle établies précédemment. La figure (55) illustre la visualisation de cette surface complète.



**Fig.55.** Le modèle géométrique de la charrue à soc ENPMA

## 7.5. Méthodologie d'analyse des contraintes

Afin de réaliser une analyse de la réaction mécanique d'un corps de charrue sous l'effet d'une force appliquée, l'utilisation de la méthode « MEF » du logiciel SolidWorks a été nécessaire. Ce module est destiné à faire des calculs de contraintes de déformation et de leurs répartitions sur la surface de la pièce étudié.

Le but de cette partie est de montrer les possibilités du choix des matériaux avec logiciel approprié, dans notre cas SolidWorks.

Plusieurs études ont montré que la charrue à socs subit une force importante pendant le travail. L'estimation de cette force constitue la préoccupation majeure de plusieurs

recherches. Des travaux ont développé des approches afin d'évaluer cette force et ses composantes.

Les différentes étapes de la simulation sont résumées comme suit :

- Tracer la forme du corps (conception géométrique) et choisir le matériau de sa fabrication : forme de deux corps MAGI et ENPMA fabriqué localement dont le matériau choisi avec ses caractéristique mécaniques sont désignés ci-après.
- Fixer les pièces par des appuis fixes : on a choisi les points de fixation avec l'étau.
- Appliquer un effort dans l'axe des « X » de la force de traction « Ft » de 5000 N. cette valeur est prise par défaut comme étant une charge unitaire.

## 7.6. Propriétés de masse pour les deux corps

Le versoir MAGI a une épaisseur de 6mm et 1 cm pour le soc. Quant au modèle ENPMA (prototype), son épaisseur ne correspond pas au modèle réel. Nous allons alors admettre la même épaisseur de 6 mm pour ce type représenté à l'échelle réelle dans le but de pouvoir comparer les résultats de simulation par la Méthode des Eléments Finis obtenus sur les deux corps de charrue.

L'exécution de la commande d'évaluation propriétés de masse dans le logiciel SolidWorks permet de déterminer la propriété physique de chaque modèle. Le tableau suivant récapitule ses caractéristiques géométriques:

Propriétés de masses	MAGI	ENPMA
Surface (m <sup>2</sup> )	0.55	0.31
Centre de gravité (m)	X = 0.41 Y = 0.18 Z = 0.14	X = 0.33 Y = 0.16 Z = 0.17
Moment d'inertie (Kg.m <sup>2</sup> )	I <sub>x</sub> = (0.78, 0.44, 0.44) I <sub>y</sub> = (0.08, 0.63, -0.77) I <sub>z</sub> = (-0.62, 0.63, 0.46)	I <sub>x</sub> = (0.61, 0.50, 0.62) I <sub>y</sub> = (0.19, -0.84, 0.50) I <sub>z</sub> = (0.77, -0.18, -0.61)

**Tab. 6:** Différentes propriétés de masse pour les deux corps de charrue.

D'après le tableau, on constate que la surface du corps de charrue MAGI (0.55 m<sup>2</sup>) est plus importante que celle du model ENPMA (0.31m<sup>2</sup>), On peut dire que le volume de la terre travaillée par la forme MAGI est plus important, ce qui nécessite plus de puissance et automatiquement plus d'énergie de travail.

On a remarqué également que le centre de gravité est situé plus bas pour la forme MAGI. L'abaissement du centre de gravité signifie aussi un abaissement du point d'application de la force de résistance à la traction, qui permettra d'augmenter le moment de cette force par rapport au centre de gravité de la bande de terre et facilitera le retournement de celle-ci, d'où l'intérêt sur l'enfouissement des résidus de végétaux.

### 7.6.1. Choix du matériau

- Cas de l'acier 1023 TC :

Le choix de l'acier est similaire au matériau avec lequel fabriqué au niveau de MAGI et ENPMA. L'acier utilisé par MAGI est 45S7, Dans notre étude, on a choisi deux types de matériaux, cas de l'acier «1023 » et l'autre c'est l'acier « 201 » SS de la bibliothèque de SolidWorks, dont les caractéristiques données ci-après sont les plus proches des aciers utilisés en pratique.

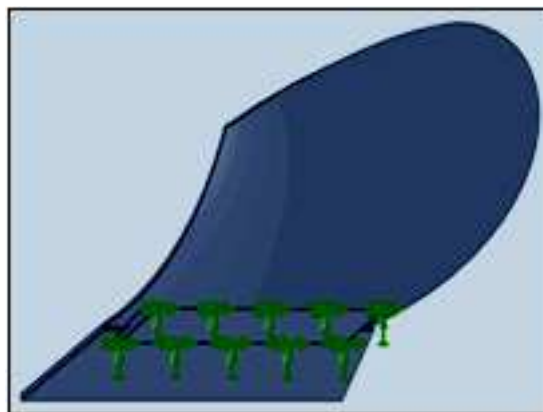
Module d'élasticité	205000 N/mm <sup>2</sup>
Coefficient de Poisson	0.29
Module de cisaillement	80000 N/mm <sup>2</sup>
Masse volumique	7,858 kg/dm <sup>3</sup>
Limite de traction	425.00 N/mm <sup>2</sup>
Limite d'élasticité	282.69 N/mm <sup>2</sup>

**Tab.7:** Caractéristique du métal1023 Tôle d'acier au carbone

## 7.7. Point d'application

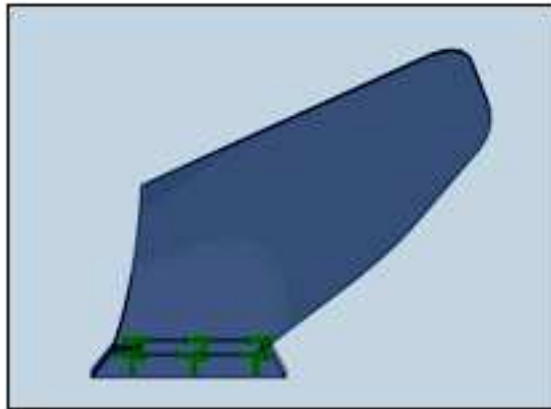
Selon Kuczewski (1978) cité dans Amara (2007), le point d'application de la force de traction s'applique en un point situé au tiers de la profondeur de travail à partir du fond de labour et à une distance d'un tiers de la longueur de la partie affûtée du soc à partir de la pointe du corps de charrue. Nous avons déterminé ce point pour les deux corps de charrue étudiés avec une profondeur du travail de 0.15 m.

Concernant les points de fixation (appuis fixe) on a schématisé pour les deux corps de charrue sur les figures suivants :

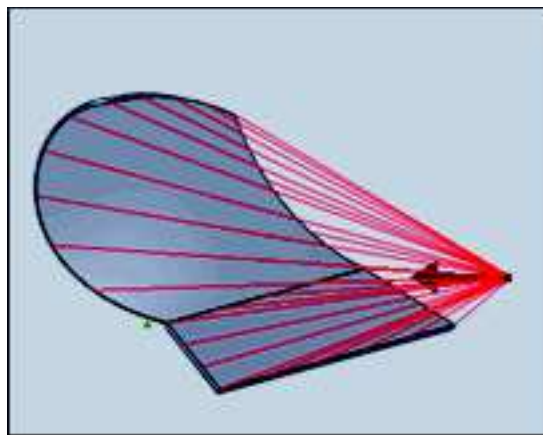


**Fig.56a-b.** Les points de fixation (appuis fixe).

a- MAGI

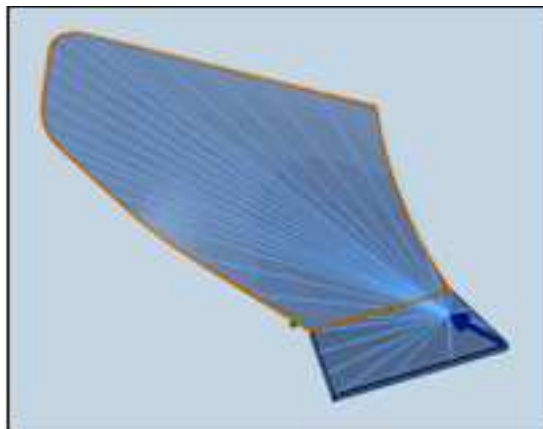


b-ENPMA



*Fig.57a-b. Les points d'application sur les deux corps de charrue.*

(a)



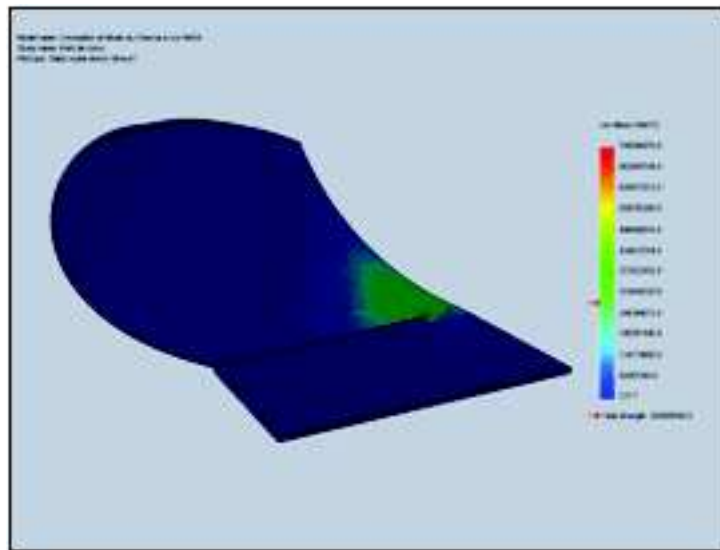
(b)

## 7.8. Résultats de la simulation

---

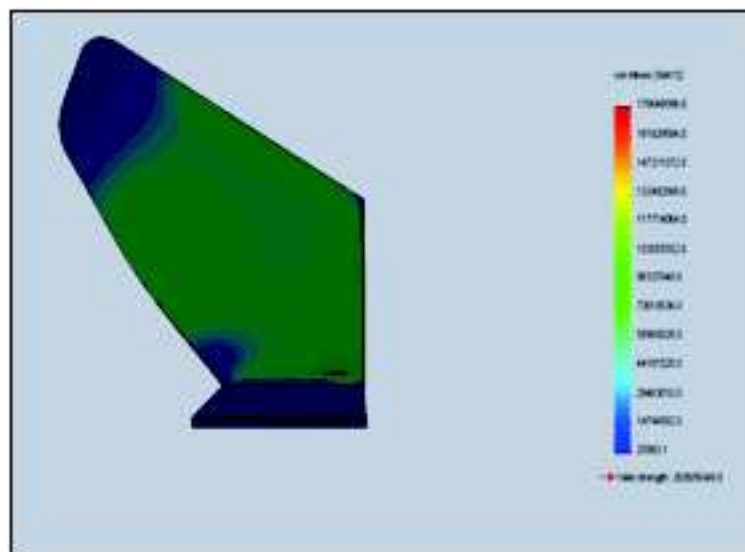
Lorsqu'on introduit toutes les opérations citées précédemment dans la boîte de dialogue de la simulation « MEF » sous environnement SolidWorks, on exécute l'opération du calcul qui va nous donner par la suite la synthèse des contraintes de déformation maximales et

minimales pour les deux corps de charrue à socs. Les valeurs des ces contraintes sont représentées dans les figures suivantes :



**Fig.58.** Contraintes de Von mises du point d'application de la force.

(MAGI)



(ENPMA)

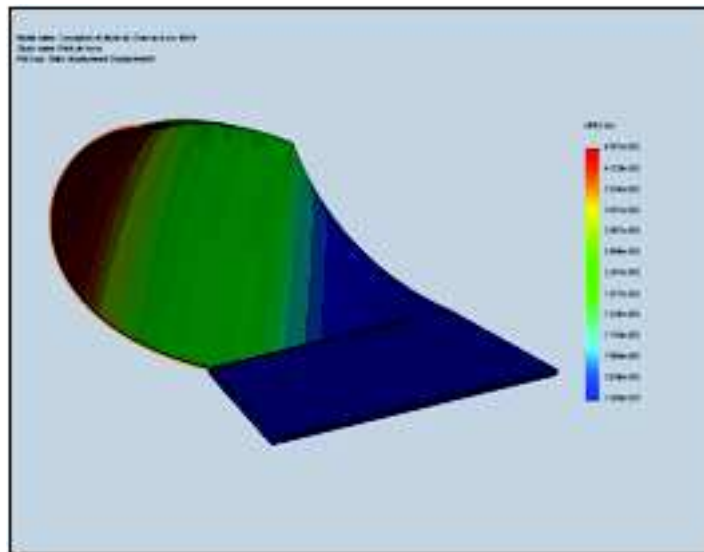
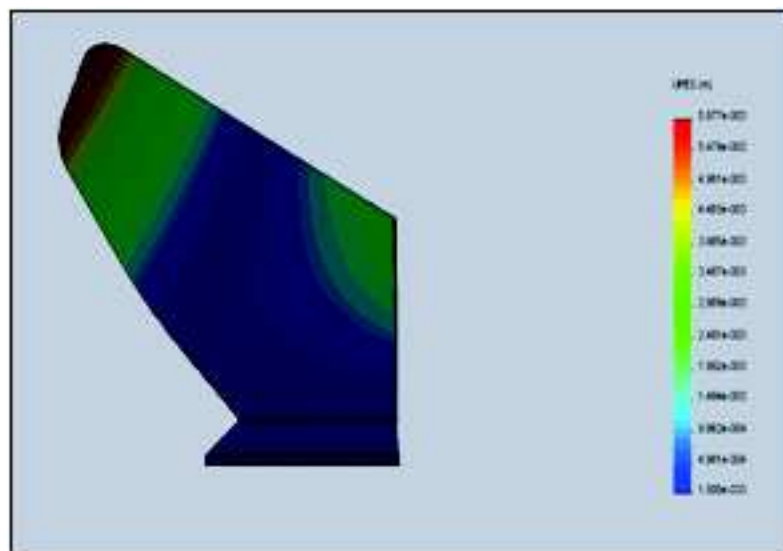


Fig.59. Déplacement au niveau de la surface active.

(MAGI)



(ENPMA)

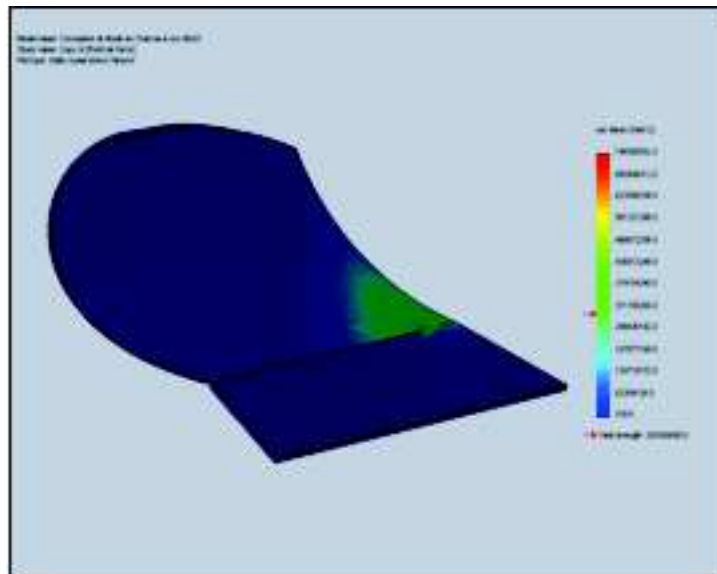
- Cas de l'acier 201 SS :

Dans ce cas on a choisi d'autre type de matériau qui est proche au matériau avec lequel fabriqué les deux corps de charrue, dont ses caractéristiques sont enregistrés dans le tableau suivant :

Module d'élasticité	207000 N/mm <sup>2</sup>
Coefficient de Poisson	0.27
Masse volumique	7,859 kg/dm <sup>3</sup>
Limite de traction	685.00 N/mm <sup>2</sup>

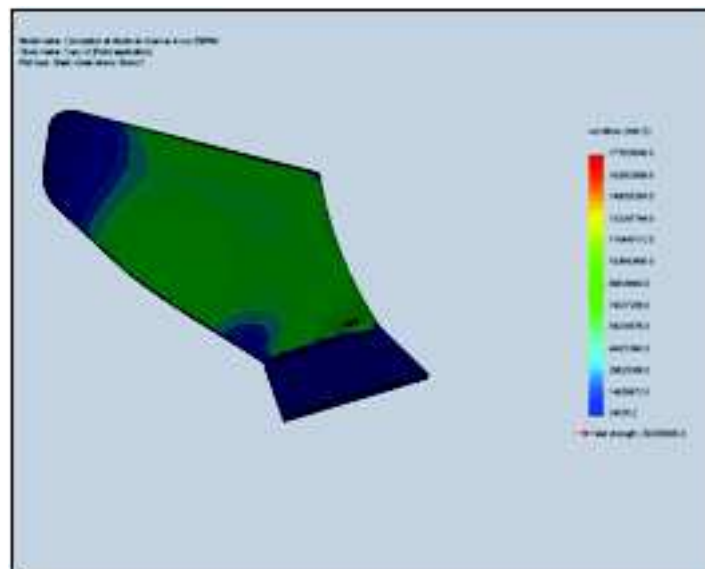
Tab. 8: Caractéristique du métal 201 SS.



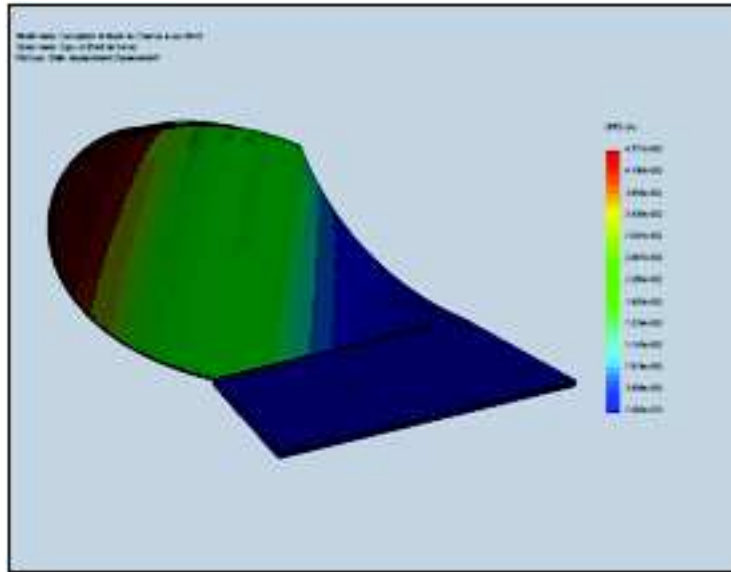


**Fig.60.** Contraintes de Von mises du point d'application de la force.

(MAGI)

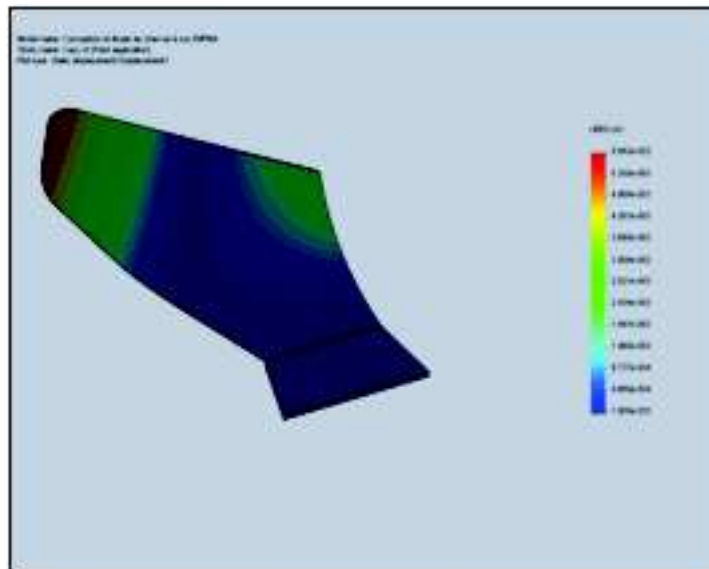


(ENPMA)



**Fig.61.** Déplacement au niveau de la surface active.

(MAGI)



(ENPMA)

## 7.9. Interprétation des résultats

---

A partir des résultats de la simulation schématique, une synthèse des contraintes de Von mises et le déplacement sont récapitulés dans le tableau suivant :

Contraintes de déformation Pour M1 et M2	MAGI		ENPMA	
	1023 TC	201 SS	1023 TC	201 SS
Von mise maximale (N/mm <sup>2</sup> )	745.04	748.31	176.65	177.65
Von mise minimale (N/mm <sup>2</sup> )	62.08	62.35	14.74	14.83
Déplacement maximale (mm)	46.01	45.71	5.97	5.84
Déplacement minimale (mm)	3.83	3.80	0.49	0.48

**Tab.9 :** Contraintes de Von-mises et le déplacement pour les deux corps de charrue :

D'après le tableau on constate que le corps de charrue MAGI est subit des contraintes très élevé que la forme de la charrue ENPMA, malgré que l'essai a été fait dans les mêmes conditions de travail. Cette très grande différence est due à la surface d'une part, et d'autre part à la géométrie de la surface active des deux corps de charrue, sachant que la surface du corps MAGI est plus grande que celle d'ENPMA et la courbure du corps MAGI est cylindro-hélicoïdale alors que la courbure du corps ENPMA est cylindrique. Ce la signifie que la réaction de la surface MAGI sur la bande de terre sera plus importante, d'où une déformation plus importante du sol qui entraine un meilleur émiettement.

L'aire en rouge dans les deux figures (58, 59, 60, 61) représente une intensité élevé des contrainte de Von mises, cette partie la plus sollicité est correspond pratiquement les points de fixation et effectivement le point d'application de la charge unitaire. Sur le plan réel, la surface en couleur rouge correspond le versoir au niveau de joint avec le soc pour les deux corps de charrue. Ce résultat est très logique parce que l'épaisseur du versoir (0.6 cm) est moins importante par rapport au soc (1 cm). Sur le plan pratique et à travers les études de Formato et al (2005) qui ont constatés que le soc est la pièce travaillante la plus sollicité particulièrement par les contraintes de cisaillement, plus les contraintes normales, cela est due à son rôle de coupe et de soulèvement du sol, par contre le versoir est subi particulièrement à des contraintes de traction et/ou compression, ce qu'on n'a pas vu ca sur les résultats de contraintes. Cela est expliqué par l'épaisseur important du soc et sa fixation solide avec les pièces de soutien. Nos résultats ont confirmés par les travaux de recherche sur la simulation de la distribution et l'intensité des contraintes de déformation sur un corps de charrue à socs tel que, Saks E et Heinllo M (2001) qui ont trouvé une valeur maximale de contraintes (621 N/mm<sup>2</sup>) pour une épaisseur du versoir de 5 mm et une valeur minimale (55.3 N/mm<sup>2</sup>) pour une épaisseur du soc de 10 mm.

Concernant le déplacement qui est plus important au niveau de la partie arrière du versoir pour les deux corps de charrue, cela est dû d'une part, à la propriété mécanique de l'acier du versoir qui est caractérisé par une élasticité élevée qui a permis d'amortir la pression exercé par la bande de terre lors du son renversement et d'autre part, à la . Donc il serait plus utile d'augmenter l'épaisseur du versoir et de renforcer sa fixation sur les pièces de soutien cela d'une part et d'autre part il est nécessaire d'utiliser des matériaux plus résistant à la déformation et surtout aux chocs afin de minimiser les usures.

En ce qui concerne le choix du matériau, le résultat de la simulation montre qu'il ya une augmentation des contraintes pour le type d'acier 201 SS par rapport à l'acier 1023 TC, ceci pour les deux forme de corps de charrue. Par contre, il ya une légère diminution de déplacement de la matière. Cela est expliqué par ses caractéristiques mécaniques différentes entre les deux matériaux, sachant que le module d'élasticité et la limite de traction

de l'acier 201 SS est très élevé par rapport à l'acier 1023 TC. Donc on peut dire que l'acier 201 SS est plus résistant aux contraintes de déformation que l'acier 1023 TC.

---

# conclusion générale

Dans ce travail notre étude a porté sur les pièces travaillantes de l'un des outils aratoires les plus utilisés en Algérie. Malgré les nouvelles techniques simplifiées de la préparation du sol présentant des avantages à court terme, le labour restera, sur les sols moyens à lourds, l'une des techniques prioritaire pour la régénération de la structure du sol souvent dégradée par les nombreux passages d'autres machines agricoles du semis à la récolte et surtout pour l'enfouissement des débris végétaux et la lutte contre les mauvaises herbes et les maladies.

Cette étude a été scindée principalement en deux grands chapitres l'un relatif aux indices qualitatifs et l'autre relatif à l'énergie, le premier est destiné à la caractérisation de la surface active du corps MAGI qui englobe à travers de celui-ci une modélisation géométrique et une optimisation de sa forme afin de minimiser l'effort de traction.

Pour cela on a utilisé trois méthodes pour faire une analyse totale de la forme de sa surface active, la première est celle dite statistique qui représente une quantification des points de coordonnées de la surface et du contour pour faire l'analyse de ses courbures à différents niveaux, ceci nous a permis de déterminer la trajectoire que suivra la bande de terre et de prévoir sa déformation sur la surface active. En effet les courbures plus accentuées entraîneraient un retournement plus important et un éclatement de la bande de terre, par compression, plus accentué. La deuxième est dite géométrique, par l'utilisation en première étape une correction de la forme du contour par un ajustement polynomial du second ordre et en deuxième étape par la méthode de courbe paramétrique de Bézier afin d'optimiser la forme qui nous a permis de corriger le contour, de définir la surface de pression du versoir sur le sol et de limiter la longueur du cisaillement par sa forme arrondie en économisant l'énergie de travail et au même temps de fabrication.

L'intérêt de ces deux méthodes est de fournir aux agronomes des critères scientifiques pour le choix des pièces travaillantes des outils aratoires à utiliser dans des conditions pédoclimatiques prédéfinies pour l'obtention d'un état du sol favorable au bon développement de la plante. Ce travail permettra également au concepteur des outils aratoires d'avoir des indications à prendre en considération pour la fabrication des surfaces actives répondant aux conditions pédoclimatique prédéfinies.

Cependant, on peut ressortir un ensemble de remarques qui incitent à réfléchir aux moyens et modes de conception de ces modèles pour dégager des renseignements qui permettent par la suite d'améliorer ces modèles, à savoir, utiliser des dispositifs de relevé de coordonnées plus précis que le pantographe employé, augmenter le nombre des points identifiant le contour ou/et les profils de la surface active et exploiter les schémas de conception fournis par les constructeurs. Généralement, l'utilisation des moyens plus précis comme le scanner 3D peuvent donner des résultats très satisfaisants.

La troisième méthode est celle dite numérique qui est basée sur la méthode des éléments finis par l'introduction des points de mesure de la surface active sous environnement SolidWorks. Ce processus a permis de faire la simulation du mode d'action de deux corps de charrue à socs MAGI et ENPMA et d'étudier la répartition des contraintes de déformation sur la surface en question. L'utilisation de cette méthode permet également de montrer les possibilités du choix des matériaux avec logiciel approprié. L'étude montre que la charrue à socs MAGI est soumise à des contraintes plus élevées que celles obtenues sur le modèle ENPMA.

Quant aux déformations, on constate qu'elles sont plus importantes pour le modèle MAGI. Dans les deux cas, elles prennent leurs valeurs maximales aux parties arrière des versoirs.

Nous suggérons que ce travail soit poursuivi par une étude expérimentale consistant à définir le sol agricole dans les conditions de labour à partir d'un certain nombre de grandeurs physiques qui reflètent son état mécanique. Il est aussi intéressant d'étudier l'interaction outil-sol qui est indispensable pour comprendre le cheminement du sol sur la surface active et les forces résultantes de ce phénomène.

---

# Références bibliographiques

- Aguilar M.A; Aguilar F.J; Aguera F et Carvajal F., 2005.** The Evaluation of Close-range Photogrammetry for the Modeling of Mouldboard Plough Surfaces. *Biosystems Engineering* (2005) 90 (4), 397–407. PM—Power and Machinery.
- Amara M., 1983.** Influence des principaux paramètres constructifs de deux corps de charrue à versoir universel et cylindrique et la vitesse de travail sur les indices qualitatifs de labour. Thèse de magister, ENSA-El-Harrach, Alger (+annexes).
- Amara M; Couhert J P et Harrad F., 2006.** Effet de la succession des machines agricoles pour la mise en place d'un blé sous pivot sur le développement des racines et conséquences sur le rendement. *Ann, INA, Alger.* pp : 1-7.
- Amara M., 2007.** Contribution à la modélisation interface outils aratoires-sol optimisation de la forme et l'effort de résistance à la traction des corps de charrues à socs et des outils à dents. Thèse de doctorat. INA-Elharrach. Alger. 220 p.(+ Annexes).
- Anderson G., 2009.** The impact of tillage practices and crop residue (stubble) retention in the cropping system of Western Australia. Department of Agriculture and Food, Bulletin Number 4786.p 93.
- AshrafiZadeh S R., 2006.** Modelling of energy requirements by a narrow tillage tool. Degree of doctoral of philosophy in the department of agricultural and bioresource engineering. University of Saskatchewan.Canada. p 190.
- Benchabla F., 2004.** Modélisation et optimisation de l'effort de résistance à la traction en relation avec l'état d'usure des socs d'un cultivateur à dents. Mémoire. INA-Elharrach. Alger. 149 p. (+ Annexes).
- Bentaher H; Katchev G; Maalej A; Arnold W., (2005).** Optimisation énergétique du travail de sol par charrues polysocs: 1-conceptions des socs. Congrès internationales de la mécanisation agricole, Tunisie, pp 53-61.
- Bernacki H; Haman J et Kanafojski C.Z., 1979.** *Agricultural Machines Theory and Construction.* Vol.1. NTIS. USA.
- Binesse M., 1970.** Cisaillement et résistance spécifique du sol lors du labour classique. Mém de fin d'étude, CNEEMA, France, pp : 341-342.
- Bourarach E H et Mrabet R., 2001.** Le semi direct. Bulletin de transfert de technologie en agriculture, PNTTA n°76 :1-4.
- Carroll E G; Srivastava A K; Roger P R et Dennis R B., 2006.** Soil tillage. Chapter 8 in *Engineering Principles of Agricultural Machines*, 2<sup>nd</sup> Ed., 169-230. ASABE.
- Chauvel B ; Tschudy C et Munier-Jolain N., 2009.** Travail du sol et mauvaises herbes : quels enjeux pour les techniques culturales sans labour dans le cadre d'une gestion intégrée ? INRA – UMR1210 Biologie et gestion des Adventices, Dijon, France.
- Dalleine E., 1977.** Les façons en travail du sol. Tom II. Etude du CNEEMA, n°428 : 1-64.

- Dalleine E., 1977.** Les façons en travail du sol. Tom III. Etude du CNEEMA, n°438 : 1-61.
- Daxecker F., 1992.** Pantographe. Planche de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert, Springer Netherlands, vol. 81, Number 1, p. 27-35.
- Delacotte L., 1981.** Contribution à l'étude des outils d'éclatement du sol. Mémoire, ENITA, France.
- Deng G et Faig W., 2001.** An evaluation of an off-the-shelf digital close-range photogrammetric software package. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(2): 227–233.
- Destain M F., 1995.** The use of three dimensional computer graphics to design mouldboard plough surfaces. 1<sup>st</sup> international symposium on: Mathematical modelling and simulation in agriculture and bio-industries.
- Dexter A R et Bird N R A., 2001.** Methods for predicting the optimum and the range of water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil Tillage Res* 57:203–212.
- Drepsch R., 2001.** Conservation tillage, no-tillage and related technologies, keynote contributions "First world congress on conservation agriculture"; Madrid, ECAF-FAO, pp161-170.
- El-Brahli A ; Bouzza A et Mrabet R., 1997.** Stratégie de lutte contre les mauvaises herbes dans plusieurs rotations céréalières en conditions de labour et de non labour. Rapport d'activité 96-97. INRA Centre Aridoculture Settat, Maroc.
- Faig W; El-Habrouk H; Li X P et Hosny M., 1996.** A comparison of the performance of digital and conventional non-metric cameras for engineering applications. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31(Part B5): 147–151.
- Formato A; Faugno Set Paolillo G., 2005. Numerical Simulation of Soil-plough Mould board Interaction. *Biosystems Engineering* (2005) 92 (3): 309–316.
- Fraser C S et Riedel B., 2000.** Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology. *ISPRS, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55: 268–276.
- Grisso R D ; Yasin M et Kocher M.F., 1996.** Tillage implements force operating in silty clay loam. *Transactions of the ASAE* 39(6): 1977-1983.
- Hamadache A., 2006br.** La préparation du sol. ITGC, El-harrach-Alger.
- Harrad F et Mezioud S., 1998.** Contribution à la modélisation de l'effort de résistance à la traction des outils à dents. Mémoire, Ins. Nat. Agr, Elharrach. Alger.
- Hoogmoed W B., 1999.** Tillage for soil and water conservation in the semi-arid tropics. Doctoral Thesis. Wageningen University, the Netherlands, 184 pp.
- Houyou Z., 1998.** Contribution à la modélisation de l'interface outils aratoires-sol. Analyse de l'influence de la forme de deux corps de charrue à soc sur l'effort de résistance à la traction. Mémoire de magistère, ENSA, El-Harrach, Alger, p 119. (+ annexes).



- Karmakar S., 2005.** Numerical modelling of soil flow and Pressure distribution on a simple tillage Tool using computational fluid dynamics. These de doctorat, Department of Agricultural and Bioresource Engineering, University of Saskatchewan, pp. 220.
- Keller TetArvidsson J., 2010.** Soil disturbance and soil fragmentation during tillage. Department of Soil & Environment, SLU, P.O. Box 7014, SE-75007, Uppsala, Sweden. pp: 51-66.
- Keller T; Arvidsson J et Dexter A,R., 2007.** Soil structures produced by tillage as affected by soil water content and the physical quality of soil. *Soil Tillage Res* 92:45-52.
- Kepner R A; Bainer R et Barger E L., 1978.** Principles of Farm Machinery. Westport, CT: The Avi Publishing Compagny.
- Köller K. 2003.** Techniques of Soil Tillage, p. 1-25, In A. El Titi, ed. *Soil Tillage in Agroecosystems*. CRC Press LLC, Boca Raton.
- Kushwaha R L etLinke C., 1996.** Draft-speed relationship of simple tillage tools at high operating speeds. *Soil& Tillage Research* 39: 61-73.
- Lerat P., 1999.** Les machines agricole-conduite et entretien. Ed. Lavoisier, Paris, 388p.
- Marvel F., Cohn T., Fleming Z., 2000.** U.S. Pat. No. 6,161,429.
- Massah J., 2004.**, Development of Automatic Moldboard Profilograph. 4<sup>th</sup> International Conference Agricultural Machinery, Tabriz, Iran.
- Massah J etAlimardani R., 2008.** Design modification of an automatic mouldboard profilograph. *Cercet#ri Agronomiceîn Moldova*, Vol. XLI, No. 4 (136). Abourayhan Campus - University of Tehran, Iran.
- McKyes E., 1985.** Soil cutting and tillage. Department of agricultural engineering, Elsevier, Canada. 217 p.
- Mills J P; Newton I et Peirson G C., 2001.** Pavement of formation monitoring in a rolling load facility. *Photogrammetric Record*, 17(97): 7–24.
- Mrabet R., 2001.** le semis direct: potentiel et limites pour une agriculture durable en afrique du nord. Centre de développement sous-régional pour l’Afrique du Nord (CDSR).
- Mutsa C M., 1995.** The effect of tine geometry on soil physical properties. Thesis of Master of Science. Dept Agr Engi, univ Montreal, 121p.
- Naderloo L; Alimadani R; Akram A; Javadikia P etZeinaliKhanghah H., 2009.** Tillage depth and forward speed effects on draft of three primary tillage implements in clay loam soil. *Journal of Food, Agriculture & Environment* Vol.7 (3&4): 382-385.
- Perdok U D et Van de Werken G., 1982.** Power and labour requirements in soil tillage. International Congress 12th of Agricultural Machinery Exhibition, Landbouw RAI, Amsterdam, 55-70.
- Ravonison N M; Destain M F., 1994.** Parametric cubic equations for modeling mouldboard plough surfaces. *Soil & Tillage Research*, 31, 363–373.
- Roger-Estrade J., 2001.** Contribution à la modélisation des l’effet de systèmes de culture sur l’état des couches de sol travaillées. Mémoired’habilitation, INAPG. Tom 1. p103.

- Ros V; Smith R J; Marley S J; Erbach D C., 1995.** Mathematical modeling and computer-aided design of passive tillage tools. Transactions of the ASAE, 38(3), 675-683.
- Saks E et Heinllo M., 2001.** Stresses and displacements in a semi digger moldboard and a ploughshare. Journal of computational and applied mechanics, vol. 2, n°2. (2001) pp: 223-236.
- Seguy et al ., 2001.** Un article de semi direct. Système de culture et dynamique de la matière organique. Soil and tillage research, vol.31 : 363-373.
- Shamsabadi H.T ; Biabani A. et Desa A., 2009.** Effects of Tillage Methods and Sowing Rates on the Grain Yields and Yield Components of Rain Fed Wheat. Pertanika J. Sci. & Technol. 17 (2): 325– 335.
- Sharifat K., 1999.** Soil translocation with tillage tools. Thesis of doctor of philosophy; Department of Agricultural and Bioresource Engineering, University of Saskatchewan, p 183.
- Spoor G et Godwin R.J., 1978.** An experimental investigation into the loosening of soil by rigid tines. J Agric Engng Res 23:243–257.
- Tardieu F et Manichon H., 1987.** Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. Agronomie 7, 123-131.
- Thomas G., 2008.** Interpolation, courbe de Bézier et B-spline. Bulletin de la Société des Enseignants Neuchâtelois de Sciences, 34, Janvier 2008, p 50.
- Van Lerberghe P., 1999.** Influence du travail du sol sur la stabilité des peuplements. Cultivation of soils for forestry. Forestry Commission. Bulletin 119, 85 p.
- Vilde A., 2008.** The Share-Moldboard Parameters Of Some Plough Bodies. Engineering For Rural Development. Latvia University of Agriculture, Research Institute of Agricultural Machinery, 141-146.

# Annexes

X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
2.3	0	2	24.2	6	8	24.5	12	8	20.8	18	36										
5.3	0	4	26.6	6	10	29.4	12	8	28.3	18	2										
17.3	0	6	30.5	6	12	32.5	12	10	31.9	18	4										
13.4	0	8	32	6	14	35.2	12	12	36.1	18	6										
21	0	10	33.5	6	16	37.7	12	14	39.2	18	8										
23.6	0	12	36.1	6	18	39.9	12	16	42.3	18	10										
25.5	0	14	38	6	20	42.3	12	18	43.8	18	12										
29	0	16	38.6	6	22	43.4	12	20	45.7	18	14										
31	0	18	39	6	24	43.9	12	22	47.2	18	16										
32.5	0	20	40.3	6	26	44.6	12	24	46.6	18	18										
34.2	0	22	41.4	6	28	45.7	12	26	49.2	18	20										
35.5	0	24	42.3	6	30	46.1	12	28	49.7	18	22										
36.8	0	26	43	6	32	46.6	12	30	49.9	18	24										
37.9	0	28	44.4	6	34	46.9	12	32	50.1	18	26										
39	0	30	47.2	6	4	47.3	12	34	51.2	18	28										
2.3	2	2	21.5	8	6	16.4	14	2	51.8	18	30										
15.3	2	4	24.6	8	8	21.8	14	4	51.6	18	32										
12.8	2	6	28	8	10	26.6	14	6	52.2	18	34										
16	2	8	31.5	8	12	30.2	14	8	22.7	20	36										
21.4	2	10	34.4	8	14	34.7	14	10	29.3	20	2										
24.8	2	12	37.3	8	16	38.8	14	12	34.1	20	4										
28	2	14	38.7	8	18	41.1	14	14	38.9	20	6										
30.6	2	16	39.5	8	20	41.7	14	16	41.2	20	8										
32.5	2	18	40.9	8	22	43.2	14	18	42.6	20	10										
34	2	20	41.5	8	24	45.3	14	20	44.5	20	12										
34.8	2	22	42.4	8	26	46	14	22	47.6	20	14										
37	2	24	43.1	8	28	46.8	14	24	48.1	20	16										
38	2	26	43.8	8	30	47.5	14	26	49.8	20	18										
39	2	28	44.3	8	32	48.1	14	28	50.4	20	20										
39.6	2	30	45.7	8	34	48.5	14	30	51.6	20	22										
8	4	2	13.5	10	2	48.7	14	32	52.1	20	24										
10.9	4	4	20.1	10	4	48.9	14	34	51.5	20	26										
15.6	4	6	24.7	10	6	13.1	16	2	52.1	20	28										
18.3	4	8	28.1	10	8	25.5	16	4	52.7	20	30										
26.6	4	10	30.2	10	10	29.8	16	6	53.2	20	32										
28	4	12	33.5	10	14	34.4	16	8	52.7	20	34										
30.8	4	14	36.7	10	14	39.4	16	10	28.5	22	36										
32.5	4	16	37.9	10	16	40.6	16	12	31.7	22	2										
34.7	4	18	39.6	10	18	42.3	16	14	34.9	22	4										
36	4	20	41.6	10	20	44.6	16	16	38.7	22	6										
37.1	4	22	42.9	10	22	45.8	16	18	42.3	22	8										
38.5	4	24	43.2	10	24	46.4	16	20	45.5	22	10										
39	4	26	43.9	10	26	47.7	16	22	47.7	22	12										
39.2	4	28	44.6	10	28	48.8	16	24	49.3	22	14										
41.2	4	30	45.3	10	30	49.2	16	26	49.9	22	16										
41.4	4	32	45.9	10	32	49.6	16	28	50.5	22	18										
43.5	6	2	46.5	10	34	49.9	16	30	51.9	22	20										
46.2	6	4	45.3	12	2	50.3	16	32	52.7	22	22										
20.2	6	6	20.4	12	4	50.8	16	34	53.3	22	24										
53.9	22	26	54.3	28	12	61.3	32	32	0	38	12										
54.3	22	28	55.2	28	14	60.8	32	34	0	38	14										
54.8	22	30	56.5	28	16	60.8	32	36	64.3	38	16										
55.2	22	32	56.2	28	18	60.6	32	38	65.5	38	18										
55.5	22	34	57	28	20	60.3	32	40	65.1	38	20										
55.6	22	36	58.5	28	22	35.8	34	2	66.1	38	22										
27.5	24	2	55.4	28	0	34	4	65.7	38	24											
33.5	24	4	58.2	28	26	0	34	6	64.7	38	26										
37.6	24	6	58.3	28	28	0	34	8	64.6	38	28										
41.5	24	8	58.4	28	30	0	34	10	65.8	38	30										
44.8	24	10	58.4	28	32	80	34	12	65.6	38	32										
47.1	24	12	57.8	28	34	58.7	34	14	65.4	38	34										
48.5	24	14	57.9	28	36	49.4	34	16	66.2	38	36										
49.9	24	16	58.4	28	38	60	34	18	65.4	38	38										
51	24	18	58.4	28	40	60.3	34	20													
52.3	24	20	52.4	28	2	60.2	34	22													
53.4	24	22	41	30	4	61.1	34	24													
54.5	24	24	0	30	6	62.4	34	26													
54.7	24	26	0	30	8	62.5	34	28													
55.4	24	28	0	30	10	61.9	34	30													
56.1	24	30	57.3	30	12	62.6	34	32													
56.5	24	32	57.6	30	14	62.3	34	34													
56.9	24	34	58.3	30	16	62.6	34	36													
56.1	24	36	58.3	30	18	63.2	34	38													
56.5	24	38	58.7	30	20	60.2	34	40													
26.6	26	2	58.2	30	22	0	36	2													
37.8	26	4	58.9	30	24	0	36	4													
42.1	26	6	60	30	26	0	36	6													
46.9	26	8	59.4	30	28	0	36	8													
49.8	26	10	59.4	30	30	0	36	10													
51.9	26	12	58.4	30	32	0	36	12													
52.6	26	14	58.7	30	34	61	36	14													
53.6	26	16	60.2	30	36	61.2	36	16													
55.3	26	18	59.4	30	38	62.3	36	18													
56.2	26	20	59	30	40	63.8	36	20													
57.1	26	22	33.9	32	2	63.4	36	22													
57.3	26	24	0	32	4	63.5	36	24													
56.5	26	26	0	32	6	64.2	36	26													
56.9	26	28	0	32	8	64.7	36	28													
56.7	26	30	0	32	10	64.6	36	30													
57.6	26	32	57.5	32	12	64.7	36	32													
57.9	26	34	58.6	32	14	64.7	36	34													
57.6	26	36	58.9	32	16	63.1	36	36													
58.3	26	38	59.3	32	18	63.8	36	38													
57.3	26	40	60.3	32	20	63.2	36	40													
30.3	26	2	60.7	3																	

## Caractérisation et optimisation par simulation de la forme des surfaces actives des corps de charrue à socs

X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0	0	0	22,6	8	8	30,4	16	16
4,7	0	4	23,6	8	10	31,5	16	18
10,5	0	6	24,5	8	12	30,6	16	20
13,9	0	8	25,1	8	14	30,7	16	24
16,1	0	10	25,8	8	16	30,8	16	26
17,8	0	12	26,3	8	18	30,8	18	14
19,3	0	14	26,5	8	20	30,8	18	16
20,4	0	16	27	8	22	30,9	18	18
21	0	18	12,3	10	0	31	18	20
21,8	0	0	16,2	10	2	31,3	18	22
2,1	2	2	20,2	10	4	31,5	18	24
7	2	4	22,9	10	6	31,6	18	26
12	2	6	24,3	10	8	30,9	20	12
15,4	2	8	25,8	10	10	31	20	14
18	2	10	25,9	10	12	31,3	20	16
19,5	2	12	26,4	10	14	31,5	20	18
20,5	2	14	27	10	16	31,7	20	20
21,5	2	16	27,2	10	18	31,8	20	22
22,3	2	18	26,7	10	20	31,9	20	24
22,7	2	20	15	12	22	32	20	26
23,5	2	0	18,5	12	0	32,8	22	12
4,8	4	2	22	12	2	33	22	14
9,6	4	4	24,9	12	4	33,3	22	16
13,8	4	6	25,5	12	6	33,5	22	18
17,3	4	8	26,5	12	8	33,7	22	20
19,5	4	8	27	12	10	33,9	22	22
21	4	10	27,3	12	12	34	22	24
22,1	4	12	27,7	12	14	34,8	22	26
22,8	4	14	28,3	12	16	30	24	12
22,5	4	16	28,6	12	18	30,3	24	14
23,9	4	18	28,5	12	20	30,4	24	16
24,5	4	20	28,7	12	22	30,5	24	18
7,4	6	0	17,2	14	24	30,8	24	20
11,7	6	2	20,2	14	0	31	24	22
16,1	6	4	26,9	14	2	31	24	24
19	6	6	27,7	14	8	34,5	24	26
22,9	6	8	28,2	14	10	33,7	26	12
22,5	6	10	29,5	14	12	33,7	26	14
23,4	6	12	28,8	14	14	33,8	26	16
24	6	14	29,2	14	16	33,9	26	18
24,7	6	16	29,3	14	18	34	26	20
25,1	6	18	29,5	14	20	34,3	26	22
25,6	6	20	29,7	14	22	34,3	26	24
25,8	6	21	20	16	24	35,5	28	14
10,2	8	0	28,9	16	0	36	28	16
14,3	8	2	29,2	16	10	36,1	28	18
18,1	8	4	29,5	16	12	36,5	28	20
20,8	8	6	30,1	16	14	-	-	-

*Annexe II: Cordonnées des points sur la surface active du corps ENPMA (en cm, échelle 1/2)*

X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
2.3	0	2	71.8	42	26
5.3	0	4	71.5	40	24
8	0	5	71	40	22
12	0	6	69.5	67,2	20
18.4	0	8	67.9	66,4	18
21	0	10	66.4	63,5	16
23.6	0	12	63.5	61,5	14
26.5	0	14	61.5	56,1	12
29	0	16	56.1	50,5	10
31	0	18	50.5	44,2	8
32.5	0	20	44.2	42,6	7
34.2	0	22	42.6	44,5	7
35.5	0	24	44.5	45,4	7
36.8	0	26	45.4	44,5	7
37.9	0	28	44.5	11	6
39	2	30	11	14	5
39.8	4	31	14	16	6
40.5	6	32	16	42,9	7
42.8	8	34	42.9	41,5	4
44.3	10	34.5	41.5	40	2
46.7	12	35	40	37,6	0
47.3	14	35.5	37.6	36,5	0
49.5	16	36	36.5	32,5	0
50.4	18	37	32.5	32,2	0
51.2	20	38	32.2	32	0
54	22	38.5	32	30	0
56.5	24	39	30	28,5	0
57.8	26	40	28.5	26	0
58	28	40	26	24,3	0
59	30	40	24.3	22,5	0
59.5	32	40.5	22.5	20,3	0
61.5	34	41	20.3	18,5	0
62.5	36	41	18.5	17	0
65	38	41	17	15,3	0
66.5	39	40	13	13	0
68	40	39	11.4	11,4	0
69.2	40	38	9.3	9,3	0
70	40	36	7.1	7,1	0
70.8	42	34	6.5	6,5	0
71	42	32	5	5	0
71.3	42	30	2	2	0
72.1	42	28	0	0	0

**Annexe III:** Coordonnées du contour de la surface active de corps de charrue MAGI (échelle 1).

X	Y	Z
0	0	0
5	0	1,5
9	0	3
11	0	4
12	0	5
14	0	6,5
15	0	8
16	0	10
16,5	0	13
18	0,42	13,4
20,5	6,48	16,3
23	12,5	19,4
25,5	15,82	20,92
27,5	18,38	21
29	19,04	20,02
30	19,58	18,9
29,5	20,01	17,86
26,5	19,53	15,53
23	17,5	12,5
20,5	14,4	9,01
17	9	3
16,5	10,5	0
11,5	7,5	0
8	0	0
5	0	0
0	0	0

**Annexe VI:** Coordonnées du contour du corps de charrue ENPMA (en cm, échelle 1/3).