

*Contribution à la modélisation interface  
outils aratoires sol Optimisation de la  
forme et de l'effort de résistance à la  
traction des corps de charrues à socs et  
des outils à dents*

Présentée par

**Mahfoud AMARA**

Directeur de thèse : HALITIM Amor Professeur (U.Batna)

Codirecteur : DAOUD Youcef Professeur (INA-El- Harrach) devant le jury

Année Universitaire 2006 - 2007

Président : AIDAOUI Abdallah Professeur (INA-El-Harrach) Examineurs : BENMOUSSA Mebrouk  
Professeur (INES Blida) BOUAZIZ Mohamed Maître de conférences (ENP-El-Harrach)



# Table des matières

Résumé . .	7
Abstract . .	8
ص خ لم . .	9
REMERCIEMENTS . .	10
INTRODUCTION GENERALE . .	11
PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE . .	14
Chapitre 1. Objectifs et importance des opérations de préparations du sol . .	14
1.1. Objectifs des opérations de préparation du sol . .	14
1.2. Rétrospective sur les outils aratoires et place des charrues à socs . .	15
1.3. Objectifs des labours et leurs classifications . .	18
1.4. Place et importance des labours dans l'itinéraire technique . .	19
1.5. Influence du travail du sol sur la réserve en eau. . .	20
1.6. Caractéristiques thermiques du sol et rôle des opérations culturales . .	21
1.7. Travail du sol et matière organique . .	22
1.8. Approche comparée du machiniste et de l'agronome quant à l'étude du travail du sol. . .	23
1.9. Conclusion . .	23
Chapitre 2. Mode d'action d'un corps de charrue et théorie du labour . .	23
2.1. Approche théorique du mode d'action d'un corps de charrue à soc sur le sol . .	23
2.2. Mode d'action d'un corps de charrue à socs sur le sol . .	26
2.3. Comportement du sol sous l'action d'un outil aratoire . .	27
2.4. Interactions sol - conditions de travail . .	32
2.5. Relation fonctionnelle du système Sol – Outil . .	34
2.6. Conclusion . .	36
Chapitre 3. Méthodes de caractérisation et de projections des corps de charrues . .	37
3.1. Introduction . .	37
3.2. Méthode des coordonnées . .	38
3.3. Méthode des projections . .	38
3.4. Méthode de la photo ou optique. . .	38
3.5. Autres méthodes . .	38
3.6. Méthode analytique pour identifier et concevoir une surface de corps de charrue . .	39
3.7. Conception de la surface active du corps de charrue à socs . .	52
3.8. Conclusions . .	53
Chapitre 4. Consommation d'énergie pour les opérations de préparation du sol . .	54
4.1. Introduction . .	54
4.2. Répartition de la consommation d'énergie pour la mise en place d'une culture. . .	54
4.3. Méthodes d'évaluation de l'énergie consommée pendant le travail du sol . .	57

4.4. Energie et techniques de travail du sol en relation avec le développement des racines . . .	58
4.5. Conclusion . . .	60
Chapitre 5. Analyse du système de forces appliquées au corps de charrue à socs et de la modélisation de l'effort de résistance à la traction. . .	61
5.1. Analyse du système de forces appliqué à un corps de charrue à soc. . .	61
5.2. Synthèse sur la modélisation de l'effort de résistance à la traction . . .	64
5.3. Conclusion . . .	69
<b>DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE : Modélisation et Optimisation de la forme et de l'effort . . .</b>	<b>72</b>
Chapitre 6. Caractérisation des surfaces actives des corps de charrues à socs . . .	73
6.1. Caractérisation des surfaces actives des corps de charrue à socs étudiés . . .	73
6.2. Projections des surfaces actives et mesure des angles principaux . . .	77
6.3. Analyse de la variation des angles . . .	79
6.4. Etablissement des équations des surfaces projetées . . .	84
6.5. Etablissement des équations de surface des corps de charrue à socs à partir des coordonnées des contours . . .	90
6.6. Equations de forme des deux surfaces actives . . .	91
6.7. Comparaison des deux formes de surfaces actives . . .	92
6.8. Réalisation des modèles réduits des deux corps de charrue . . .	92
Chapitre 7. Modélisation de la surface active des versoirs par les courbes paramétriques cubiques de Bézier. . .	94
7.1. Objectifs . . .	94
7.2. Méthodes de quantification des surfaces actives . . .	95
7.3. Rappel sur la notion de courbes de Bezier : . . .	95
7.4. Projections des contours par la méthode des courbes de Bezier . . .	97
7.5. Détermination des caractéristiques mécaniques des surfaces actives. . .	101
7.6. Analyse de l'effet de la position du centre de gravité de la surface active sur le comportement de la bande de terre. . .	104
7.7. Interprétations . . .	113
7-8-Conclusion . . .	114
Chapitre 8. Influence de la forme des versoirs des deux corps de charrue à socs sur les indices qualitatifs des labours. . .	115
8.1. Objectifs et conditions de travail . . .	115
8.2. Indices qualitatifs étudiés : . . .	115
8.3. Résultats et discussions . . .	116
8.4. Conclusion . . .	119
Chapitre 9. Influence de la forme des outils aratoires et des conditions de travail sur l'effort de résistance à la traction. . .	119
9.1. Présentation du protocole expérimental . . .	119
9.2. Etablissement des paramètres étudiés et conditions de travail . . .	120
9.3. Moyens matériels . . .	123
9.4. Influence de l'état du sol sur l'effort de résistance à la traction . . .	127

<b>Chapitre 10. Analyse dimensionnelle de l'effort de résistance à la traction et évaluation des efforts de résistance à la traction Ft . . .</b>	<b>137</b>
10.1. Introduction et objectifs . . .	137
10.2. Détermination des rapports des efforts de résistance à la traction . . .	138
10.3. Méthodologie de recherche des rapports <i>R</i> pour d'autres échelles, notamment pour l'échelle 1/1 . . .	143
10.4. Evaluation des efforts de résistance à la traction pour l'échelle réelle . . .	147
10.5. Conclusion . . .	148
<b>Chapitre 11. Modélisation de l'effort de résistance à la traction . . .</b>	<b>148</b>
11.1. Introduction . . .	148
11.2. Méthodologie de la modélisation . . .	149
11.3. Application du modèle aux dimensions réelles du corps de charrue. . .	158
11.4. Application, vérification et correction du modèle . . .	168
11.5. Comparaison du modèle obtenu avec les modèles fréquemment utilisés Gorjatchkin et Gee Cloug. . .	170
11.6. Analyse de la fiabilité des modèles de Gorjatchkin et de Gee Clough . . .	173
11.7. Conclusion . . .	179
<b>Chapitre 12. Optimisation de la surface active et de l'effort de résistance à la traction. . .</b>	<b>180</b>
12.1. Introduction . . .	180
12.2. Optimisation des surfaces actives . . .	180
12.3. Analyse de l'équation du modèle de l'effort de résistance à la traction . . .	195
12.4. Optimisation de l'effort de résistance à la traction . . .	197
12.5. Application du modèle de l'effort pour les corps de charrue de dimensions réelles. . .	209
<b>Chapitre 13. Analyse du comportement mécanique des surfaces actives des corps de charrue . . .</b>	<b>211</b>
13.1. Introduction . . .	212
13.2. Méthodologie . . .	212
13.3. Représentation des contraintes et des déformations des surfaces actives . . .	214
13.4. Résultats de l'analyse . . .	221
<b>Chapitre 14. Modélisation de l'effort de résistance à la traction des outils à dents . . .</b>	<b>225</b>
14.1. Introduction . . .	225
14.2. Moyens matériels et méthodologie . . .	227
14.3. Essai de modélisation de l'effort de résistance à la traction des outils simples . . .	235
<b>CONCLUSION GENERALE . . .</b>	<b>237</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES . . .</b>	<b>242</b>
<b>Publications sur le sujet : . . .</b>	<b>245</b>
Publications on-line (Internet) : . . .	246
<b>Annexes . . .</b>	<b>247</b>
Annexe 1 : Coordonnées des points des surfaces actives des deux corps de charrue Echelle 1 / 4 . . .	247

Annexe 2 : Coordonnées des points des surfaces actives des deux corps de charrue Echelle 1 / 3 . .	247
Annexe 3 : Coordonnées des points des surfaces actives des deux corps de charrue Echelle 1 / 2 . .	248
Annexes 4 : Valeurs des efforts de résistance à la traction et des différents paramètres introduits dans le modèle mathématiques de Ft. . .	248
Annexe 5 : Valeurs logarithmiques des $\pi$ termes pour l'établissement du modèle mathématique de l'effort de résistance à la traction. . .	250
<b>Annexe 6</b> : Variation des contraintes subies par la bande de terre sous l'action de la surface active du corps de charrue à socs (analyse théorique de la déformation de la bande de terre fixée sur un côté) . .	251
<b>Annexe 7</b> : Variation des contraintes subies par la bande de terre sous l'action de la surface active du corps de charrue à socs (analyse théorique de la déformation de la bande de terre fixée sur deux côtés) . .	253
Annexes 8 : Valeurs des contraintes de cisaillement, des contraintes normales et des contraintes de Von Mises pour la forme ENPMA . .	254
Annexes 8 suite: Valeurs des contraintes de cisaillement, des contraintes normales et des contraintes de Von Mises pour la forme ENPMA (récapitulatif) . .	255
<b>Annexes 9</b> : Valeurs des contraintes de cisaillement, des contraintes normales et des contraintes de Von Mises pour la forme SACRA . .	256
Annexes 9 (suite) : Valeurs des contraintes de cisaillement, des contraintes normales et des contraintes de Von Mises pour la forme SACRA (Récapitulatif) . .	257
<b>Annexe 10</b> : Valeurs des efforts de résistance à la traction des socs usés . .	258
<b>Annexe 10 (suite)</b> : Valeurs des efforts de résistance à la traction des socs usés . .	259

---

## Résumé

La préparation du sol est un des éléments clés de la réussite d'une culture. Le sol doit être bien travaillé pour que les racines de la plante mise en place, puissent s'y installer rapidement et puiser facilement tous les éléments nutritifs nécessaires à son développement.

A cet effet, la réussite des opérations de préparation du sol dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels nous citerons, outre les bonnes conditions de sol et de climat, l'importance du choix des outils aratoires qui est à prendre en considération. Les techniques de préparation du sol sont aussi les plus exigeantes en énergie qu'il faudrait réduire par une conception optimale des surfaces actives des pièces travaillantes.

La complexité des nombreuses surfaces actives des corps de charrue à socs pose souvent problème quant à leur choix pour la réalisation des labours dans des conditions de travail souvent variables.

L'évaluation des besoins en énergie, très importants pour les labours, est souvent difficile à quantifier même si plusieurs modèles mathématiques sont proposés. Ces derniers tiennent souvent compte des caractéristiques physico mécaniques du sol de la profondeur et de la vitesse de travail. Les caractéristiques géométriques des surfaces actives des corps de charrues à socs sont souvent négligées.

Pour cela notre travail a porté essentiellement sur deux points:

Le premier point relatif à la caractérisation géométrique des surfaces actives des corps de charrue à socs. Il s'agira de proposer une méthode simple à cet effet qui sera complétée par une modélisation et une correction du contour après optimisation.

Le deuxième point portera sur la modélisation de l'effort de résistance à la traction en relation avec les caractéristiques géométriques des surfaces actives des corps de charrue à socs et des socs de cultivateur à dents.

Les objectifs recherchés dans ce travail sont de présenter des méthodes simples de caractérisation des surfaces actives des outils aratoires et de modélisation de l'effort de résistance à la traction. Les moyens utilisés à cet effet sont les bases fondamentales des statistiques, de l'analyse dimensionnelle et de la théorie de la modélisation.

Dans le domaine de la conception et de la fabrication, ce travail est aussi une contribution à l'amélioration de la forme des surfaces actives des pièces travaillantes qui permettraient d'améliorer les indices qualitatifs du travail du sol et d'optimiser la valeur de l'effort de résistance à la traction.

L'exploitation des résultats obtenus par les concepteurs d'outils aratoires, permettra d'améliorer considérablement les indices qualitatifs et énergétiques des opérations de préparation du sol.

**Mots clés:** Labour, caractéristiques géométriques, effort de résistance à la traction, modélisation, optimisation, soc, corps de charrue

## **Abstract**

The tillage is one of the key elements of the culture success. The soil must be well worked so that the roots of the plant installation can settle quickly and easily draw there all the nutritive elements necessary to its development.

To this end, the success of tillage depends on several factors among which we will quote, in addition to the good conditions of soil and climate, importance of the choice of agricultural tools which is to be taken into account. The tillage techniques are also most demanding in energy which it would be necessary to reduce by an optimal design of active surfaces of the working parts.

The complexity of many active surfaces of the ploughshare often poses problem as for their choice for the realization of the ploughings under variable working conditions.

Requirement the assessment in energy, very significant for ploughings, is often difficult to quantify even if several mathematical models are proposed. These models often take account mechanicals and physicals characteristics of the soil, the depth and the speed of work. The active surfaces geometrical characteristics of ploughshare are often neglected.

For that our work concerned two points primarily:

The first point relating is the geometrical characterization of active surfaces of the ploughshare plough. It will be a question of proposing a simple method for this purpose which will be supplemented by a modelling and a correction of contour after optimization.

The second point relates the modelling in relation taking account the geometrical characteristics of active surfaces of the ploughshare plough and the ploughshares of farmer with teeth.

The objectives sought in this work are to present simple methods of characterization of active surfaces of the agricultural tools and of modelling of the effort. The means used for this purpose are the fundamental bases of the statistics, the dimensional analysis and the theory of modelling.

In the field of design and manufacture, this work is also a contribution to the improvement of the form of active surfaces of the working parts which would make it possible to improve the qualitative indices of the work of the soil and to optimize the value of the effort.

The analysis of the results obtained by the agricultural originators of tools will make it possible to improve considerably the qualitative and energy indices of the tillage operations.

**Key words:** Ploughing, characteristics geometrical, effort, modelling, optimization, ploughshare, plough.



## ص خ لم

- تهيئة التربة عنصر أساسي لنجاح المزرع . يجب تحسين تهيئة التربة لتسهيل تثبيت النبتة في التربة و أخذ المواد الغذائية لنموها .
- نجاح تهيئة التربة متعلق بعدة عناصر ، منها جودة التربة وحسن المناخ والاختيار الجيد لنوعية آلات تهيئة التربة يجب أن نأخذ بعين الاعتبار خاصة في الزراعة، تهيئة التربة هي أكثر استهلاك الطاقة .
- كثرة نوعية أشكال أجزاء آلات تهيئة التربة ، تشكل صعوبة اختيارها في مواقع مختلفة من التربة .
- أخذ بعين الاعتبار هذه الملاحظات، يتمحور هذا العمل على النقاط التالية:
- النقطة الأولى نأخذ تصنيف أشكال المساحات العاملة للمحراث
  - النقطة الثانية نتعلق بإيجاد علاقة رياضية لتقدير قوة الجر للمحراث أخذاً بعين الاعتبار عناصر شكلية للمساحة العاملة للمحراث .
  - هدف هذا العمل هو تقديم نماذج بسيطة لتصنيف أشكال أجزاء آلات الحرت وعلاقة رياضية لتقدير قوة الجر لهذه الآلات بإستعمال قواعد التحليلات الرياضية والإحتمالات
- في ميدان الصناعة بسيط هذا العمل نصليح نوعية أشكال أجزاء آلات تهيئة التربة وارتفاع نوعية هذه التهيئة ونقص الطاقة المستهلكة .
- دراسة هذه النتائج واستعمالها من طرف صناع آلات الزراعة تعطى نتائج جيدة لنوعية تهيئة التربة ونقص من الطاقة المستهلكة .
- كلمات المفتاحية : حرت , عناصر شكلية, قوة الجر, تمثيل رياضي , توسع, سكة, جسم المحراث.

## **REMERCIEMENTS**

Avant tout je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui, par leurs conseils, leurs encouragements et leurs remarques, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

A Monsieur Amor HALITIM, professeur à l'université de Batna, mon directeur de recherche, j'exprime toute ma gratitude et ma reconnaissance pour son aide et ses conseils ainsi que ses encouragements.

A Monsieur DAOUD Youcef, professeur à l'Institut National Agronomique, mon co-directeur de recherche, j'exprime mes meilleurs sentiments pour la précision de ces orientations et ses conseils pour la réalisation de ce modeste travail.

Je tiens aussi à remercier Mr AIDAOUI Abdallah, professeur à l'INA, pour ses encouragements et son soutien pour mener à bien ce travail et pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Je suis très sensible à la présence dans ce jury de Monsieur BOUAZIZ Mohamed maître de conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique d'El-Harrach, et Monsieur BENMOUSSA Mabrouk, Professeur à l'INES de Blida, que je remercie également pour leurs encouragements et pour avoir accepté de faire partie du jury.

J'ai, tout au long de ma carrière, bénéficié des apports très enrichissants de mes enseignants de l'INA et de mes collègues du département Génie Rural de l'INA. Ces travaux doivent aussi beaucoup au labeur d'étudiant(e)s qui ont bien voulu, pour un temps, partager avec moi ce parcours de recherche.

Merci aussi à tous mes collègues et amis de longue date du département de Génie Rural en particulier et à tous mes collègues de l'INA. Je leurs exprime ma profonde sympathie et leur souhaite beaucoup de bien.

Je n'oublierai pas l'aide de Mr LAOUN Abdelkader, directeur technique de MAGI de Rouiba pour sa contribution pour la réalisation des modèles réduits des corps de charrue.

Cette thèse n'aurait pas pu s'écrire sans l'appui moral de ma famille, de mes amis et de mes collègues. Je les remercie tous pour leurs soutiens.

Que ma femme trouve ici tous mes remerciements pour sa contribution quant à l'orthographe et à la mise en forme de cette thèse.

Je n'oublierai pas tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation.

Que tous ici reçoivent l'expression de ma profonde et sincère gratitude.

Mahfoud AMARA

---

# INTRODUCTION GENERALE

Dans l'itinéraire technique de la mise en place des cultures, le labour est souvent la première opération à réaliser. De sa réussite, dépendent celles des autres techniques culturales (pseudo - labours et travaux superficiels) et du rendement de la culture à mettre en place. En effet une bonne préparation du sol offrira à la plante un milieu adéquat à son développement.

Cependant, cette première étape de la mise en place d'une culture n'est pas toujours facile à réaliser au vu de l'irrégularité des conditions climatiques et de la variabilité spatiale du sol caractérisé par un état souvent différent d'une parcelle à une autre et même au niveau de la même parcelle.

Pour répondre à ces préoccupations, le choix de l'outil à utiliser doit se faire de façon raisonnée. Ce choix est généralement dicté par plusieurs critères, dont les principaux sont énumérés ci-dessous :

- Les exigences de la culture à mettre en place.
- Le moment d'intervention qui est lui même conditionné par le climat.
- Les conditions d'intervention liées à l'état du sol et à celui des moyens à utiliser

Outre cela, il serait également nécessaire, de prendre en considération, les besoins en énergie pour la réalisation des opérations de préparation du sol.

Selon Binesse (1970) et Girma (1989), ces besoins sont évalués à plus de soixante pour cent de l'énergie totale consommée pour la production d'une culture. Le labour, première action sur le sol, en est le plus exigeant tant en énergie qu'en temps. En effet la charrue à soc est l'instrument de labour le plus répandu dans le monde et le plus grand consommateur d'énergie dans l'agriculture (Bernacki, 1972 ; Caproiu et al, 1982).

Tenant compte de ces remarques et des objectifs des labours du point de vue qualitatif, le choix de la forme de la surface active des corps de charrue à socs est plus que nécessaire car celle-ci influe sur les indices qualitatifs des labours et sur la consommation en carburant.

Il est à signaler que l'évolution de la forme des pièces travaillantes des outils aratoires a fait l'objet de plusieurs travaux dont ceux de Faure (1968) qui a étudié l'action d'un versoir sur le sol, ses essais ont porté sur la cinématique de la bande de terre sur la surface active du versoir, le côté forme du versoir a cependant été abordé d'une façon très théorique. Les travaux de Dalleine (1962 et 1964) ont par contre été orientés sur les indices qualitatifs des labours, cet auteur a cependant proposé une classification simple des corps de charrue à socs en se basant sur les trois vues (de face, de profil et de dessus). Si le côté énergétique a été le centre d'intérêt d'autres chercheurs, les travaux ont surtout été orientés sur des formes simples d'outils, vu la complexité de la forme des surfaces actives des corps de charrue à socs.

Pour ce qui est de notre travail, l'objectif que nous nous sommes fixé est une contribution portant sur la modélisation de l'effort de résistance à la traction qu'oppose le sol à l'avancement de deux formes de corps de charrue à socs, fabriqués respectivement par l'ENPMA (ex SONACOME) et l'EMARAL (ex SACRA), plus particulièrement en relation avec les caractéristiques géométriques des surfaces actives.

Nous signalerons que nos essais ont été réalisés avec des modèles réduits sur un canal d'essais de traction d'outils aratoires, réalisé au laboratoire de machinisme agricole. Trois parties composent notre travail :

- Caractérisation géométrique des deux formes de corps de charrues à socs étudiés par la méthode des coordonnées pour proposer des équations de formes pour ces deux surfaces.
- Influence de la forme des surfaces actives et des conditions de travail sur les indices qualitatifs des labours.
- Influence de ces deux formes sur l'effort de résistance à la traction et sur ces composantes latérales et verticales, en tenant compte de l'état du sol de la profondeur de labour et de la vitesse d'avancement. Dans le même sens, l'effet de la forme et de l'état d'usure des socs de cultivateurs à dents sur l'effort de résistance est proposé.

L'intérêt pratique de notre travail est de contribuer à la conception des différentes formes de surfaces actives des corps de charrues à socs. Ce qui permettra, d'une part une amélioration des indices qualitatifs des labours pour ce rapprocher le plus possible des objectifs recherchés lors des opérations de préparation du sol, d'autre part de réduire au minimum la consommation en combustible.

La conception des outils aratoires est souvent basée sur des considérations empiriques et le choix de la forme des outils aratoires pour la mise en état du sol, étant souvent aléatoire au niveau des exploitations agricoles de notre pays, entraînent inévitablement une mauvaise réalisation de la première opération culturale.

Suite à ces constats, la préparation du sol n'atteint pas les objectifs escomptés pour un bon développement de la culture, ceci d'une part, d'autre part la consommation en énergie est souvent excessive. Ceci n'est pas sans effet sur la faiblesse des rendements obtenus sur nos parcelles.

Tenant compte de ces remarques, le présent travail a pour but de proposer une méthodologie d'analyse de la forme du principal outil pour la mise en état du sol et de son influence sur les indices qualitatifs des labours et sur l'effort de résistance à la traction qui sera le paramètre choisi pour illustrer et quantifier les besoins énergétiques.

Ce travail permettra aux concepteurs des outils aratoires et à ceux qui les utilisent, de comprendre l'importance de la forme sur les indices qualitatifs des techniques de préparation du sol et sur la consommation en énergie.

Pour répondre à toutes ces préoccupations, notre travail est structuré comme suit :

**La partie bibliographique portera sur :**

- la mise en évidence de l'importance des techniques de préparation du sol en insistant sur l'importance du labour et ses effets sur les propriétés du sol.
- la caractérisation des corps de charrue à socs et leurs modes d'action sur le sol
- l'analyse des besoins en énergie pour la réalisation des labours et des différents modèles mathématiques de l'effort de résistance à la traction proposés par plusieurs chercheurs, pour la quantification de la consommation en énergie.

**La partie expérimentale portera sur :**

- la caractérisation des surfaces actives des deux corps de charrue étudiés et établissement de leurs équations de surface en relation avec les directions de travail.

- l'analyse de l'effet de la forme des surfaces actives sur les indices qualitatifs des labours pour montrer l'importance du choix de la forme de la surface active.
- l'analyse de l'effet de la forme des surfaces actives sur l'effort de résistance à la traction
- l'établissement d'un modèle mathématique de l'effort de résistance à la traction en relation avec les caractéristiques géométriques des surfaces actives en utilisant le principe de l'analyse dimensionnelle.
- l'essai de l'optimisation de la forme des surfaces actives et de l'effort de résistance à la traction pour la correction de la forme des surfaces actives et pour la vérification du modèle proposé.
- l'analyse du comportement mécanique des surfaces actives qui a un effet sur la qualité du travail et de la résistance des pièces travaillantes.
- la dernière partie de notre travail portera sur la modélisation de l'effort de résistance à la traction des socs de cultivateurs à dents en relation avec les caractéristiques géométriques et de l'état d'usure des socs.

# PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

## Chapitre 1. Objectifs et importance des opérations de préparations du sol

### 1.1. Objectifs des opérations de préparation du sol

---

L'état physique du sol résulte de l'interaction entre ses propriétés intrinsèques et les différents facteurs extérieurs, d'ordre physique ou mécanique. De ces derniers relèvent les problèmes de travail du sol.

D'une façon générale, il s'agit d'aménager l'état du sol tel qu'il est laissé par une culture pour le rendre apte à la culture suivante. Cela doit être réalisé au cours d'une période définie et dans les meilleures conditions économiques possibles, c'est l'objectif principal du travail du sol.

Le terrain, au départ peut être caractérisé par son état structural qui peut être compact, derrière une culture récoltée en conditions humides ; meuble, derrière une culture sarclée, par exemple la pomme de terre. Parallèlement, il convient de définir l'état du terrain susceptible de fournir le meilleur support à la culture qu'on se propose d'implanter. Cela revient à faire la synthèse des exigences de la culture à ces différents stades : germination, levée, enracinement et récolte. Ces exigences sont fréquemment contradictoires ; aussi, le choix de l'objectif procède-t-il nécessairement d'un compromis, qui, de plus, doit tenir compte du climat le plus probable et des risques comportementaux particuliers attachés à la culture considérée.

Connaissant la situation de départ et l'objectif recherché, le dernier volet du programme de mise en place d'une culture, consiste à passer de l'un à l'autre dans les meilleures conditions possibles de rapidité et de prix de revient. Pour cela, on dispose de la contribution éventuelle des facteurs naturels (régularité des pluies et de sécheresse) et de toute une gamme d'interventions mécaniques : labour, pseudo-labour, tassement par roulage des différentes machines agricoles.

La succession des opérations culturales est déterminée en tenant compte à la fois, des actions spécifiques de chacune d'elles et des caractéristiques mécaniques du sol. Ces dernières telles que la cohésion, la plasticité, l'adhésivité du sol aux outils, compactabilité, sont étroitement liées à la texture du sol et à son humidité au moment de l'intervention. De ce fait, il est extrêmement difficile de définir à priori la succession d'opérations culturales optimales pour une culture donnée. Les possibilités de trouver le sol en bonnes conditions de travail sont suffisamment rares pour que se développent des techniques de non travail du sol, rendues possibles par les progrès réalisés dans le domaine de la conception de nouvelles machines et des herbicides. Tenant compte des objectifs du travail du sol, la connaissance des différents outils aratoires est nécessaire.

## **1.2. Rétrospective sur les outils aratoires et place des charrues à socs**

Afin de situer la place du labour dans l'itinéraire technique à mettre en place pour toute production agricole, nous mentionnons ci-dessous les grands groupes d'outils ou de machines agricoles à mettre en œuvre. Pour cela nous classerons ces groupes comme suit :

- Matériel de travail du sol primaire
- Matériel de travail du sol secondaire
- Matériel approprié

Pour chacun de ces groupes, nous rappellerons les principaux objectifs des différents outils aratoires, leurs actions sur le sol, leurs différentes formes et ainsi que leurs modes de liaisons avec le tracteur.

### **1.2.1. Matériel de travail du sol primaire**

L'objectif principal du 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. Si le sol est retourné, la matière organique est enfouie à des niveaux profonds, les mauvaises herbes sont contrôlées et, sous certaines conditions, des particules fines de sol lessivées et des éléments nutritifs sont restaurés à la surface.

Emotter et retourner sont deux actions importantes surtout sur des sols où la prochaine culture doit être semée rapidement et où beaucoup d'opérations de labour secondaires ou pseudo labour ne pourront pas être effectuées.

Les opérations de "labour" principal doivent être effectuées sur tous les sols, notamment ceux à texture argileuse, pour chaque culture et chaque année. On distingue cinq types d'instruments associés au labour primaire :

- La charrue à socs et versoirs
- La charrue à disques
- Le cultivateur à dents ou chisel
- La houe rotative

#### **1.2.1.1. La charrue à socs et versoirs**

La charrue à versoir, également appelée charrue à socs, a été développée dans les régions d'Europe du nord et de l'ouest, en zones climatiques fraîches et humides. L'avantage principal de cet instrument réside dans le fait qu'il favorise le contrôle des adventices en les enfouissant dans le sol.

L'intensité du travail du sol est également plus élevée. Le travail avec la charrue à socs se caractérise par des sillons ouverts et un retournement du sol.

Les premiers types de charrues à socs destinés à la traction animale se basaient sur le modèle de l'araire. L'âge, les mancherons et une partie du corps de charrue étaient souvent faits en bois. Seuls le soc, et peut-être une partie du corps étaient en fer. Comme le retournement et le mouvement latéral de la tranche de sol provoque une pression sur les côtés de la charrue, un contre - sep doit être monté, souvent avec un talon pour stabiliser la profondeur de labour. Le point de fixation situé à l'avant de l'âge doit être ajusté en fonction de la meilleure traction possible. Les charrues faites entièrement de fer ou d'acier ont évolué



par rapport à la conception simple de départ et sont devenues les instruments de labour les plus communément utilisés dans les pays tempérés occidentaux.

Au lieu d'une charrue complètement équilibrée, l'âge est soutenu à l'avant, près du point de fixation, par un patin ou, plus souvent, par une roue de guéret. Les développements suivants ont amené l'installation de coutres et l'utilisation de corps réversibles. De nombreux types de charrues à socs peuvent être utilisés avec des tracteurs, mais seules les principales seront mentionnées ci-dessous:

- **Les charrues simples** sont équipées de corps de charrues qui versent le sol d'un seul côté, habituellement à droite. Ceci nécessite une méthode de labour particulière, appelée labour "face à face" ou en refendant lorsque le labour commence à partir du pourtour de la parcelle et "dos à dos" ou en adossant lorsque le labour commence au milieu de la parcelle. Le labour est dit à plat lorsqu'il commence à partir d'un côté de la parcelle, mais cela nécessite un autre type de charrue cité ci-dessous.
- **Les charrues réversibles** possèdent deux corps montés de façon symétrique qui sont mis successivement en service par rotation de 180 degrés du bâti autour d'un axe longitudinal. Cet arrangement permet de tourner les sillons du même côté du champ bien que la charrue avance dans des sens opposés. Les corps de charrue peuvent tourner ou pivoter mécaniquement ou hydrauliquement. Si la charrue est correctement ajustée, la surface du sol est presque nivelée, ce qui est très important pour l'irrigation et le drainage ainsi que pour la suite des opérations de préparation du sol lors du pseudo-labours.

On rencontre différents systèmes pour relier la charrue au tracteur.

- **Les charrues traînées** qui sont équipées de roues pour contrôler la profondeur de travail. Ces charrues ne sont pas reliées au relevage hydraulique du tracteur mais à la barre de traction. Elles n'ajoutent donc qu'un faible poids additionnel sur l'essieu arrière du tracteur. Il est facile et rapide d'atteler et de dételé mais elles ne peuvent être transportées (aller et retour au champ) qu'à faible vitesse. Cela peut devenir un problème sur de petites parcelles, par exemple, en cultures irriguées, à cause du manque d'espace disponible pour les manœuvres. De nos jours ces charrues ne sont plus fabriquées car tous les tracteurs sont équipés d'un relevage hydraulique et sont de plus en plus puissants.
- **Les charrues portées** avec plusieurs corps, sont généralement fixées au système d'attelage trois points du tracteur. Des systèmes de liaison rapide peuvent convenir. La charrue n'est jamais soutenue par des roues de guéret car il y a contrôle de profondeur de labour par l'hydraulique du relevage trois points. Au cours des opérations, une grande partie des forces, comprenant le poids de la charrue, sont transférées sur l'essieu arrière du tracteur où il y a moins de patinage. Une force importante, environ trois fois le poids de la charrue, est nécessaire pour soulever la charrue du sol, ce qui limite le nombre de corps pour un tracteur de puissance donnée.

Plusieurs formes de socs, de versoirs et d'autres parties, comme les coutres sont disponibles en fonction de conditions spécifiques liées aux sols comme par exemple les pentes et les besoins des cultures.

### **1.2.1.2. La charrue à disques**



La charrue à disques produit généralement une qualité de labour moins intense et différente de la charrue à socs mais qui est mieux adaptée aux conditions difficiles, telles que sols riches en racines, en pierres et autres charges. Les charrues à disques sont rarement utilisées sur des sols lourds et fortement humides, principalement pour les raisons suivantes:

- Elles ne pénètrent pas dans le sol grâce à leur poids mais ont besoin de poids supplémentaires. Ceci les rend très difficiles à manipuler et risquent de créer des lissages dans le sol, ce qui est préjudiciable pour la germination et la levée.
- La poussée de côté produite par le disque ne peut être absorbée par un contre – sep passif (comme avec la charrue à socs), une roue de guide est cependant nécessaire.

Pour les raisons citées ci-dessus, les charrues à disques destinées aux labours ne peuvent pas être traînées mais portées.

Les charrues à disques pour tracteurs sont des instruments très lourds munis d'un à huit disques concaves. La profondeur de travail est située entre 25 et 40 cm. Chaque disque est monté sur un bras avec un axe muni de roulements. Les charrues à disques simples sont fréquentes mais les charrues réversibles existent également mais en quantité plus faible.

Afin d'éviter d'avoir besoin de deux séries d'outils pour travailler le sol, comme c'est le cas avec la charrue à socs réversible, les disques sont installés sur une sous - structure et peuvent pivoter de 30 à 40 degrés. Lorsqu'on ajuste l'angle des disques, il faut également inverser la roue guide.

#### **1.2.1.3. Les outils à dents : le chisel**

Le chisel peut être utilisé à la place des charrues à disques et à socs dans de nombreux cas, particulièrement sur des sols de faibles teneurs en eau et de couvert végétal faible. Les outils à dents comme le chisel sont généralement utilisés pour les travaux primaires sur sols secs.

Dans le cas des tractions mécaniques, des dents rigides, rigides à ressort ou flexibles, sont montées sur un châssis métallique. Elles sont maintenues sur 2 à 4 rangées espacées, par des attaches en acier soudées fixes ou des brides ajustables.

La profondeur de travail est contrôlée par les roues dites de soutien ou de profondeur, montés à l'arrière. Les dents rigides, souvent accompagnées d'un dispositif escamotable servant de protection contre les pierres, sont réalisées en acier de qualité supérieure et elles sont droites ou légèrement recourbées et angulaires afin de cisailer le sol. Des dents rigides, installées avec un plus petit angle, conviennent particulièrement pour un travail profond. Les dents flexibles, essentiellement fabriquées à partir d'un acier traité, sont aplaties et légèrement recourbées pour permettre de contourner les obstacles. Elles sont normalement moins adaptées pour un travail profond. Les dents rigides à ressort sont installées en pivots et protégées par des ressorts en spirale.

#### **1.2.1.4. Les outils animés : rotoculteur**

Contrairement aux outils passifs, tels que les charrues et les outils à dents comme le chisel et les cultivateurs à dents, les outils animés, comme le rotoculteur, nécessitent un tracteur avec une prise de force et conviennent particulièrement bien pour un retournement intensif du sol et de la matière organique par fraisage. Tenant compte de l'importante de la force, la capacité de travail (travail par unité de temps), limitée et le risque d'une pulvérisation excessive, les rotoculteurs sont rarement utilisés pour les cultures céréalières, particulièrement en sols battants. Ces outils sont généralement utilisés seuls pour des

travaux peu profonds quand les conditions de sol s'y prêtent. Ils sont très utiles pour la réalisation d'un lit de semence.

### **1.2.2. Matériel de travail du sol secondaire**

Ces instruments sont utilisés pour un travail du sol peu profond, ils complètent le travail réalisé par les charrues à socs ou à disques. Ce groupe d'outils a une fonction très importante sous les climats tropicaux et subtropicaux où ils sont généralement utilisés pour le travail primaire. Le travail secondaire souvent appelé opération de pseudo labour est réalisé par le cover-crop qui est un outil à deux rangées de disques, la première est composée de disques crénelés la seconde de disques lisses et par des outils à dents.

#### **1.2.2.1. Outils à dents : Les cultivateurs**

Les cultivateurs légers sont construits de la même façon que les chisels. Cependant, ils sont plus légers et les dents, souvent flexibles, sont plus rapprochées. Ils peuvent être munis de socs spéciaux comme les pattes d'oie ou lames afin de combiner une pulvérisation avec un désherbage mécanique. Les cultivateurs légers sont souvent utilisés, aussi bien pour la préparation d'un lit de semences que pour le binage ou pour rompre des croûtes entre les lignes de plantes ou dans le sillon entre les billons.

#### **1.2.2.2. Les herse**

Les herse sont généralement traînées pour les opérations de travail du sol après le labour en sol léger ou après les pseudos labours sur sols plus lourds. Leur utilisation permet d'affiner la structure du lit de semence sur une faible profondeur et surtout de niveler la surface du sol. Pour des raisons de régularité du semis, leur utilisation derrière les semoirs est également possible. Un grand nombre de types de herse est disponible, comme la herse à dents rigides ou flexibles. Il existe d'autres types de herse comme la herse alternative et la herse rotative.

## **1.3. Objectifs des labours et leurs classifications**

---

### **1.3.1. Objectifs des labours**

Après les récoltes, la couche arable du sol est souvent caractérisée par un état physico - mécanique impropre au développement d'une autre culture. Cet état initial présente une forte cohésion et un tassement souvent excessif, suite aux nombreux passages des machines agricoles utilisées pour les semis, les traitements et fertilisation de la culture précédente et enfin les récoltes. Ces actions sont d'autant plus accentuées par celles du climat caractérisant la période estivale.

Les labours ont donc pour but, la transformation de cet état initial du sol en un état structural favorable pour la mise en place de la nouvelle culture.

Tenant compte des exigences agro - techniques de la culture envisagée, les objectifs des labours peuvent être énumérés comme suit :

- Destruction et enfouissement des mauvaises herbes et des résidus végétaux laissés après les récoltes.
- Régénérer la structure du sol par une augmentation de la porosité.
- Permettre l'infiltration de l'eau des premières pluies.

- Permettre la réalisation dans de bonnes conditions des opérations suivantes (pseudo - labour, façons superficielles et semis).

L'aboutissement à ces divers objectifs doit mettre en œuvre plusieurs mécanismes parfois fort complexes, dans certains cas liés à l'état initial du sol et aux conditions d'interventions (moment d'intervention et état du matériel). Des opérations complémentaires tels que les pseudo - labours et travaux superficiels sont nécessaires pour finaliser l'action des corps de charrues à socs.

Avant de commencer les opérations de travail du sol, l'agriculteur se doit de fixer des priorités en relation avec la culture à mettre en place. Selon Faure (1968) la préparation du sol doit être considérée comme le résultat d'un programme dont le labour constitue le premier élément et souvent le plus important car il oriente ou prépare les interventions à venir.

### 1.3.2. Classification des labours

Le labour consiste à travailler le sol en profondeur afin de créer un milieu favorable à la germination, puis à l'installation des racines des plantes. Le labour permet en outre l'enfouissement de matières organiques (fumier, chaumes) et assure la destruction des plantes adventices. On distingue différents types de labour selon l'aspect de la surface du sol après le passage de la charrue:

- **Labour à crêtes vives:** Le "rectangle" découpé par la charrue est conservé tel quel et partiellement retourné, formant une ligne angulaire continue favorable à la pénétration de l'eau.
- **Labour anguleux:** la bande de terre est légèrement disloquée, le passage de l'eau et de l'air est moindre que les labours du type précédent.
- **Labour arrondi:** la bande de terre est disloquée, le sol présente de petites mottes. La surface du sol présente des ondulations
- **Labour plat:** la bande de terre et les mottes sont complètement disloquées. Ces deux derniers types de labour précèdent le semis ou la plantation; ils doivent être travaillés très vite pour éviter la formation d'une couche peu perméable.

Ces différents labours sont exécutés à la charrue à socs ou à disques, différemment selon la saison, la culture à implanter et l'état initial du sol.

## 1.4. Place et importance des labours dans l'itinéraire technique

---

Tenant compte des objectifs cités ci-dessus, les labours occupent la première place dans l'itinéraire technique pour la mise en place des cultures d'une manière générale. Une mauvaise réalisation de cette opération, entraîne plusieurs effets néfastes au développement du système racinaire, ce qui se répercute sur celui de la plante au cours de son cycle biologique.

Meynard et al, (1981) et Nolot, (1983) ont montré dans leurs travaux, qu'une forte proportion de zones compactes dans les premiers horizons de la couche arable pouvait diminuer l'absorption d'azote de 30 % environ, le nombre de grains par mètre carré et les rendements des céréales de 15 à 20 % environ. Ce phénomène est généralement associé à une faible densité racinaire dans ces horizons où la structure du sol est défavorable.

Par contre, dans le cas d'une porosité trop élevée, les échanges, entre les racines et le sol seront difficiles, ce qui affectera le développement de la plante dans son ensemble

car les racines, en mauvais contact avec le sol, trouveraient des difficultés pour puiser les éléments nutritifs.

Au vu de ces remarques, la réalisation des labours doit faire l'objet d'une attention très particulière tout en tenant compte des opérations culturales ultérieures (pseudo - labour, façons superficielles et enfin le semis).

L'importance de cette première étape de l'itinéraire technique pour la mise en place d'une culture, réside aussi au niveau du temps et du moment de sa réalisation et donc de la consommation en carburant.

En effet, la réalisation des labours est conditionnée par les facteurs climatologiques, telle que la chute des premières pluies et surtout des intensités de celles-ci.

Nous remarquerons donc, que l'importance de cette première opération qui a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche, est à prendre en considération pour la suite des travaux et des autres étapes pour l'installation d'une culture et particulièrement, pour les grandes cultures. Cette considération sera orientée sur le choix de la forme de pièces travaillantes en général et de celui des surfaces actives des corps de charrues à socs en particulier ainsi que des conditions de travail comme l'état initial du sol et de la vitesse d'avancement des outils aratoires.

## **1.5. Influence du travail du sol sur la réserve en eau.**

---

Afin d'analyser et de déterminer l'influence des techniques de préparation du sol sur la réserve en eau, il est nécessaire de rappeler la relation entre l'eau et le sol à l'état statique et surtout à l'état dynamique. La teneur en eau est fonction de la porosité et de la perméabilité du sol. Cette caractéristique qui est la porosité est donc conditionnée entre autres par les opérations de travail du sol.

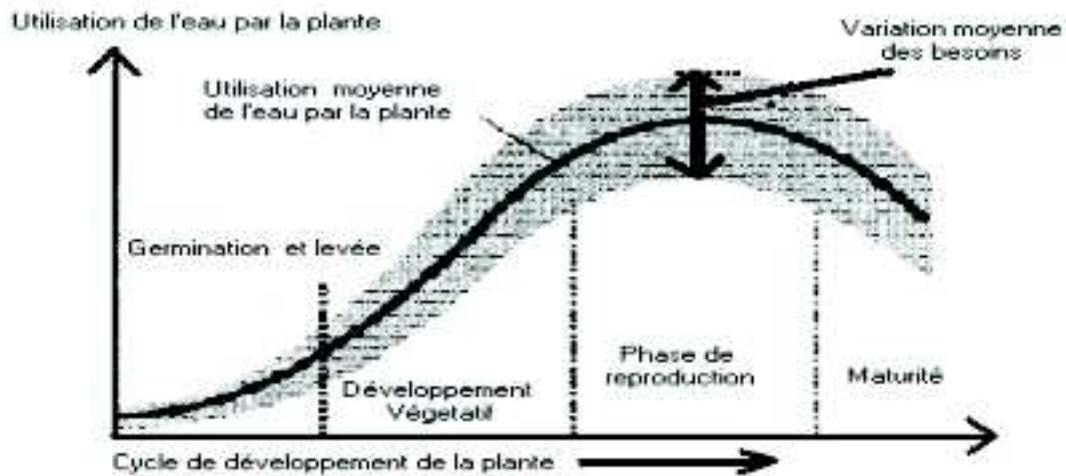
En effet, c'est principalement l'espace poreux, laissé par les différents passages des outils aratoires, qualifié de structural, qui assure la circulation rapide de l'eau grâce à ses dimensions plus importantes. Ceci est l'une des raisons qui incite l'agriculteur à labourer le sol avant les premières pluies d'automne, en effet après les labours la porosité du sol est très importante ce qui permet donc l'infiltration de l'eau dans le sol.

Les conséquences de l'intervention d'un outil de travail du sol ne se limitent donc pas uniquement au seul domaine de la modification mécanique de l'état structural, l'un des nombreux domaines où le travail du sol a une influence certaine, est celui de la conservation de l'eau dans la couche arable du sol en permettant à cette eau de pénétrer et de circuler convenablement.

Ces conséquences sont aussi étroitement liées à l'humidité du sol au moment de l'intervention des pièces travaillantes des outils aratoires. En effet une humidité très élevée entraîne, lors des labours avec charrues à socs et surtout à disques, des lissages du fond de raie et de la muraille, ceux-ci empêcheraient l'infiltration de l'eau des pluies ultérieures, et plus tard, cela entraînera un mauvais développement des racines lors des premiers stades végétatifs. En plus de ces phénomènes, la teneur en eau du sol, lorsqu'elle est élevée, a un effet négatif sur l'état structural du sol. En effet nous rencontrerons des problèmes de cohésion, de tassement et souvent de coalescence qui risqueraient d'être irréversibles.

L'intervention des outils aratoires, particulièrement les charrues à socs, pour la mise en place d'une culture, doit donc tenir compte des besoins en eau de la plante et surtout de la teneur en eau du sol au moment des labours. Ceci permettrait de fixer la profondeur

de travail pour permettre une réserve en eau que la plante utilisera au moment voulu. Pour cela nous reproduisons ci-dessous un graphe mettant en relation l'utilisation de l'eau par une plante pendant son cycle de développement (Scott M., 1998).



**Fig.1:** Courbe d'utilisation de l'eau par la plante au cours de son cycle de développement

L'analyse de cette courbe nous renseigne sur l'importance des besoins en eau pendant la phase de reproduction de la plante. Pour cela la technique de préparation du sol et surtout l'outil choisi à cet effet doivent répondre à ce besoin qui se situe bien loin dans le temps par rapport à la préparation du sol. En culture irriguée l'apport d'eau peut être effectué au moment de cette phase de reproduction. Dans le cas contraire, un labour bien réalisé sera la solution à adopter car l'un des objectifs de cette opération est l'amélioration de la réserve en eau dans le sol.

## 1.6. Caractéristiques thermiques du sol et rôle des opérations culturales

La température du sol influence la vitesse et l'intensité de nombreux processus biologiques et physiques dans le sol. En deçà et au-delà de certains seuils, elle peut même les interdire. Parmi ces processus, nous citerons la germination, la croissance racinaire, l'activité de la microflore et, aux basses températures, le gel du sol et les différentes conséquences physiques et mécaniques sur le sol et la plante.

La température en un point donné du sol dépend du bilan de l'énergie calorifique et de la capacité calorifique en ce point. Si l'on se place dans le cas précis, le plus important en agronomie, du réchauffement du sol au printemps, la première caractéristique qui intervient est l'état de la surface du terrain qui, en sol nu, commande le taux d'absorption de l'énergie solaire incidente.

Les terres claires à surface lisse et humide réfléchissent davantage le rayonnement incident que les terres foncées à surface rugueuse. Le type de labour à choisir et donc, la forme de l'outil à utiliser est à prendre en considération.

La transmission de l'énergie absorbée est fonction de la conductibilité thermique du sol ; celle-ci est d'autant plus élevée que le sol est plus compact et qu'il est plus humide. Un sol peu conducteur, parce que très poreux et peu humide, aura, pour un niveau donné de

chaleur absorbée, une élévation plus rapide de la température de sa couche superficielle, et cela d'autant plus que la capacité calorifique spécifique d'un tel matériau est généralement assez faible.

En définitive, ce réchauffement de la partie superficielle du sol dépend en premier lieu de sa teneur en eau, mais aussi de sa structure (macroporosité) et de l'état de sa surface (microrelief laissé par le labour). C'est donc la résultante d'un ensemble de données liées à la nature du terrain et à la manière dont il est travaillé.

Le rôle des opérations de travail du sol, est donc déterminant sur cette caractéristique. Les échanges thermiques entre le sol et le milieu extérieur dépendent en grande partie de la taille des agrégats de sol ; plus ceux-ci sont petits, plus la surface de contact avec le milieu extérieur est importante.

Il en ressort donc, au travers de tous ces constats, que la recherche d'une amélioration des indices qualitatifs des opérations de préparation du sol et plus particulièrement des labours doit être l'une des préoccupations majeures de l'agriculteur. Ceci impose donc un choix adéquat de la forme des outils aratoires et notamment de la forme des versoirs à utiliser.

## **1.7. Travail du sol et matière organique**

---

Les effets du travail du sol sur la dynamique de la matière organique du sol ont été étudiés depuis longtemps pour leurs conséquences sur les propriétés physiques, érosion et fertilité. Plus récemment, les préoccupations en matière d'émissions de gaz à effet de serre ont conduit les scientifiques à examiner le potentiel des sols à stocker du carbone organique, en particulier sous l'influence des pratiques culturales.

En effet, il existe une forte interaction entre les pratiques de travail du sol et la dynamique des matières organiques du sol. Le travail du sol ou le non travail détermine les modalités d'incorporation et de décomposition des matières organiques fraîches retournant au sol. Ces matières organiques en décomposition modifient en retour les propriétés physiques du sol et en particulier sa structure.

On ne peut donc dissocier aisément les effets du travail du sol sur la décomposition des matières organiques fraîches et les effets affectant la structure du sol et ses propriétés. En effet le travail du sol détermine plusieurs facteurs parmi lesquels nous citerons :

- La localisation initiale des résidus de récolte, le travail du sol influence par conséquent la quantité de résidus laissés à la surface du sol.
- La quantité de matière organique fraîche incorporée, la profondeur d'incorporation et la distribution spatiale des résidus.

Indirectement, la localisation initiale détermine donc, les conditions physiques (température, humidité) auxquelles les résidus sont soumis lors de leur décomposition et donc la vitesse de décomposition, d'où l'importance des types de labours à réaliser.

Selon Recous S. (1993) et Laurent F. (1995), l'effet majeur du changement de pratiques de travail du sol est principalement une modification dans la localisation du carbone organique, avec un gradient très prononcé dans les situations sans travail du sol.

Ce gradient très fort est observé dans les huit premiers centimètres, alors qu'il n'y a pas de différences observées en dessous de 15 cm. En effet, dans le traitement "semi direct", plus de 50% du carbone récent se trouve dans les 4 premiers centimètres et seulement 20%



se trouvent en dessous de 25 cm, alors que le carbone est réparti de manière homogène dans la couche travaillée pour le traitement "labour".

Tenant compte de l'un des principaux objectifs du labour, à savoir le retournement de la bande de terre et donc de l'incorporation des résidus végétaux dans le sol, la charrue à socs est l'outil aratoire à privilégier lors des techniques de préparation du sol pour un enrichissement du sol en matière organique en profondeur.

## **1.8. Approche comparée du machiniste et de l'agronome quant à l'étude du travail du sol.**

---

La préparation du sol pour la mise en place d'une culture est une préoccupation commune du machiniste et de l'agronome mais la vision de chacun est différente. La préoccupation commune réside dans le fait que l'objectif agronomique est le même, à savoir mettre la semence dans des conditions adéquates pour sa germination et son développement jusqu'à maturation. Outre ceci le machiniste doit s'intéresser au côté économique et ergonométique.

Pour ce qui est du côté économique, le machiniste doit concevoir ou proposer une forme d'outil aratoire en relation avec l'état initial du sol qui est avant tout un système générateur de forces résistantes vis-à-vis de l'outil en recherchant à minimiser les besoins énergétiques pour la mise en place d'une culture.

## **1.9. Conclusion**

---

Il apparaît donc, au travers de toutes ces remarques, que le travail du sol doit jouer un rôle important sur l'évolution de l'état du sol et sur ses propriétés, tant physico-chimiques que mécaniques, qui doivent offrir à la culture, un milieu favorable à son développement.

Pour cela les choix des moments d'intervention et surtout des moyens matériels à mettre en œuvre doivent être définis en fonction de l'état initial du sol et de ses caractéristiques physico-mécaniques ainsi que des exigences de la culture à mettre en place.

Le choix de la forme des pièces travaillantes des outils aratoires, principalement de la forme des surfaces actives des corps de charrue à socs et des socs de cultivateurs à dents, doit faire l'objet d'une attention particulière.

# **Chapitre 2. Mode d'action d'un corps de charrue et théorie du labour**

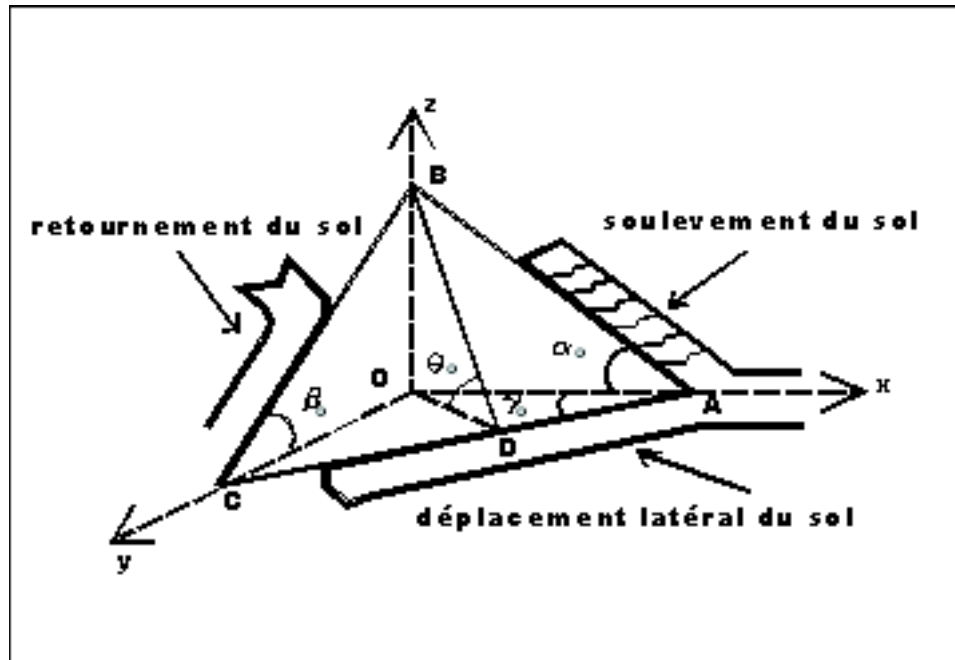
## **2.1. Approche théorique du mode d'action d'un corps de charrue à soc sur le sol**

---

Vu la complexité de la géométrie des corps de charrues à socs, un certain nombre de simplifications ont été apportées pour l'étude et surtout la quantification des phénomènes

tant physiques que mécaniques de l'action de ce premier outil pour la mise en place d'une culture.

Afin de comprendre le mode d'action de la surface active d'un corps de charrue à socs sur le sol, cet outil 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.



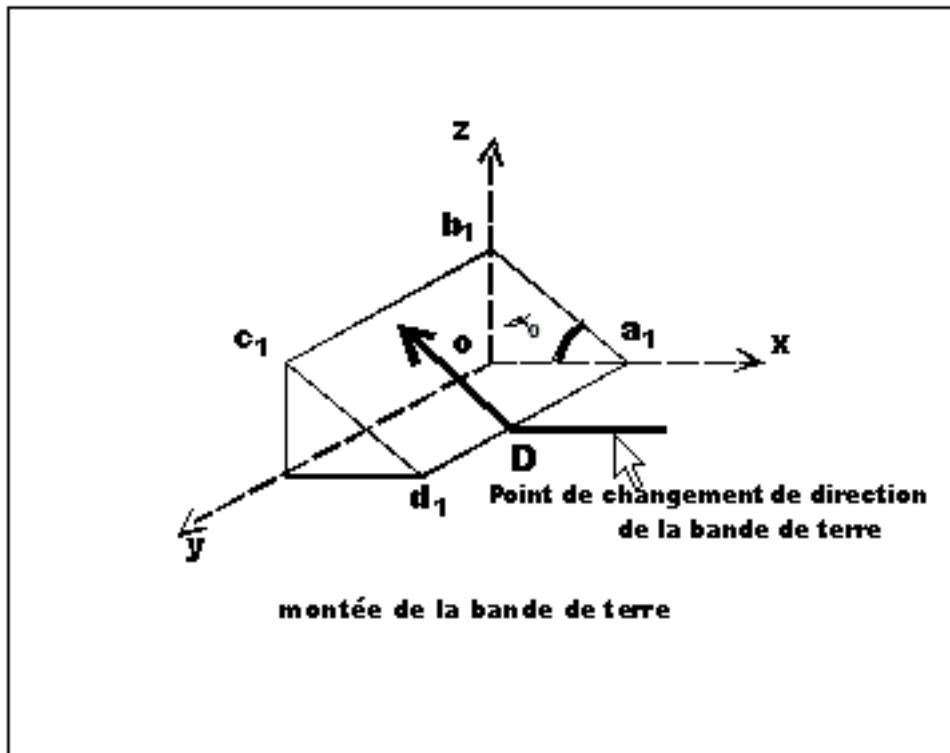
*Fig. 2 : Tétraèdre simulant l'action du corps de charrue à soc*

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 :

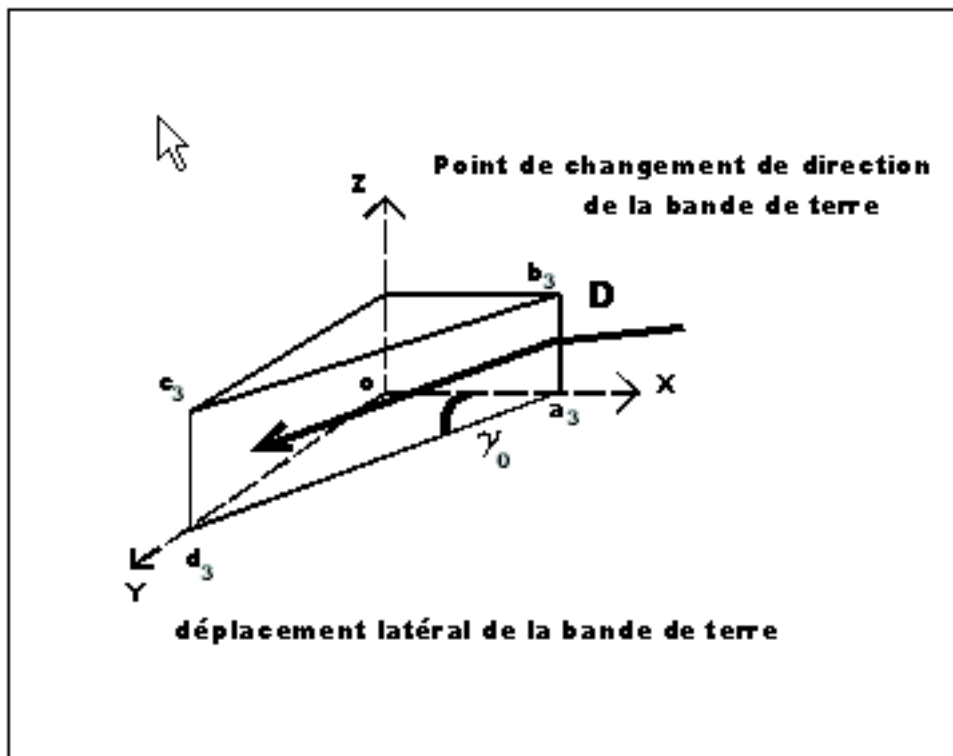
La première clavette (fig.3) met en évidence l'angle d'entrure ( $\alpha$ ), qui permet le soulèvement de la bande de terre, cette clavette correspond au soc du corps de charrue.





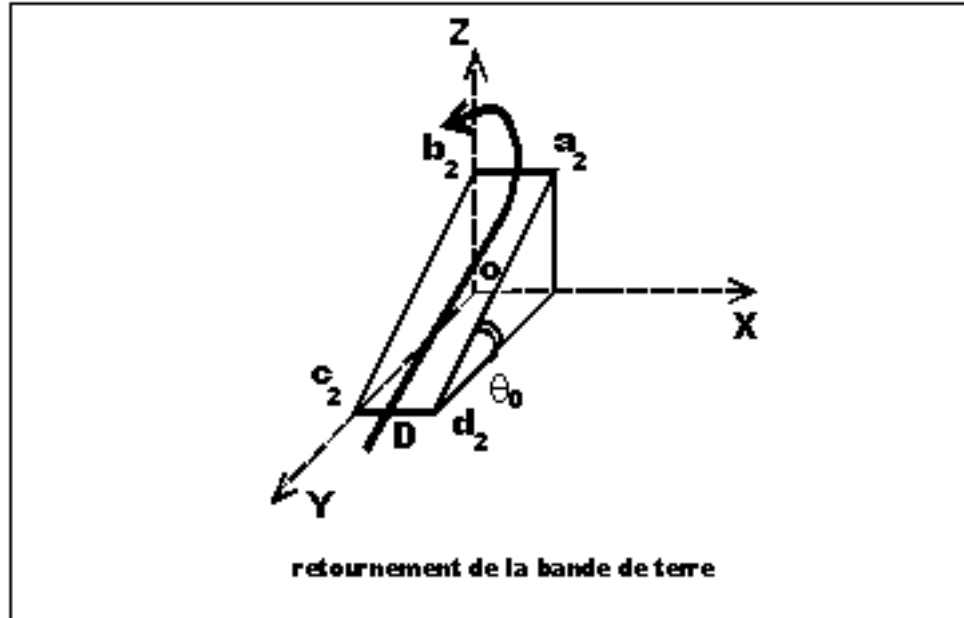
*Fig. 3 : Clavette illustrant le soulèvement de la bande de terre*

La deuxième clavette (fig.4) schématise le déplacement latéral de la bande de terre et délimite l'angle d'attaque ( $\gamma$ ).



*Fig. 4 : Clavette illustrant le déplacement latéral*

La troisième clavette (fig.5) 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. 5 :** Clavette illustrant le retournement de la bande de terre

Cette simplification permet donc de comprendre le déplacement de la bande de terre sur la surface active d'un versoir. Elle permet également de classer les formes des versoirs en relation avec les valeurs des angles caractéristiques comme mentionnés dans le tableau suivant:

**Tableau 1 :** valeurs des angles initiaux pour différentes formes de versoirs.

Type de versoirs	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 semi - hélicoïdale	20 – 25	12 – 15	30 – 35
Forme hélicoïdale	20 – 25	12 – 15	30 - 35

Source : Binesse M., 1970

## **2.2. Mode d'action d'un corps de charrue à socs sur le sol**

La charrue découpe des bandes de terre par une double action de cisaillement, horizontale par le soc, et verticale par le coutre. L'élévation de cette bande de terre et sa torsion sur le versoir entraînent la création de surfaces de cisaillement dépendant de l'état du matériau au moment du travail.

Les fragments de sol, ainsi créés, s'agencent les uns par rapport aux autres de manière variable, selon la forme de l'outil plus particulièrement de celle du versoir, sa vitesse d'avancement et ses conditions d'emploi telle que la vitesse d'avancement.

L'état du sol obtenu est une composition complexe de mottes de formes et dimensions différentes. Cette composition confère à la couche arable un état physico mécanique respectivement quantifiée par la porosité, l'arrangement des différents agrégats et par la cohésion du sol.

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.

Pour atteindre ces deux objectifs, une porosité et une cohésion données, le corps de charrue, par sa forme, agit de différentes façons suivant trois phases successives qui sont respectivement :

### **2.2.1. Phase de cisaillement**

Cette première phase, réalisée par le soc et le coutre, est celle qui délimite la profondeur et la largeur de travail du labour. Le rapport de ces deux paramètres définit l'intensité du retournement de la bande de terre. Le cisaillement du sol est aussi la phase qui exige le plus d'énergie.

### **2.2.2. Phase de soulèvement et de déplacement de la bande de terre**

Une fois la bande de terre découpée, elle est soulevée par l'avancement du corps. La trajectoire de la bande de terre est définie par la forme de la surface active du corps de charrue.

### **2.2.3. Phase de retournement de la bande de terre**

C'est la phase la plus importante du labour dont l'un des premiers objectifs est le retournement de la bande de terre. Le versoir agit après le coutre et le soc, il a pour rôle de retourner la bande de terre sur elle-même et de la rejeter latéralement, après l'avoir retournée de telle façon que les résidus végétaux qui se trouvaient à la surface du sol soient, après le passage de la charrue, à la partie la plus profonde du labour.

On comprend sans peine que, pour obtenir le retournement, le versoir ne doit pas trouver la bande de terre complètement découpée à l'avance par les deux premières pièces (coutre et soc) ; s'il en était autrement, le versoir, quelque fut sa forme, aurait uniquement pour rôle, de déplacer latéralement, sans retourner, la bande de terre.

## **2.3. Comportement du sol sous l'action d'un outil aratoire**

---

Sous l'action des éléments du climat, le sol est soumis au cours des saisons à des contraintes qui sont à l'origine de l'évolution de ses propriétés physiques et chimiques. Les conditions hydriques sont particulièrement déterminantes sur le comportement du sol. Elles peuvent en effet entraîner certains phénomènes physiques créant des préjudices naturels. En agronomie par exemple, le compactage du sol peut entraîner une modification néfaste de sa structure qui se répercutera certainement sur le développement des racines. De même, le retrait du sol, après un dessèchement, peut évoluer jusqu'à sa fissuration et nuire gravement au système racinaire de la plante. Les cultures peuvent ainsi en être irréversiblement affectées.

Le sol étant le milieu d'intervention et d'action des outils aratoires, la maîtrise de ces propriétés physico - mécaniques est plus que nécessaire pour toute étude des outils aratoires.

La connaissance du sol, substrat de la culture à mettre en place, est non seulement indispensable à l'étude du développement de la plante mais aussi, à la conception de la forme des surfaces actives des outils aratoires et également au choix de ces dernières.

A cet effet nous présentons dans ce qui suit les différentes caractéristiques du sol agricole utiles à l'analyse et à la compréhension du mode d'action des outils aratoires et donc à leurs conceptions.

Avant d'analyser le comportement physico -mécanique du sol sous l'action d'un outil aratoire, il est nécessaire de rappeler ses principales propriétés physiques et mécaniques. Ces deux propriétés influent sur la réaction du sol et de son état après l'action des outils et sur l'intensité de l'effort nécessaire à la modification de l'état initial en un état final recherché.

### **2.3.1. Propriétés physiques**

Les propriétés physiques du sol sont étroitement liées à sa composition granulométrique et aux conditions hydriques.

L'argile, le sable et le limon, sont les trois éléments de base pour décrire la texture des sols. Les sols argileux sont souvent qualifiés par les agriculteurs de sols lourds, car très souvent difficiles à travailler. Cette catégorie de sol doit contenir au moins 35 à 40 pour-cent de particules argileuses.

Lorsque le pourcentage de sable est plus important, les sols sont qualifiés de légers car faciles à travailler ; dans le cas où les proportions de sable, d'argile et de limon, sont équivalentes les sols seront dits sols moyens.

En fonction de la composition texturale du sol et de sa teneur en eau, le choix de l'outil à utiliser sera respectivement, la charrue à socs pour les sols lourds et moyens, les outils à dents seront par contre utilisés sur des sols légers.

Plusieurs études sur le sol ont été réalisées par plusieurs chercheurs de différentes spécialités. Les pédologues étudient le sol comme un corps naturel sans se concentrer nécessairement sur son utilisation et sa réaction par rapport aux outils aratoires.

Si les pédologues essaient de trouver des moyens pour contrôler le sol de sorte qu'il fournisse les rendements maximums de récolte sans épuiser cette ressource importante, le rôle du spécialiste en machinisme agricole, sera l'analyse du comportement de ce substrat sous l'action des outils aratoires et sous l'action des organes de roulement des moyens de traction et des machines agricoles tels que les semoirs, les épandeurs d'engrais et de produits de traitement et surtout ceux des machines de récoltes qui ont des effets de compaction souvent préjudiciables sur les propriétés physiques du sol.

Parmi les propriétés physiques du sol, nous citerons principalement celles ayant une influence directe avec le mode d'action de l'outil ou plus exactement avec le comportement de l'outil sur le sol. La première propriété est la structure qui est illustrée par sa porosité initiale elle même définie par les masses volumiques réelle et apparente, la deuxième propriété est la teneur en eau.

#### **2.3.1.1. La structure du sol**

Selon Monnier et Stengel (1982), au plan physique, le sol est un système poreux, caractère résultant de l'organisation de ses constituants solides à différents niveaux. Ces auteurs distinguent deux niveaux :

Le premier est qualifié de textural : dans ce cas, si l'on considère une masse de terre à une teneur en eau donnée, le volume poral résultant de l'arrangement des constituants élémentaires, est caractéristique du matériau. C'est à dire qu'il est lié à la nature de ces constituants et aux conditions énergétiques de leur mise en place au cours de la pédogenèse, on parle alors de porosité texturale (Fies, 1971). La mesure de la densité texturale se pratique sur échantillons soumis à une histoire hydrique ou, en établissant la courbe de retrait de petits agrégats (Fies et Stengel, 1981).

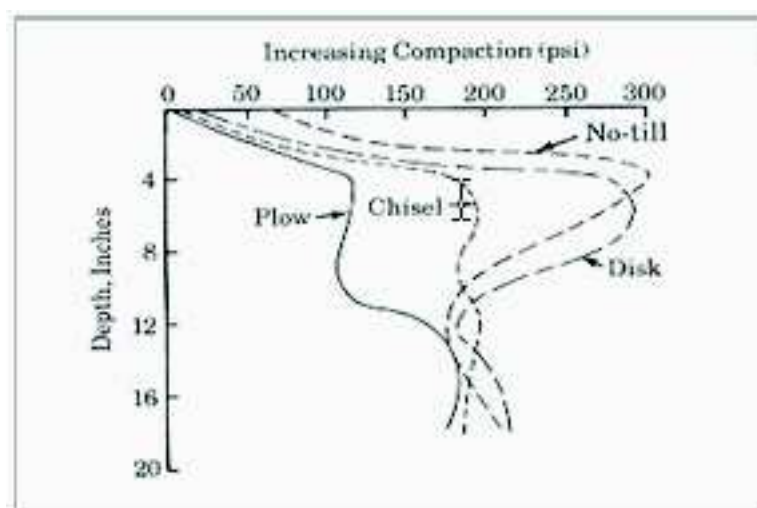
Le deuxième niveau qualifié de structural, est constitué par les vides ménagés entre les éléments structuraux résultant de l'agrégation des assemblages élémentaires. Ce niveau comprend : les fissures créées par le retrait du matériau lors de sa dessiccation, les galeries d'origine biologique et les défauts d'ajustement entre les éléments structuraux en liaison avec leur forme. On parle alors de porosité structurale.

### 2.3.1.2. Effet des outils aratoires sur la densité apparente du sol

Dans les nouvelles techniques de préparation du sol, celui-ci a généralement une densité apparente élevée par rapport au sol travaillé avec les méthodes classiques. Les sols ayant une densité apparente élevée possèdent moins de pores ou d'espaces vides ce qui a pour conséquence un mauvais développement du système racinaire et une mauvaise infiltration de l'eau ce qui entraîne une faiblesse de la réserve en eau.

Ces remarques font ressortir l'importance des labours par rapport aux techniques de travail minimum et de semi direct. C'est d'ailleurs pour ces raisons que plusieurs travaux de recherche ont montré l'intérêt de revenir aux travaux profonds, c'est à dire aux méthodes classiques de préparation du sol, au moins tous les trois ans.

Nous reproduisons ci-dessous l'effet comparé de quatre techniques de préparation du sol, utilisant respectivement, la charrue à socs, la charrue à disque, le chisel et un semi-direct sur la densité apparente du sol, illustrée par la résistance pénétrométrique (cône Index), travaux réalisés par Scott M. (1998 ).



**Fig. 6:** Evolution de la résistance pénétrométrique sous l'effet des différentes techniques de préparation du sol.

Nous remarquerons sur cette représentation graphique, que la parcelle travaillée avec la charrue à socs, présente une faible résistance à la pénétration du cône, donc moins compacte, par rapport à celles travaillées respectivement avec un chisel, une charrue à disques et la parcelle non travaillée. Ce qui montre l'importance de l'effet des techniques de préparation du sol sur le développement du système racinaire, d'où l'intérêt de prendre des précautions pour l'introduction des nouvelles techniques, notamment le semis direct.

### **2.3.2. Propriétés mécaniques**

Les propriétés mécaniques et plus particulièrement la cohésion du sol, elles-mêmes dépendantes des propriétés physiques plus particulièrement celle relative à la teneur en eau, sont les bases fondamentales de la conception des outils aratoires.

En effet le sol par ses caractéristiques mécaniques impose à l'avancement de l'outil une force de réaction dont l'intensité est fonction de la cohésion, elle-même fonction de la texture et de la teneur en eau.

Pour comprendre le mode d'action des outils sur le sol, il est nécessaire de rappeler quelques notions fondamentales de la mécanique des sols.

Si pour les matériaux isotropes, les principes de la mécanique des sols sont relativement simples à appliquer, pour les sols agricoles caractérisés par une anisotropie importante, l'application de ces principes n'est pas évidente. C'est la raison principale pour laquelle, la majorité des essais et des travaux de recherche, relatifs à l'effet de l'état du sol sur l'effort de résistance à la traction, se réalisent sur des sols remaniés ou complètement artificiels.

#### **2.3.2.1. Notions de contraintes et de déformation dans le sol**

Faute de pouvoir décrire de façon précise, le comportement d'un volume ou masse de sol, depuis son état initial jusqu'à la rupture, la mécanique des sols s'est inspirée des modes de rupture observés dans la nature pour développer des lois de comportement simplifiées. (Magnan, 1991). Deux modes de rupture ont été observés:

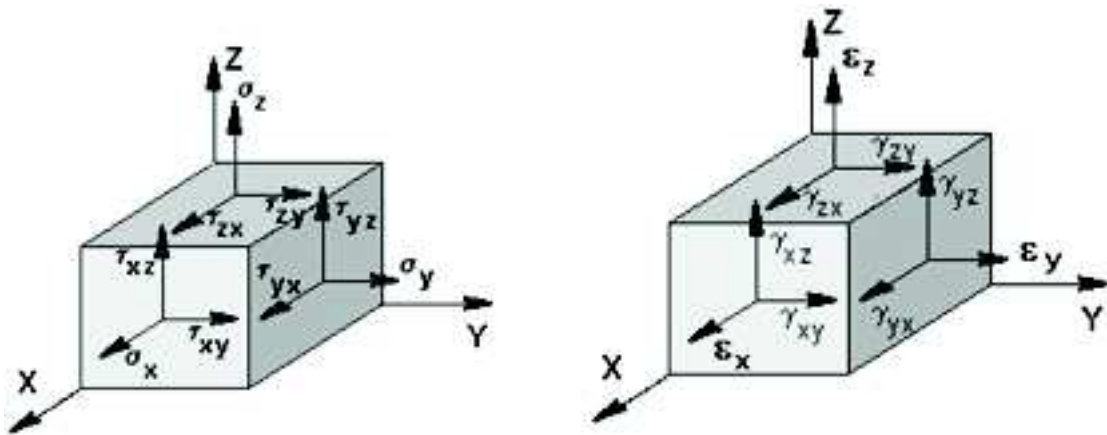
- Les ruptures par glissement sur une surface
- Les ruptures par plastification et écoulement d'une masse de sol.

Dans le cas de l'action des outils, 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 et tangentielles, réparties dans l'espace tel que montré sur la figure suivante:

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

*Fig.7 : Contraintes et déformations normales et tangentielles*



La nature et la valeur de ces déformations sont fonction de la texture, de la structure et surtout de la teneur en eau et de la valeur de l'effort appliqué sur la bande de terre. La quantification de ces déformations est établie à partir des relations :

Contrainte normale (compression)

$$\sigma(x, y, z) = E \cdot \varepsilon(x, y, z)$$

Contrainte tangentielle (cisaillement)

$$\tau(x, y, z) = G \cdot \gamma(x, y, z)$$

avec :  $E$  = module de Young ou module d'élasticité longitudinale qui est une propriété mécanique du matériau (daN / cm<sup>2</sup>).

$G$  = module de Coulomb ou module d'élasticité transversale qui est également une propriété mécanique du matériau (daN / cm<sup>2</sup>).

Ces deux relations représentent la loi de Hooke généralisée à la compression et au cisaillement, elles mettent en évidence la proportionnalité entre les contraintes et les déformations.

Les deux contraintes  $\sigma$  et  $\tau$  sont reliées par la loi de Coulomb comme suit :

$$\tau = C + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

où :  $C$  = cohésion du sol (daN / cm<sup>2</sup>)

$\varphi$  = angle de frottement interne du sol.

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.

Sous l'effet des outils aratoires, le sol est appelé à subir une série de modifications chronologiques entre son état initial et son état final. Cette série de modification est étroitement liée à la forme de la surface active de l'outil. Dans le cas des outils à surface complexe, tel que celle des 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.

Ces rappels sur la mécanique des sols sont donc nécessaires pour la compréhension du mode d'action des outils aratoires.

## **2.4. Interactions sol - conditions de travail**

---

### **2.4.1. Introduction**

Les conditions de travail comme la vitesse d'avancement des machines agricoles notamment les outils aratoires, l'état initial du sol, le moment d'intervention sur le sol, le type et la forme ainsi que la taille des machines utilisées, le niveau de technicité des agriculteurs, sont autant de paramètres à prendre en considération pour la réussite de toutes opérations culturales et plus particulièrement celle des techniques de préparation du sol, et plus précisément les labours.

### **2.4.2. Interaction entre l'état du sol et le corps de charrue**

#### **2.4.2.1. Effet de 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, en particulier où le même outil est utilisé à la même profondeur de travail dans les opérations successives. Trowse (1985) et Guérif (1994) ont mis en évidence que la semelle de labour est induite par les passages répétés de la charrue, et ceux successifs des roues de tracteur en conditions humides.

Les semelles de labour limitent la croissance verticale des racines, ce qui réduit l'extraction de l'eau et des éléments nutritifs des couches plus profondes. Ce qui entraîne dans ce cas de déficit hydrique, une réduction du rendement de récolte (Stafford et Hendrick 1988).

Les couches dures ou semelles de labour accélèrent également l'érosion de sol en diminuant l'infiltration de l'eau et en augmentant la perte par écoulement du sol. Dans ces conditions, la sous-soleuse et les outils à dents sont généralement employés pour détruire les semelles de labours et pour fournir des voies pour que l'eau et les racines pénètrent dans le sous-sol. Ceci qui est une forme de travail de sol qui permet de contribuer à la conservation des sols, parce que le résidu de récolte est laissé sur la surface de sol.

Le processus de découpage de sol a été étudié par plusieurs chercheurs. La méthode analytique conventionnelle a été employée pour développer des modèles bidimensionnels et tridimensionnels basés sur la théorie de la pression passive du sol proposé par Terzaghi (1967). Ces modèles sont basés sur les propriétés plastiques des sols homogènes, isotropes et idéaux (Horn, 1998). Ces auteurs prévoient les forces agissant sur des outils de coupe en employant l'équation universelle de la déformation du sol proposée par Reece (1965).

Plusieurs autres travaux de recherche, sur le phénomène du découpage tridimensionnel du sol ont été décrits par : Hettiaratchi et Reece 1967; Godwin et Spoor 1977; M Kyes et Ali, 1977; Grisso et al. 1983; Perumpral et autres, 1983; Swick et Perumpral 1988. Des concepts additionnels liés à la forme des zones de ruptures ont été proposés par Reece et Hettiaratchi 1989. Ces formes de rupture dépendent étroitement de l'état initial du sol et jouent donc un rôle prépondérant sur la qualité du labour et sur la quantité d'énergie consommée.



### 2.4.2.2. Effet de la variabilité spatiale du sol

La variabilité spatiale d'un sol agricole est l'une des caractéristiques qui influe le plus sur l'uniformité ou la régularité des indices qualitatifs et énergétiques des opérations de préparation du sol. En effet l'anisotropie de la couche arable du sol qui dépend en particulier de la texture et de la répartition des résidus végétaux (voire de la matière organique) pose souvent des problèmes quant à la précision de la quantification des indices qualitatifs et énergétiques des labours. C'est pour cette raison que plusieurs travaux relatifs à l'interaction sol-outil aratoires (évaluation de l'effort de résistance à la traction en relation avec les caractéristiques physico - mécaniques du sol, avec les conditions de travail telles que la vitesse d'avancement, la profondeur de labour, la teneur en eau du sol et enfin l'influence de la forme des outils sur l'effort de résistance à la traction) se réalisent souvent sur des sols artificiels ou à la limite sur des sols remaniés ; ce qui permet de maîtriser les paramètres liés au sol et de supprimer donc l'influence de la variabilité spatiale du sol.

### 2.4.2.3. Effets des conditions de travail

#### 2.4.2.3.1. La profondeur et la largeur de labour

La profondeur de travail, liée à la taille du corps de charrue, et la largeur de travail du corps de charrue sont les deux paramètres qui influent sur la qualité du labour. En effet la valeur du rapport de la largeur de travail sur sa profondeur, appelé coefficient de stabilité ou de renversement et noté  $\rho$ , est déterminante sur le retournement de la bande de terre, donc de l'enfouissement des résidus végétaux, ceci pour le coté qualitatif des labours. Le tableau ci-dessous, proposé par Kanafojski C.Z. (1967) donne les valeurs pratiques et théoriques de ce coefficient.

**Tableau 2:** Valeurs du coefficient de stabilité pour différents types de labours.

Tableau 2: Valeurs du coefficient de stabilité pour différents types de labours.

Type de labour	Profondeur a (cm)	largeur b (cm)	coefficient b/a	
			pratique	théorique
très profond	35 à 100	40 à 70	0,7 à 1,1	0,7 à 1,0
profond	25 à 35	30 à 40	1,1 à 1,5	1,2 à 1,3
moyen	18 à 24	25 à 35	1,3 à 1,8	1,4 à 2,5
déchaumage	5 à 12	24	2,0 à 5,0	2,0 à 2,5
labour sur prairie	15 à 25	30 à 50	1,8 à 2,5	2,0 à 2,5

Source :Kanafojski C.Z. (1967)

Selon Girma (1989), la détermination du meilleur rapport entre les forces de résistance à la traction et la profondeur est difficile, ce qui est du aux grandes variations des propriétés physico - mécaniques du sol tel que mentionné ci-dessus.

Cependant, des tentatives ont été faites en gardant la vitesse constante (0,8 m/s) pour démontrer l'effet de profondeur.

Les courbes obtenues montrent des augmentations rapides de la force, à de plus grandes valeurs de profondeur. Pour l'analyse des données expérimentales, une équation de forme polynomiale a été adaptée. La courbe obtenue est bien corrélée avec les points réels de mesure et l'équation finale obtenue après la régression est de la forme :

$$F = 4.07 - 0.04 \cdot D + 2.3 \cdot 10^{-4} D^2 \quad R^2 = 0.92$$

Où: F est toute la force horizontale agissant sur le corps de charrue exprimée en kN et D est la profondeur de labour (millimètre). Il convient de noter que sur toutes les composantes de la charrue, les forces verticales étaient les plus sensibles à la profondeur, et cet effet est très évident sur le soc.

#### **2.4.2.3.2. La vitesse d'avancement**

Les labours se réalisent souvent à de faibles vitesses, celles-ci sont comprises entre 4 et 5 km / h. L'augmentation de cette vitesse ne peut se faire que par l'amélioration de la forme des corps de charrue à socs.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'effet de la vitesse sur l'effort de résistance à la traction, notamment Hernanz et al. (1982), Mesri (1982), Hunt (1983), Summers et al. (1986) ont montré que l'effort de résistance à la traction de la charrue à socs varie sensiblement avec la vitesse d'avancement.

D'autres essais ont été réalisés par Girma (1989), pour déterminer la relation entre la vitesse de travail et l'effort de résistance à la traction. Dans ce cas la profondeur de travail et les propriétés physico mécaniques du sol ont été maintenues constantes. L'humidité du sol, de texture argileuse, est maintenue à 22 %.

L'équation obtenue, après régression polynomiale de second ordre, est de la forme:

$$F = 0.9 + 0.55 \cdot V + 1.6 \cdot V^2 \quad R^2 = 0.98$$

Avec : F effort total de résistance à la traction exprimé en kN et V la vitesse en m/s.

V vitesse de travail (m/s)

L'effet de la vitesse est nettement apparent. Cependant, pour les sols sablonneux les ajustements exponentiels sont mieux adaptés, car à des vitesses plus élevées, la variation de la force prend une allure asymptotique.

## **2.5. Relation fonctionnelle du système Sol – Outil**

---

Afin d'illustrer toutes ces remarques, les travaux de V. Rosset R. Smith (1995) soulignent qu'une description mathématique du processus de l'action d'un outil aratoire sur le sol ne peut être complète que si tous les éléments de ce processus sont exprimés dans un sens quantitatif. Pour cela ces deux auteurs proposent un modèle fonctionnel intéressant de l'interface sol-outil aratoire que nous avons volontairement complété pour plus de clarté et que nous reproduisons ci-dessous :

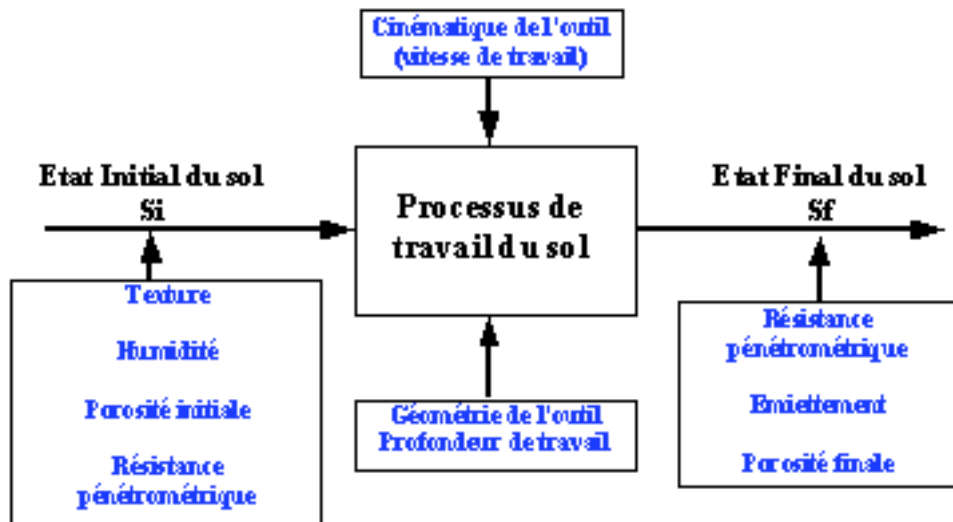


Fig.8: Modèle général du processus de travail du sol

Ce schéma est affecté de la relation :

$$S_f = f(S_i, W)$$

où  $S_i$  : Etat initial du sol

$S_f$  : Etat final du sol

$W$  : Energie appliquée au sol

L'énergie appliquée au sol  $W$  peut être exprimée par une autre relation qui est :

$$W = \varphi(G_T, M, S_i)$$

où  $G_T$  : Caractéristiques géométriques de la pièce travaillante

$M$  : Cinématique de l'outil

La relation initiale devient :

$$S_f = f(S_i, G_T, M)$$

Pour plus de précisions, Ros et Smith (1995) proposent pour chacune de ces fonctions les paramètres suivants.

$$S_i = f_1(P_b, P_s, P_w, C, A, \mu, \mu', w, E, \tau, \alpha_t)$$

$$M = f_2(V_m, \omega)$$

$$G_T = f_3(G_1, G_2, G_3)$$

où :

L'état initial du sol est défini par les paramètres suivants :

$P_b$  : Densité apparente du sol

$P_s$  : Densité réelle du sol

$P_W$  : Teneur en eau du sol

$C$  : Cohésion du sol

$A$  : Adhésion du sol à l'outil

$\mu$  : Coefficient de frottement sol – outil

$\mu'$  : Coefficient de frottement interne du sol

$w$  : Humidité du sol

$E$  : Module d'élasticité du sol (Module de Young)

$\tau$  : Contrainte de cisaillement dans le sol

$\sigma_t$  : Contraintes normales dans le sol

La cinématique de l'outil est définie par :

$V_m$  : Vitesse d'avancement de l'outil dans le sol pour les outils passifs

$\omega$  : Vitesse de rotation pour les outils animés

La géométrie de l'outil ou plus précisément la pièce travaillante est définie par :

$G_1$  : Macro géométrie de l'outil définie par la forme générale de la surface active et ses différentes longueurs telle que la hauteur, la largeur de travail.

$G_2$  : Micro géométrie de la pièce travaillante caractérisant la régularité de la surface active du point de vue finition, les surfaces actives doivent avoir une surface la plus lisse possible pour limiter les forces de frottement sol – outil.

$G_3$  : Caractéristiques angulaires comme entre autres, les angles d'affûtage, les angles d'attaque, les angles d'entrure, les angles de coupe.

## 2.6. Conclusion

---

En conclusion à cette partie relative au mode d'action d'un corps de charrue à socs et de la théorie du labour il apparaît donc que :

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.

Si l'état initial du sol a une importance sur les indices qualitatifs, son effet est d'autant plus important sur les indices énergétiques illustrés par l'effort de résistance à la traction.

Il est cependant nécessaire de prendre en considération l'anisotropie du sol et surtout sa variabilité spatiale.

Outre ceci, les conditions de travail telles que la profondeur, la largeur et la vitesse de travail ont également leur importance sur ces deux indices.

Le mode d'action d'un outil sur le sol ainsi que l'effort nécessaire à cette action sont conditionnés 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.

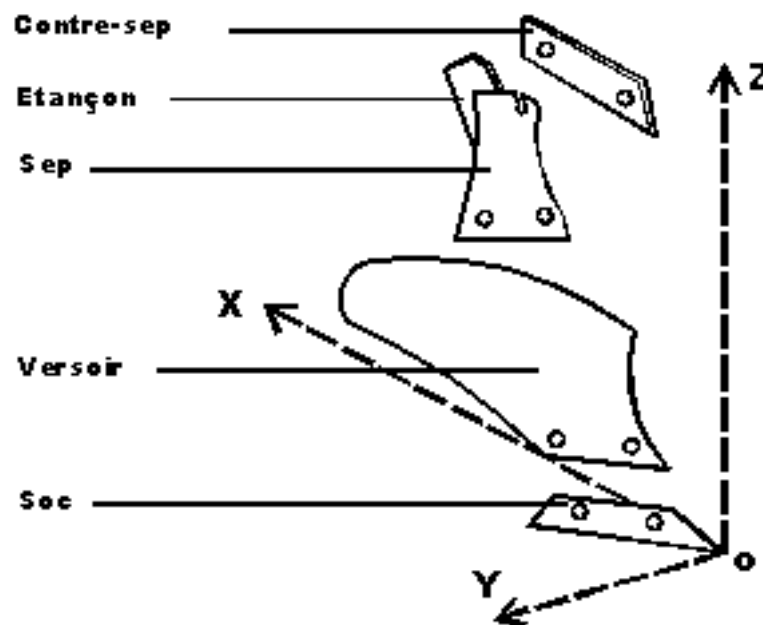
Enfin, le modèle fonctionnel proposé par ces auteurs est un élément de base pour toute conception de nouvelles formes de pièces travaillantes et pour toute analyse du système de forces agissant sur toutes les pièces travaillantes des outils aratoires en générale et plus particulièrement pour les corps de charrue à socs.

Ces remarques sont aussi valables pour toutes les formes de pièces travaillantes utilisées pour la préparation du sol et ce du labour aux travaux superficiels.

## Chapitre 3. Méthodes de caractérisation et de projections des corps de charrues

### 3.1. Introduction

Pour l'étude géométrique de la surface active, le corps de charrue à socs est placé dans un système cartésien rectangulaire  $Oxyz$  (fig.9) avec son origine, la pointe du soc. L'axe  $Ox$  est la direction du déplacement et le sens positif est opposé à la direction du déplacement. 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 (plan frontal).



*Fig. 9 : Vue de profil d'un corps de charrue à socs éclaté dans le repère  $Oxyz$*

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 Dalleine et Faure (1970) 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'intervention 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 champ.

Nous décrivons ci-dessous, les méthodes les plus utilisées pour l'analyse des formes des surfaces actives des outils aratoires en tenant compte des deux orientations, car elles sont toutes deux complémentaires pour l'agronome qui doit résoudre deux problèmes :

- Le premier, est d'assurer à la plante un milieu, le plus adéquat possible, pour son développement en recherchant les meilleurs indices qualitatifs des labours.
- Le second, est de rechercher une consommation minimale d'énergie, lors des opérations de préparation du sol, notamment lors des labours.

### **3.2. Méthode des coordonnées**

---

Cette méthode consiste à déterminer les coordonnées des différents points de la surface active, cette méthode a l'avantage d'être précise et simple et ne nécessite pas de grands moyens, mais elle présente cependant un inconvénient, qui est celui d'être longue, notamment lorsque la surface à étudier est d'autant plus importante que complexe.

### **3.3. Méthode des projections**

---

Cette technique est très intéressante puisqu'elle permet la visualisation immédiate de la forme de la surface active sur les trois plans de l'espace, ce qui est un avantage pour une classification préliminaire de cet outil et de son choix pour une utilisation raisonnée dans des conditions de sol données. L'utilisation de cette méthode se réalise à l'aide d'un profilographe (mécanisme quadrilatère articulé). La précision de cette méthode est étroitement liée à l'état du dispositif, présence de jeux aux articulations du mécanisme et celle de la manipulation.

### **3.4. Méthode de la photo ou optique.**

---

Cette technique consiste à placer le corps de charrue suivant ses différents plans de travail sur un support, en interposant entre la surface à photographier et un foyer lumineux, une plaque munie de fentes parallèles, par où passeront les rayons lumineux. Une photo, par vue projetée sur les trois plans de travail, sera prise et analysée.

### **3.5. Autres méthodes**

---

Avec l'évolution des moyens informatiques et les possibilités graphiques du micro-ordinateur, les difficultés des méthodes précédentes sont largement simplifiées par la numérisation et le traitement des images obtenues.

Ces moyens permettent également de proposer d'autres méthodes plus précises et facilement quantifiables. Parmi celles-ci nous citerons :

- L'utilisation de revêtements spéciaux sur les surfaces actives des outils aratoires complexes comme les versoirs ; Les propriétés de ces revêtements seront utilisées pour l'analyse des surfaces avec des moyens soit optiques (analyse des rayons réfléchis à l'aide d'un réfractomètre) ou magnétiques.
- La puissance des moyens informatiques et les nombreux logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) proposés sur le marché facilitent énormément l'utilisation de la méthode des éléments finis qui est de plus en plus utilisée dans les nombreux domaines de la mécanique. Si la méthode des revêtements a un intérêt qualitatif (caractérisation géométrique des surfaces actives), la méthode des éléments finis est plutôt intéressante quand il s'agit de l'analyse des propriétés mécaniques de la surface, illustrée par l'étude de la variation des contraintes au niveau de l'outil aratoire.

### 3.6. Méthode analytique pour identifier et concevoir une surface de corps de charrue

L'identification de la surface active d'un corps de charrue à socs en vue de son optimisation et de son adaptation à des conditions de labour bien définies, passe inévitablement par une étude analytique permettant de quantifier mathématiquement la géométrie du soc et du versoir.

Tenant compte de leurs importances, nous reproduisons dans ce qui suit, de façon synthétisée, les travaux de Craciun V. et Leon D. (1998) qui font ressortir, après une étude de plusieurs travaux entre autres ceux de Bernacki (1972); Câproui et al. (1982); Richey et al. (1989); Ros V. (1978), les différentes étapes de cette méthode analytique en faisant ressortir les principales caractéristiques du soc et du versoir d'un corps de charrue. Les points de départ utilisés pour la conception d'une surface d'un corps de charrue à socs sont :

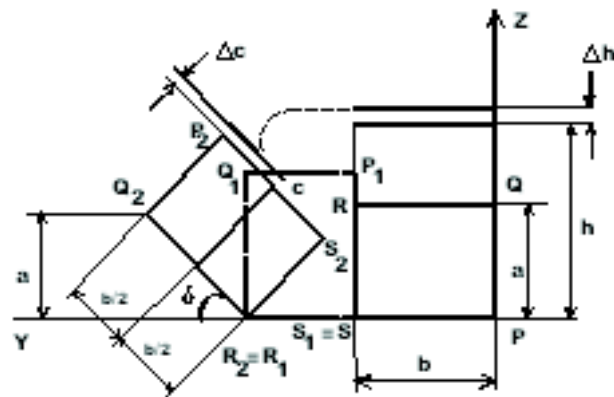
- Les dimensions d'une bande de terre travaillée,
- les dimensions et la position du soc,
- la position et l'équation de la courbe directrice,
- l'équation de la génératrice
- la projection sur le plan vertical - transversal de la surface du corps de la charrue.

Selon les données mentionnées ci-dessus, on obtient tous les éléments géométriques de la forme de la charrue, à savoir:

- les coupes de la surface active dans l'espace,
- les projections de la surface dans le repère Oxyz,
- les équations pour les sections transversales sur les différents plans (vertical, longitudinal, transversal, perpendiculaire à la partie affûtée du soc)

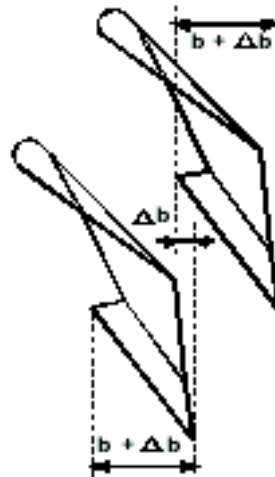
#### 3.6.1. Dimensions de la bande de terre et position de deux corps voisins

La forme du corps de charrue est conçue pour agir sur une bande de terre qui, théoriquement, reste inchangée et ayant une section rectangulaire avec la dimension **a**, sa hauteur, correspondant à la profondeur du labour et **b** sa largeur qui correspond à la largeur de travail d'un corps de charrue. Les caractéristiques géométriques de la bande de terre sont représentées sur la figure suivante:



**Fig. 10** : Caractéristiques géométriques de la bande de terre

Outre ceci, la disposition de deux corps voisins d'une charrue, sur l'âge doit assurer une zone de recouvrement de largeur ( $\Delta b$ ) (fig.11).



**Fig. 11** : Vue de dessus de deux corps de charrue à socs

### 3.6.2. Dimensions et caractéristiques géométriques d'un soc

Le soc étant la pièce la plus sollicitée par le sol, doit faire l'objet d'une attention particulière de la part du concepteur. En effet si le versoir a un effet direct sur la qualité du labour, plus particulièrement sur le retournement de la bande de terre, le soc a un effet direct sur la valeur de l'effort de résistance à la traction. Selon Binesse (1970), 70 % de l'effort total consommé par un corps de charrue est utilisé par le soc.

Nous reproduisons ci-dessous, les caractéristiques à prendre en considération pour la projection et la conception des socs de forme trapézoïdale en tenant compte des caractéristiques de la bande de terre. Il s'agira de définir les coordonnées des différents points caractéristiques du contour total de la surface active d'un corps de charrue à socs. La connaissance de ces points est le premier point de départ pour toute conception de cet outil.

Pour la compréhension des équations proposées par Craciun V. et Leon D. (1998), nous reproduisons ci-dessous deux schémas (fig.12 et 13), montrant respectivement le soc vu en perspective et en projection sur le plan horizontal (xoy).



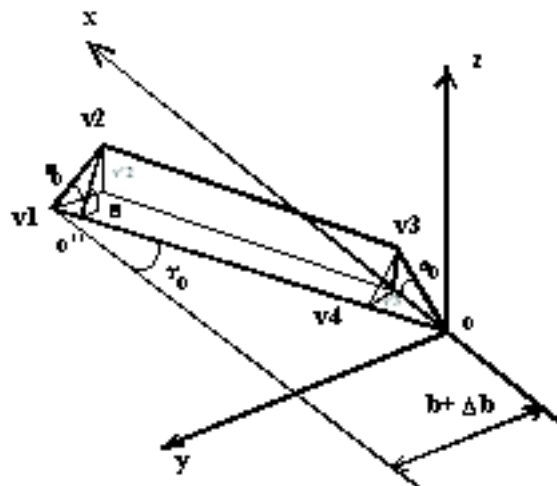


Fig. 12 : Caractéristiques géométriques du soc vu en perspective

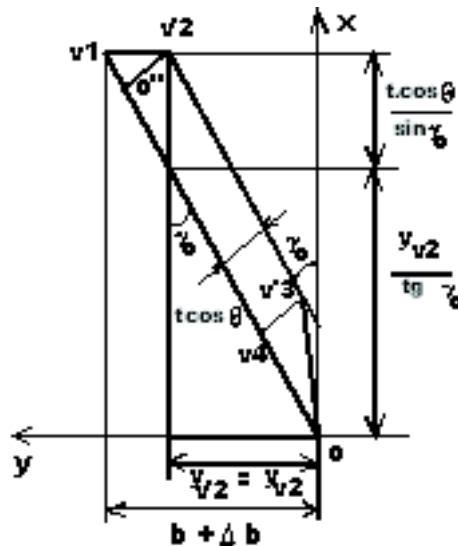


Fig. 13 : Projection du soc sur le plan horizontal

Les deux figures 12 et 13 montrent les différentes dimensions et angles caractéristiques du soc nécessaires pour la conception de cette pièce travaillante d'un corps de charrue. Ces caractéristiques sont principalement la largeur de travail, l'angle d'attaque et l'angle d'inclinaison de la surface du soc par rapport au plan XOY. Les coordonnées des points caractéristiques du soc sont mentionnées ci-dessous :

Les lignes qui délimitent la surface du soc sont définies par les coordonnées des points O, V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub> et V<sub>3</sub> (Fig.12 et 13).

$$y_{V_1} = y_F \quad z_{V_1} = 0 \quad x_{V_1} = \frac{y_{V_1}}{\operatorname{tg} \gamma_0}$$

La longueur de la partie affûtée du soc est donnée par la relation:

$$l = \frac{b + \Delta b}{\sin \gamma_0}$$

Les coordonnées des points  $V_2$  et  $V_3$  sont :

$$y_{V_2} = y_D \quad z_{V_2} = z_D \quad x_{V_2} = \frac{y_{V_2}}{\operatorname{tg} \gamma_0} + t \cdot \frac{\cos \theta}{\sin \gamma_0}$$

$$y_{V_3} = y_E \quad z_{V_3} = z_E \quad x_{V_3} = \frac{y_{V_3}}{\operatorname{tg} \gamma_0} + t \cdot \frac{\cos \theta}{\sin \gamma_0}$$

Les points  $O''$  et  $V_4$  qui sont les projections des points  $V_2$  et  $V_3$  sur la partie affûtée du soc ont pour coordonnées (fig. 13):

$$x_{O''} = x_{V_2} - t \cdot \cos \theta \cdot \sin \gamma_0 \quad ; \quad y_{O''} = y_{V_2} + t \cdot \cos \theta \cdot \cos \gamma_0 \quad ; \quad z_{O''} = 0$$

$$x_{V_4} = x_{V_3} - t \cdot \cos \theta \cdot \sin \gamma_0 \quad ; \quad y_{V_4} = y_{V_3} + t \cdot \cos \theta \cdot \cos \gamma_0 \quad ; \quad z_{V_4} = 0$$

L'angle  $\varphi$ , compris entre  $OV_1$  (partie affûtée du soc) et  $V_1V_2$  sur le plan du soc, pourrait être défini par la relation:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{t \cdot \sin \gamma_0}{y_{V_1} - y_{O''}}$$

L'intérêt de l'analyse du contour du soc est directement lié à l'étude du début de soulèvement de la bande de terre. En effet la valeur de l'angle  $\varphi$  a une influence sur l'inclinaison du soc par rapport au sol donc au soulèvement de celui-ci, et est déterminante sur la direction de l'effort tranchant que subit le sol par la partie affûtée du soc. Plus cet angle est grand, plus l'effort à fournir pour cisailier le sol est important, à une valeur maximale limite le sol sera plus comprimé que cisailé. La forme du soc et ses caractéristiques géométriques, notamment la longueur de la partie affûtée et de son inclinaison par rapport au sol a un effet certain sur la valeur de l'effort de résistance à la traction d'un corps de charrue. A ce niveau, deux angles sont donc à prendre en considération pour la conception du soc, le premier est l'angle d'attaque initial  $\gamma_0$  et l'angle d'inclinaison initial noté  $\theta_0$ .

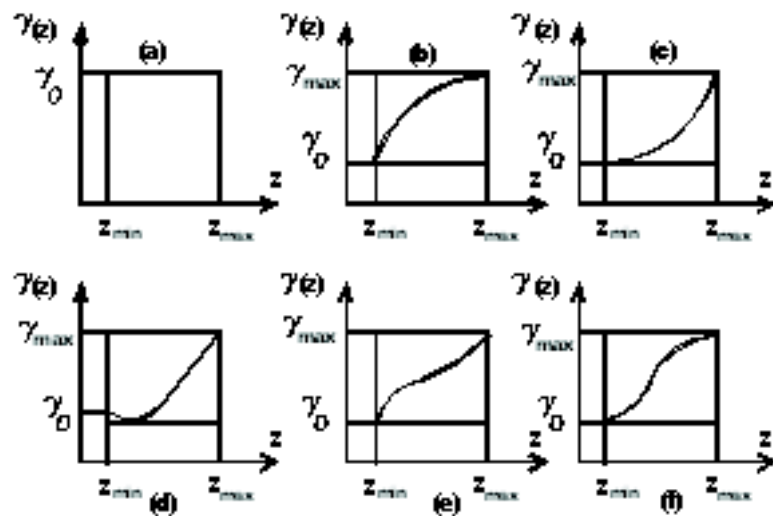


Fig. 14 : Variation de l'angle  $\gamma(z)$  en relation avec la forme du versoir (a) cylindrique, (b) cylindroïdale, (c) et (d) semi-hélicoïdale, (e) et (f) universel

L'analyse de ces représentations graphiques (Fig.14) illustrant la variation de l'angle d'attaque  $\gamma(z)$  en relation avec la hauteur du corps de charrue montre que:

- L'angle d'attaque est constant pour la forme cylindrique (a), sa valeur est la même que celle mesurée sur la partie affûtée du soc, elle est notée  $\gamma_0$ . Au niveau du versoir cet angle est appelé angle de déplacement latéral de la bande de terre.
- Pour la forme cylindroïdale (b), cet angle varie brusquement de  $\gamma_0$  à  $\gamma_{\max}$  dans ce cas la bande de terre est fortement sollicitée au début du labour.
- Pour ce qui est de la forme semi-hélicoïdale (c et d) la valeur de l'angle d'attaque (c) varie progressivement de sa valeur minimale ( $\gamma_0$ ) pour atteindre sa valeur maximale au niveau de la partie supérieure du versoir.

En (d) l'angle d'attaque passe de sa valeur  $\gamma_0$  à une valeur inférieure pour augmenter progressivement par la suite. Cette différence réside dans le fait que le premier cas (c) concerne les versoirs dits cylindro-hélicoïdaux, c'est à dire que la partie avant, de la surface active, est plus cylindrique et que l'arrière du corps est plutôt hélicoïdale. Le deuxième cas (d) est par contre plus hélicoïdal à l'avant et légèrement cylindrique à l'arrière.

Les deux dernières formes universelles (e et f) sont appelées également versoirs culturaux ou mixtes, c'est les formes les plus rencontrées sur champs. La variation de l'angle d'attaque est sensiblement la même, mais en sens inverse, il augmente brusquement à la première moitié de la hauteur du corps de charrue à partir du soc, puis progressivement à la moitié supérieure (e) et inversement pour la forme (f).

Ces variations de l'angle d'attaque, sont également des critères intéressants pour la classification des différentes formes corps de charrue à socs.

### 3.6.3. Projection du corps de charrue sur le plan vertical - transversal.

Les auteurs cités précédemment conviennent qu'afin de déterminer les caractéristiques géométriques dans l'espace de la surface active d'un corps de charrue, on doit commencer à partir de sa projection sur le plan vertical-transversal, indépendamment de la méthode de conception utilisée (graphique, grapho-analytique ou analytique). Ce plan met en évidence la profondeur et la largeur de travail.

En effet, théoriquement, l'hypothèse admise est que, dans le processus de retournement (fig.10), la section transversale rectangulaire de la bande de terre, PQRS, restes inchangés (Câproiu, 1982; Ros, 1978). D'abord, la section transversale tourne autour du point S jusqu'à ce qu'elle s'arrête à la position  $P_1Q_1R_1S_1$ , puis qu'elle tourne autour du point  $R_1$ , jusqu'à ce qu'elle s'arrête à la position finale  $P_2Q_2R_2S_2$ , quand la position du point  $Q_2$  vient à la hauteur  $a$ . L'angle, de renversement de la bande de terre en position finale prend la valeur:

$$\delta = \arcsin \frac{a}{b}$$

Pendant la rotation autour de S de la bande de terre, le point Q suit une trajectoire circulaire avec une hauteur maximum de:

$$h = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Selon la valeur de  $h$ , le point supérieur B de la projection a pour coordonnées:

$$z_B = h + \Delta h \quad y_B = b$$

La variation de  $\Delta h$  pourrait être positive ou négative et peut changer dans les limites  $\Delta h = (-25 \dots \dots +25 \text{ mm})$  ( $\Delta h$  dépend des dimensions de la bande de terre).

La projection sur le plan vertical-transversal (fig.15), se compose de projection de la surface du versoir ABCDE et de la projection du soc,  $O_1EDF$ . La ligne droite DE, est commune entre le soc et le versoir a pour équation :  $z = t \sin(\theta)$ ,  $\theta$  est l'angle compris entre le plan du soc et le fond de labour,  $c'$  est l'angle initial d'inclinaison.

Sur le versoir cet angle, appelé angle d'inclinaison de la surface du versoir, est compris entre la tangente au point considéré et le plan horizontal.

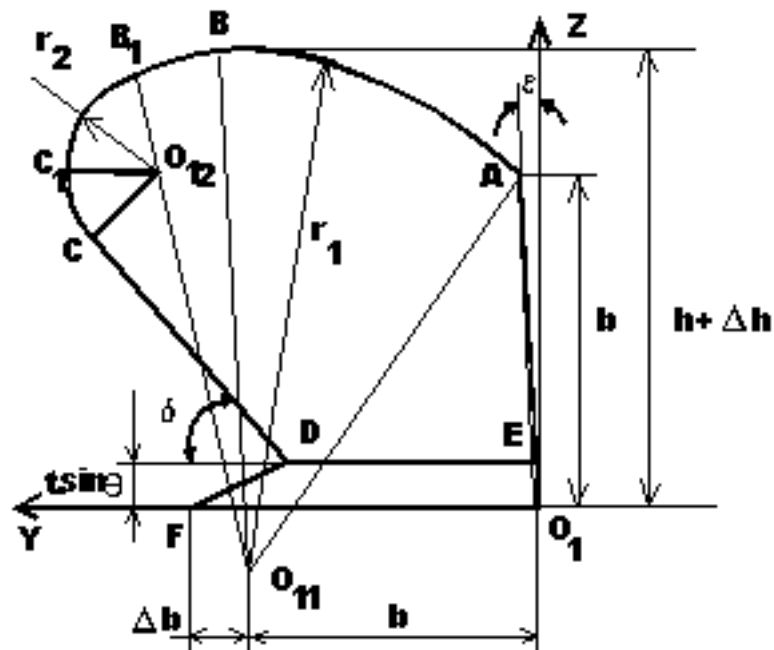


Fig. 15 : Dimensions principales d'un corps de charrue vue de face

La projection du corps de charrue est tracée à partir des points caractéristiques A, B, C, D, E. Les coordonnées du point B, sont données par les équations précédentes, les positions des autres points A et C sont définies comme suit:

Le point A est à l'intersection de la ligne droite  $z = b$  avec la ligne droite qui passe par le point  $O_1$  et détermine l'angle  $\varepsilon$  avec l'axe  $O_1z$  (fig.15)

$$z_A = b \quad ; \quad y_B = b.tg(\varepsilon)$$

L'angle  $\varepsilon$  est choisi par le constructeur, cet angle est souvent compris entre 2 et 3 degrés.

Le point C est sur la perpendiculaire au segment  $P_2S_2$  (fig.15) à la distance  $\Delta c$  de  $P_2S_2$ . Les valeurs de  $\Delta c$  sont de l'ordre de 20 à 30 millimètres. La figure montrant le retournement de la bande de terre donne:

$$z_C = (a + \Delta c). \cos \delta + \frac{b}{2}. \sin \delta$$

$$y_C = a + b - (a + \Delta c). \sin \delta + \frac{b}{2}. \cos \delta$$

Le point D est situé à l'intersection de la ligne droite  $z = t. \sin(\theta)$  avec la droite qui passe par le point C et inclinée d'un angle  $\delta$  par rapport à l'axe  $O_1y_1$ .

$$z_D = t. \sin \theta \quad y_D = y_C - \frac{z_C - z_D}{tg(\delta)}$$

De cette figure, nous avons les coordonnées du point E:

$$z_E = z_D \quad y_E = z_E.tg(\varepsilon)$$

Une fois les coordonnées des points caractéristiques du contour établi, le contour composé des segments AE, DE, CD et des arcs de cercle ABB<sub>1</sub> dont le centre est O<sub>11</sub> et de rayon r<sub>1</sub> ainsi que de l'arc de cercle B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>C dont le centre est O<sub>12</sub> et de rayon r<sub>2</sub>, sera tracé comme suit :

Le centre de courbure O<sub>11</sub> de l'arc ABB<sub>1</sub> est défini par les coordonnées suivantes :

$$z_{O_{11}} = \frac{b^2(2 - 2 \cdot \text{tg}(\varepsilon) + \text{tg}^2(\varepsilon)) - (h + \Delta h)^2}{2 \cdot (h + \Delta h - b)}$$

$$y_{O_{11}} = b$$

La valeur du rayon r<sub>1</sub> est déduite et a pour valeur :

$$r_1 = h + \Delta h - z_{O_{11}}$$

L'équation du cercle de centre O<sub>11</sub> et de rayon r<sub>1</sub> est :

$$(z - z_{O_{11}})^2 + (y - y_{O_{11}})^2 = r_1^2$$

Le centre O<sub>12</sub> est placé sur la ligne droite O<sub>11</sub>B<sub>1</sub>, ainsi l'arc ABB<sub>1</sub> peut être joint avec l'arc B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>C au point B<sub>1</sub>. Cet arc a pour centre de courbure le point O<sub>12</sub> qui est le point d'intersection entre B<sub>1</sub>O<sub>11</sub> (rayon de l'arc ABB<sub>1</sub>) et la perpendiculaire à DC issue du point C. nous aurons ainsi :

$$O_{12}B_1 = O_{12}C = r_2$$

Avec pour valeurs et coordonnées:

$$r_2 = \frac{r_1^2 - (z_c - z_{O_{11}})^2 - (y_c - y_{O_{11}})^2}{2r_1 + 2(z_c - z_{O_{11}}) \cos \delta - 2(y_c - y_{O_{11}}) \sin \delta}$$

$$z_{O_{12}} = z_c + r_2 \cos \delta \quad \text{et} \quad y_{O_{12}} = y_c + r_2 \sin \delta$$

$$z_{B_1} = \frac{r_1}{r_1 - r_2} z_{O_{12}} - \frac{r_2}{r_1 - r_2} z_{O_{11}}$$

$$y_{B_1} = \frac{r_1}{r_1 - r_2} y_{O_{12}} - \frac{r_2}{r_1 - r_2} y_{O_{11}}$$

Comme précédemment, l'équation de cercle de centre o<sub>12</sub> et de rayon y<sub>2</sub> est :

$$(z - z_{o_{12}})^2 + (y - y_{o_{12}})^2 = r_2^2$$

Connaissant la position du centre de courbure de l'arc  $CC_1B_1$  et celle de  $B_1$  nous déduisons les coordonnées du point  $C_1$  qui sont respectivement

$$z_{C_1} = z_{o_{12}}$$

ce qui signifie que le centre de courbure de la partie extrême du versoir se situe au même niveau que le point  $C_1$ .

$$y_{C_1} = y_{o_{12}} + r_2$$

Enfin, la projection de l'arête du soc sur le plan vertical -transversal ou plan frontal est définie par les points E et D, dont les coordonnées sont mentionnées ci-dessus. Le point F est défini par :

$$z_F = 0 \quad \text{et} \quad y_F = b + \Delta b$$

Les principales équations du contour de la surface active d'un corps de charrue à soc sont consignées sur le tableau suivant :

Z	Equations des courbes sur la projection gauche	Equations des courbes sur la projection droite
$O \dots Z_D$	<b>droite DF</b> $y(z) = y_F + \frac{y_D - y_F}{z_D} \cdot z$	
$Z_D \dots Z_C$	<b>droite CD</b> $y(z) = y_D + \frac{z - z_D}{\text{tg}\delta} \cdot z$	<b>droite O<sub>1</sub>A</b> $y(z) = z \cdot \text{tg}\varepsilon$
$Z_C \dots Z_A$	<b>arc B<sub>1</sub>C</b>	
$Z_A \dots Z_{B_1}$	$y(z) = y_{O_2} + \sqrt{r_2^2 - (z - z_{O_2})^2}$	<b>arc AB</b> $y(z) = y_{O_1} - \sqrt{r_1^2 - (z - z_{O_1})^2}$
$Z_{B_1} \dots Z_E$	<b>arc BB<sub>1</sub></b> $y(z) = y_{O_1} - \sqrt{r_1^2 - (z - z_{O_1})^2}$	

**Tableau 3** : Equations des contours de la projection de la surface d'un corps de charrue à soc sur le plan vertical - transversal.

Pour générer la surface active cylindroïdale d'un corps de charrue à socs, La fonction illustrant la variation de l'angle  $\gamma(z)$  et notée  $\gamma(z)$ , entre la ligne génératrice LN notée ( $\Delta$ ) et le plan xOz, pourrait être établie par régression polynomiale du troisième degré. La représentation graphique de cette fonction est illustrée par la figure suivante (fig.16) :

La fonction de variation de l'angle  $\gamma(z)$  peut être représentée par une équation polynomiale du troisième degré de la forme :

$$\gamma(z) = m.z^3 + n.z^2 + p.z + q$$

avec m, n, p et q des constantes de régression qui dépendent de la forme des versoirs cylindrique, cylindroïdal, semi-hélicoïdal et universel. D'autres formes intermédiaires, telle que la forme semi-hélicoïdale (c et d), peuvent être rencontrées.

#### **3.6.4. Intersection du corps de charrue avec les plans verticaux transversaux**

L'analyse précédente a donc permis de définir les coordonnées des principaux points du contour de la surface active d'un corps de charrue à socs. Au niveau de ce qui suit, l'intérêt sera porté sur la courbe directrice moyenne, de la surface active, définie par l'intersection de cette surface avec le plan vertical situé à la distance  $d_T$  calculée à partir de la pointe du soc. L'intérêt de l'étude de cette courbe est directement lié à la trajectoire moyenne de la bande de terre sur la surface active suivant la verticale.

Le plan vertical transversal (T), représenté sur la figure ci-dessous, et situé à la distance  $d_T$  du plan yOz, coupe la surface du soc suivant la ligne  $T_1T_2$  et la surface du versoir suivant la courbe  $T_2GT_3$ . Sur les figures 12 et 13, les points  $T_1$  et  $T_2$  ont pour coordonnées:

$$\begin{aligned} x_{T_1} &= d_T & y_{T_1} &= d_T \cdot \text{tg} \gamma_0 & z_{T_1} &= 0 \\ x_{T_2} &= d_T & y_{T_2} &= d_T \cdot \text{tg} \gamma_0 & z_{T_2} &= f \cdot \sin \theta \end{aligned}$$

Le point G représente le point d'intersection du plan (T) avec la génératrice LMN, située à la hauteur z. ainsi:

$$x_G = d_T \quad z_G = z$$

et sur la figure 13, nous pouvons déterminer:

$$y_G(z) = y_M(z) + [d_T - x_M(z)] \text{tg} \gamma(z)$$

La valeur  $y_G(z)$  calculée à partir de l'équation (34), doit satisfaire la condition suivante:

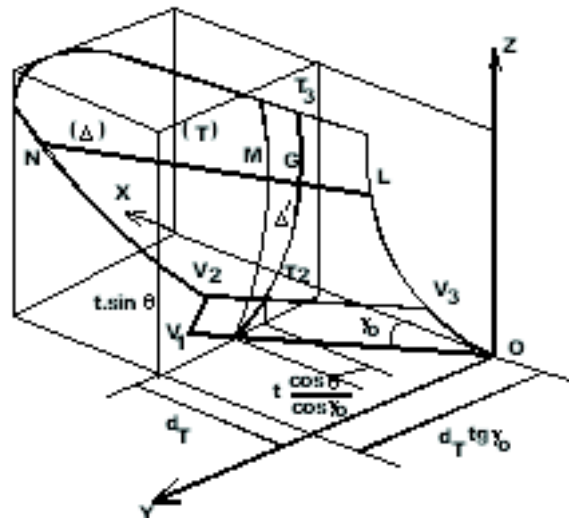
$$y_L(z) \leq y_G(z) \leq y_N(z)$$

Avec :  $y_L(z)$  et  $y_N(z)$  déterminés sur le tableau précédent des équations de contour des projections de la surface active des corps de charrue à socs sur le plan vertical – transversal.



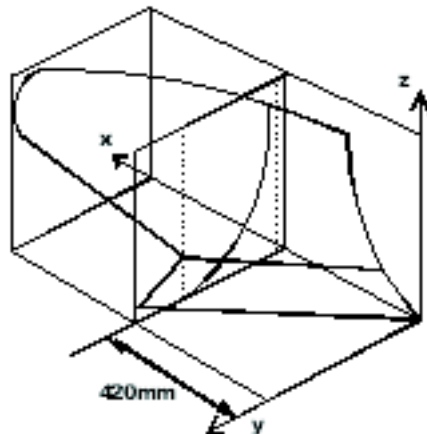
L'équation de la courbe  $T_2GT_3$  peut être obtenue de la même manière que la courbe  $L_2KL_3$  décrite précédemment par régression polynomiale du troisième degré.

L'expression analytique de la courbe d'intersection peut être utilisée pour la détermination des angles entre les tangentes à la courbe et la direction transversale. Ces angles caractérisent la capacité de la surface active de retourner la bande de terre.

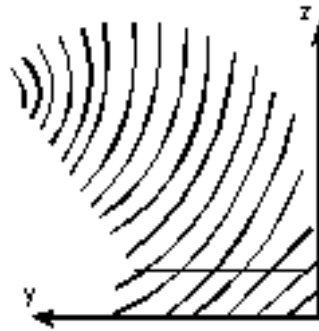


**Fig.16** : Courbe directrice de la surface active

La figure 17 ci-dessous représente la projection de l'intersection de la surface du corps de charrue avec le plan vertical-transversal à la distance  $d_T = 420$  mm. La figure (18) suivante représente la famille des courbes d'intersection de la surface active du corps de charrue avec les plans parallèles verticaux transversaux distants l'un de l'autre de 20 mm, ces courbes sont obtenues avec la méthode optique.



**Fig. 17** : Courbe d'intersection de la surface du corps avec le plan vertical-transversal situé à une distance  $d_T = 240$  mm.



**Fig. 18 :** Projection sur  $yOz$  de la famille de courbes d'intersection de la surface active du corps avec les plans verticaux transversaux distants l'un de l'autre de 20 mm

Cette dernière figure, faisant ressortir les courbures de la surface active, pourrait être obtenue en utilisant la méthode de la photo expliquée précédemment. Chacune des courbures correspond à l'intersection d'un plan vertical perpendiculaire à la direction d'avancement avec la surface active. Pour plus de précision et tenant compte du déplacement latéral de la bande de terre, ces plans peuvent être considérés perpendiculaires à la partie affûtée du soc. Cela permettra de définir la variation de la courbure de la surface active et de son effet sur la déformation de la bande de terre.

### 3.6.5. Intersection entre la surface active du corps de charrue et le plan vertical-transversal suivant la partie affûtée du soc.

Les plans verticaux ( $N$ ) mentionnés sur la figure 19 ci-dessous sont perpendiculaires à l'arête du soc et à la distance  $d_H$  à partir de la pointe du soc. Ces plans sont parallèles au plan ( $N'$ ) sur lequel est définie la courbe directrice ( $\Delta'$ ).

$$d' = k \cdot l$$

Le plan ( $N'$ ) est un plan fixé à la distance  $OO'$  à partir de la pointe du soc. Tenant compte du rapport



et considérant,  $l = OV_1$  la longueur de la partie tranchante du soc, la distance  $d'$  peut s'exprimer comme suit :

Le plan ( $N$ ), représenté sur la figure ci-dessous, croise la surface du soc suivant la ligne droite  $N_1 N_2$  et la surface du versoir suivant la courbe  $N_2 H N_3$ .



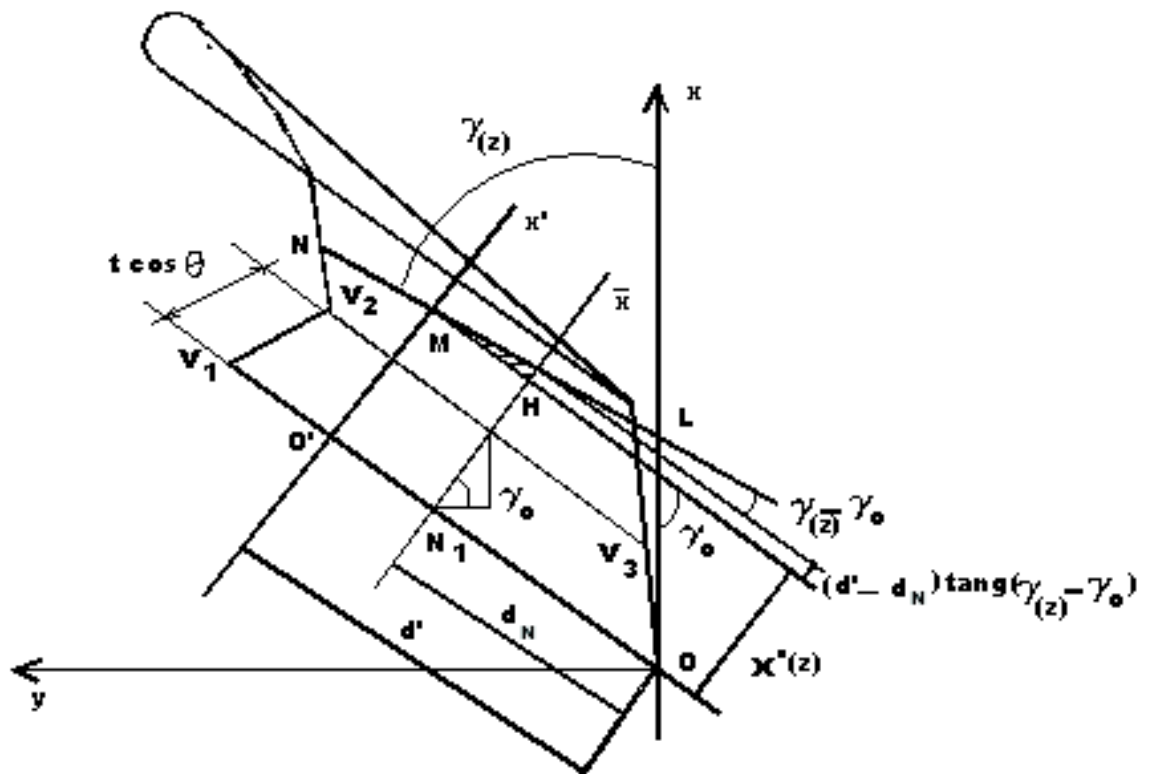


Fig. 20 : Eléments de géométrie, nécessaires pour l'établissement des équations des courbes d'intersection de la surface active d'un corps de charrue à socs avec les plans verticaux.

### 3.7. Conception de la surface active du corps de charrue à socs

D'un point de vue géométrique, la surface active d'un corps de charrue à socs de forme cylindroïdale, sans ces calculs ne peut pas être développée. Cependant, afin de concevoir la surface active complexe du corps de charrue à partir d'une surface plane, celle-ci doit être déformée à une température élevée. Pour cela, il est nécessaire de définir initialement la forme de la surface plane à déformer pour obtenir la forme voulue de la surface active du corps de charrue en tenant compte des déformations du matériau lors de son travail.

Bernacki, (1972) a défini un algorithme qui peut être utilisé pour calculer les coordonnées de plusieurs points du contour de la pièce plane utilisée avant déformation pour la réalisation de la surface active du corps de charrue.

Cet algorithme implique l'utilisation d'une courbe directrice ( $\Delta'$ ) ainsi que d'une autre génératrice ( $\Delta''$ ) qui représente l'intersection de la surface active du corps de charrue avec les plans verticaux ( $N''$ ) qui sont perpendiculaires à la partie affûtée du soc et parallèles à ( $N'$ ) (Figure suivante). Les points  $V_2$  et  $O''$  appartiennent au plan ( $N''$ ).

La génératrice ( $M$ ) croise ( $\Delta''$ ) au point  $e$   $W$ . Les coordonnées de  $W$ , dans le plan ( $N''$ ), sont déterminés à partir des équations suivantes:

$$d'' = \frac{y_{O''}}{\sin(\gamma_0)}$$

$$x''_W(z) = x'_M(z) + (d' - d'') \cdot \text{tg}[\gamma(z) - \gamma_0]$$

### 3.8. Conclusions

La description analytique de la surface active d'un corps de charrue à socs, proposée par Craciun V. et Leon D. (1998), peut donc être entièrement déterminée par les dimensions de la bande de terre, de sa position et de l'équation de la courbe directrice, dans notre cas, la courbe de la variation de l'angle d'inclinaison ( $\theta$ ).

Les équations mathématiques présentées ci-dessus permettent une description géométrique facile et complète pour le concepteur de la forme d'un corps de charrue à socs.

Tenant compte de la complexité de la forme de la surface active des corps de charrues à socs, il est très difficile de quantifier cette surface par une seule équation générale. Celles proposées ci-dessus, concernent la forme cylindrique qui est une forme beaucoup plus simple que les formes mixtes et hélicoïdales. Cela s'explique par la régularité de la courbure suivant la génératrice principale de la surface.

Ces équations peuvent être employées pour la conception d'une nouvelle forme de corps de charrue à socs ou de comparer entre elles les formes déjà existantes. Pour cela il faudrait retenir au niveau de ces travaux les coordonnées des différents points caractéristiques du contour et des différentes relations entre les principales dimensions de la surface active du corps de charrue à socs.

Le développement de programmes informatiques établis à partir de toutes les relations précédentes, pourraient être également proposés pour résoudre des problèmes tels que la détermination de la trajectoire du sol sur la surface active et d'en prévoir sa déformation, il est également possible avec l'utilisation de la méthode des éléments finis, d'évaluer la répartition de l'effort de résistance à la traction sur la surface active quantifiée par ses caractéristiques géométriques.

Enfin l'intérêt de cette étude réalisée par Craciun et Léon est surtout la méthodologie appliquée qui consiste en une décomposition de la surface active et une analyse des coordonnées des différents points de son contour. Il est cependant nécessaire de la compléter par une analyse mécanique, voir une analyse de la position du point d'application de l'effort de résistance à la traction qu'oppose la bande de terre à l'avancement du corps de charrue à soc. C'est l'un de nos objectifs que nous aborderons au chapitre relatif à la

modélisation de la surface active des corps de charrue fabriqués par la SONACOME et SACRA où une autre méthode sera proposée.

En résumé, la conception d'une surface active d'un outil aratoire, doit nécessairement tenir compte des objectifs recherchés quand à la transformation d'un état initial du sol en un état final escompté. L'analyse du comportement du sol sous l'action d'un outil aratoire, dans notre cas la charrue à soc, est donc indispensable à cette conception.

## **Chapitre 4. Consommation d'énergie pour les opérations de préparation du sol**

### **4.1. Introduction**

---

Le besoin énergétique en agriculture, est souvent l'une des premières préoccupations des agriculteurs. C'est un paramètre économique à prendre en considération avant et après toute opération culturale.

Parmi les différentes étapes de l'itinéraire technique, pour la mise en place d'une grande culture donnée, la première, qui consiste à la préparation du sol est celle qui consomme le plus d'énergie. En effet selon certains auteurs, Severkey et Tsyganou (1982) et Binesse (1970), les besoins énergétiques pour le travail du sol représentent plus de 50% de l'énergie totale nécessaire pour la mise en place d'une culture, d'où l'importance des techniques de préparation du sol.

La valeur de ces besoins énergétiques, est cependant dépendante de plusieurs facteurs parmi lesquels nous citerons par ordre d'importance :

- les propriétés physico - mécaniques du sol
- la forme des outils aratoires
- les conditions de travail

Outre ces principaux facteurs, il est également nécessaire de mentionner, l'état du tracteur et des machines agricoles, les mauvais réglages des agrégats agricoles, la mauvaise utilisation du matériel agricole, par manque de technicité, qui entraînent des pertes supplémentaires d'énergie. Ces derniers facteurs sont aussi l'une des sources de la mauvaise réalisation des opérations culturales.

Plusieurs travaux de recherche relatifs à ce sujet ont été réalisés, certains, si non la majorité ont porté sur l'évaluation des besoins en énergie en relation avec l'état du sol, d'autres, sur l'effet des conditions de travail, tel que l'effet de la vitesse, de la profondeur et de la largeur de travail. Les travaux portant sur l'effet des caractéristiques géométriques des outils, sur la consommation en énergie, même s'ils existent, sont relativement peu nombreux.

L'effet de la forme des pièces travaillantes sur l'effort de résistance à la traction sera donc l'un de nos objectifs.

### **4.2. Répartition de la consommation d'énergie pour la mise en place d'une culture.**

---

L'une des principales consommations de l'énergie en agriculture est celle des tracteurs agricoles, principale source d'énergie de la réalisation des techniques culturales pour la production d'une culture.

La consommation de carburant et l'effort de résistance à la traction sont fonction de la puissance du tracteur et de la taille ainsi que de la forme des pièces travaillantes des outils aratoires, de la profondeur de travail et de l'état initial du sol.

Afin d'évaluer la consommation de carburant nécessaire pour mettre en place d'une céréale, A.J. Campbell, Martin Carter et Neil McLaughlin (2001) ont utilisé deux techniques de mise en place de la culture sur un sol de texture limono – sableuse ; la première qualifiée de travail minimum à une profondeur de 10 cm, la seconde qualifiée de travail classique à 20 cm.

L'expérience entreprise au centre de recherches de Charlottetown a utilisé un tracteur équipé de plusieurs capteurs pour déterminer la consommation en carburant pour la réalisation des essais.

Pour le travail profond (profondeur de 25 cm) deux essais ont été réalisés, le premier utilisant une charrue à socs, le second un chisel. Les outils utilisés. Deux essais ont été également effectués pour le travail minimum (profondeur 10 cm), les outils utilisés à cet effet sont le cultivateur à dents et le cultivateur rotatif. Les vitesses utilisées pour la réalisation des travaux sont celles fréquemment utilisées pour ce type d'outils aratoires.

Les résultats obtenus confirment l'effet de la profondeur de travail et celui de la forme des pièces travaillantes utilisées sur la consommation en énergie. L'introduction des outils animés tels que le cultivateur à dents et le cultivateur rotatif utilisent directement l'énergie du moteur développée par la prise de force, celle développée au niveau de la barre de traction pour ce type d'outil est relativement faible.

Les résultats obtenus sont consignés sur les tableaux suivants :

Tableau 4 : Consommation de carburant du tracteur (l. ha<sup>-1</sup>)

Chaînes mécaniques	Travaux primaires	Travaux secondaires	Semis	Total
Cultivateur rotatif + Semoir	9		4	13
Cultivateur à dents animé + Semoir	15		4	19
Charrue à socs + Disque + Cultivateur + Semoir	11	12	4	27
Chisel + cultivateur + semoir	11	13	5	29

Tableau 5 : Energie consommée au niveau de la barre de traction (MJ. ha<sup>-1</sup>).

Chaînes mécaniques	Travaux primaires	Travaux secondaires	Semis	Total
Cultivateur rotatif + Semoir	62		7	69
Cultivateur à dents animé + Semoir	42		8	50
Charrue à socs + Disque + cultivateur + Semoir	78	54	9	141
Chisel + cultivateur + Semoir	70	33	8	111

Ces deux tableaux montrent que la consommation du tracteur en carburant avoisine les 30 litres par hectare pour les travaux profonds utilisant le chisel et la charrue à socs.

Cependant l'énergie développée au niveau de la barre de traction est supérieure lors de l'utilisation de la charrue à socs, elle est de 141 MJ par hectare, il est cependant nécessaire de rappeler que la charrue à socs est suivie d'un outil à disque.

#### 4.2.1. Consommation en énergie lors des labours

Tenant compte des différentes phases du mode d'action d'un corps de charrue à socs sur le sol qui sont respectivement et par ordre chronologique, le cisaillement horizontal par le soc, le cisaillement vertical par le coutre, le soulèvement et le retournement de la bande de terre par le versoir, La répartition de l'énergie consommée pendant le labour a été étudiée par Binesse (1970) et Girma (1989) qui ont abouti aux résultats consignés sur le tableau suivant :

Répartition des Efforts	Binesse	Girma
Cisaillement par le soc	57%	63-72%
Cisaillement par le coutre	7%	6-9%
Retournement par le versoir	17%	16-26%

**Tableau 6** : Consommation d'énergie au niveau d'un corps de charrue à socs

Source : Girma (1989)

L'analyse de ces résultats montre, que le travail du soc est le plus important, ce qui permet de faire ressortir l'importance de l'angle d'attaque initial  $\gamma_0$ .

Au niveau de ces résultats, nous remarquerons la présence du coutre sur les charrues utilisées, alors que sur la majorité des exploitations visitées en Algérie, le coutre est rarement utilisé malgré son importance. Même les fabricants de charrues à socs, comme l'ENPMA et la SACRA, n'équipent plus les charrues de cette pièce travaillante.

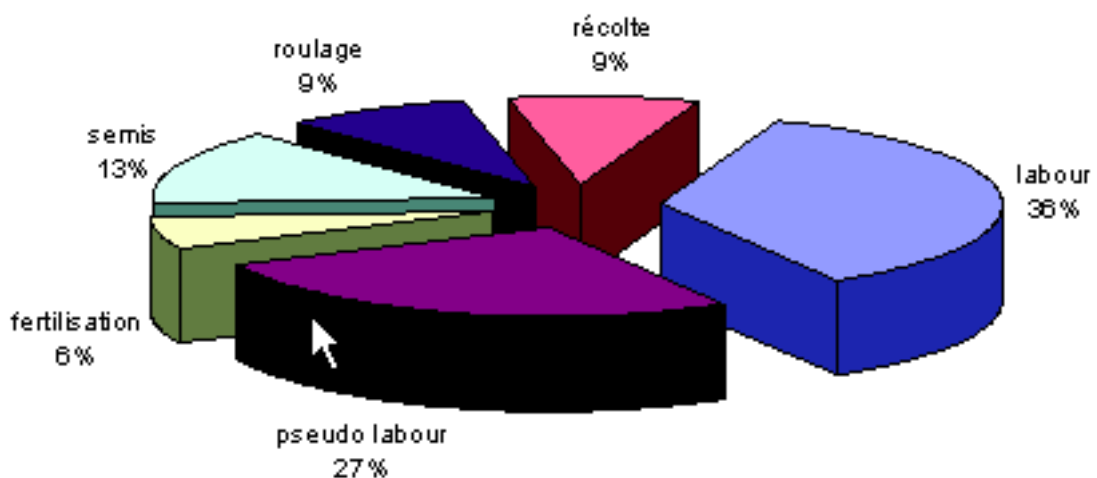


De ce fait, le cisaillement vertical du sol n'est pas réalisé ce qui entraîne un travail supplémentaire du versoir dont le rôle est de soulever et retourner la bande de terre.

En conséquence à cette remarque, l'énergie consommée par le coutre est transférée à la partie avant du versoir qui doit être conçue en conséquence. Actuellement les coutres sont constitués par une pièce supplémentaire, appelée aileron en acier très résistant à l'usure et cisailant le sol verticalement.

A titre d'exemple, les travaux de l'Institut Technique de Grandes Cultures, Anonyme 2003, mettent en évidence la répartition de la consommation en énergie pour les différentes étapes de l'itinéraire technique pour la préparation du sol illustrée sur la figure 21.

Celle-ci montre clairement l'importance des besoins en énergie des opérations de préparation du sol, en effet 63 % de cette énergie est utilisée par les travaux de préparation du sol dont 37 % pour les labours.



*Fig. 21 : Répartition de la consommation en énergie pendant l'itinéraire technique pour la mise en place d'une céréale blé.*

### 4.3. Méthodes d'évaluation de l'énergie consommée pendant le travail du sol

L'évaluation des besoins énergétiques pour la préparation du sol présente un intérêt économique à ne pas négliger pour toute production agricole. Cette évaluation peut être abordée de différentes façons.

Pour l'économiste, cette évaluation portera principalement sur le temps de réalisation des différentes opérations de préparation du sol et de l'organisation du chantier à cet effet. Il s'intéressera aussi aux investissements en équipements capables de produire la meilleure productivité.

L'agronome machiniste, s'intéressera par contre à l'effort fourni par le tracteur pour la réalisation des différentes opérations de préparation du sol et aux relations de l'outil aratoire avec le tracteur. Entre autres, son intérêt portera sur la relation entre la forme des pièces travaillantes et des conditions de travail sur l'effort de résistance à la traction en proposant par des modèles mathématiques pour l'évaluation de cet effort.

Le machiniste portera également un intérêt à l'état mécanique du tracteur et à celui des outils aratoires, comme par exemple l'usure des pièces travaillantes qui induisent des pertes d'énergie non négligeables.

Les méthodes d'évaluation des besoins en énergie pour la réalisation des techniques de préparation du sol sont fonction des moyens de mesure disponibles.

Actuellement, avec le développement des moyens de mesures comme les capteurs d'efforts et des moyens informatiques, l'évaluation des besoins énergétiques, pour toutes les opérations culturales, est réalisée avec une grande précision. Nous citerons en exemple le camion laboratoire qui peut récolter et quantifier plusieurs informations en même temps, sur une opération culturale donnée, notamment le labour.

La consommation en énergie pour la réalisation des travaux de préparation du sol est fonction de plusieurs paramètres parmi lesquels nous citerons : l'état du sol au moment des opérations, la profondeur et la largeur de travail, la vitesse d'avancement des agrégats agricoles (tracteur – outil aratoire), le type d'outil aratoire utilisé qui est caractérisé par la forme de ses pièces travaillantes et d'autres paramètres tels que l'état du tracteur et le niveau de technicité des opérateurs.

Outre l'évaluation de la consommation en énergie par l'intermédiaire de l'effort de résistance à la traction qui fera l'objet de notre travail, la consommation en énergie peut être déterminées approximativement par la quantité de carburant nécessaire par unité de surface travaillée ou par unité de temps appelée consommation horaire et notée  $G_h = \text{Volume de carburant} / \text{temps de travail}$ , cette méthode est appelée méthode du réservoir plein. Il est également possible de calculer la capacité de travail qui correspond à la surface travaillée par unité de temps à l'aide de la relation :

$$W_h = 3600.b.v.t \text{ (m}^2\text{/h)} = 0.36.b.v.t \text{ (ha/h)}$$

Où :

$W_h$  : capacité de travail (ha/h).

$b$  : largeur du travail (m).

$v$  : vitesse de déplacement (m/s).

$t$  : temps de travail (s).

Une fois la quantité de carburant déterminée et connaissant son pouvoir calorifique ( $10^4$  calories / gramme de gasoil), il est possible d'estimer la quantité d'énergie consommée en Joules par une simple conversion en utilisant les relations élémentaires :

$$1 \text{ Watt (W)} = 0,239 \text{ cal / s}$$

$$1 \text{ Calorie (cal)} = 4,18 \text{ Joules}$$

$$\text{Puissance (W)} = \text{Force} \cdot \text{Vitesse (Force en Newton et Vitesse en m / s)}$$

#### **4.4. Energie et techniques de travail du sol en relation avec le développement des racines**

---

La simplification des opérations de travail du sol, et notamment la suppression du labour, est un sujet d'actualité. Il est susceptible d'apporter des réponses aux exigences économiques (diminution des charges de mécanisation) et environnementales (lutte contre l'érosion,

stockage du carbone, biodiversité) de l'agriculture actuelle. Mais sa réussite repose sur la maîtrise de différents facteurs agronomiques.

Les raisons qui peuvent inciter à adopter les techniques culturales sans labour sont diverses: parmi elles nous citerons les aspects économiques qui est le plus important, la simplification de l'organisation du travail. Des progrès significatifs ont été faits pour apprécier leur intérêt, qui dépend fortement des situations rencontrées et des problèmes à résoudre dans l'exploitation.

Malgré tout, il nous semble que cela serait une erreur de considérer la suppression du labour comme un objectif en soi. Bien des situations justifient encore l'usage de cette pratique. C'est plutôt sous l'angle d'un nouveau moyen capable d'apporter des solutions à un problème donné qu'il faut considérer les travaux sans labour. Employées à bon escient, elles peuvent ouvrir de nouvelles perspectives pertinentes pour l'agriculture du troisième millénaire, dont chacun s'accorde à dire qu'elle sera durable ou ne sera pas.

Avant de décider de l'introduction des techniques culturales simplifiées, il serait nécessaire de rappeler que le travail du sol a pour objectif la transformation d'un état initial donné en un état final qui doit offrir à la culture à mettre en place un milieu le plus favorable possible pour son développement qui dépend lui-même du développement du système racinaire.

En effet, 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. Mais il existe aussi d'autres fonctions: ancrage sur le substrat, réserves en assimilés, métabolisme. Les racines contribuent en particulier aux équilibres hormonaux qui contrôlent la croissance et le fonctionnement de la plante. Elles constituent également une source de matière organique pour le sol; c'est même parfois la seule restitution régulière dans beaucoup de systèmes de culture. Il est donc important pour la production de la culture, mais aussi pour le maintien de la fertilité du sol, d'avoir un système racinaire bien développé, notamment en profondeur. 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. Si, en milieu non-contraignant (solution nutritive), quelques racines peuvent suffire à assurer les besoins en eau et éléments nutritifs de la plante (Maertens *et al.*, 1974), il n'en est pas de même au champ, où un bon développement racinaire des cultures est un facteur essentiel de leur productivité et surtout de leur tolérance aux aléas, en particulier climatiques (Maertens, 1964; Chopart et Nicou, 1976).

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. Malheureusement les systèmes racinaires des cultures sont encore peu connus car difficiles à observer au champ. C'est la face cachée de la plante.

Le labour aura donc, un effet favorable sur les systèmes racinaires des différentes cultures; il améliorera en particulier la vitesse de croissance en début de cycle et la colonisation du sol en profondeur. Il faut attribuer cet effet à une modification de la porosité du sol et à une réduction de la résistance mécanique du sol à la pénétration des racines,

car ce sont les deux propriétés physiques du sol qui sont les plus modifiées par le labour (Charreau et Nicou, 1971; Nicou, 1977). Dans les sols sableux mal structurés du Sénégal, des relations ont d'ailleurs été trouvées entre la porosité du sol en début de cycle et la densité racinaire (Nicou, 1974).

Pour prendre une décision sur la suppression ou non du labour de l'itinéraire technique, nous présentons ci-dessous quelques avantages et inconvénients du non labour.

**Le non labour a de nombreux avantages :**

Il limite du lessivage des sols. Ces techniques font parties des bonnes pratiques agricoles dans les milieux fragiles. L'intérêt, de ce point de vue, est nettement plus limité dans les régions traditionnelles de labour.

Il agrandit les « fenêtres » météo : nécessitant moins de temps de travail, l'agriculteur a plus de sécurité pour réaliser son travail dans les conditions optimales.

Tenant compte de l'intérêt économique, le non labour nécessite en effet moins de matériel agricole et donc moins de capitaux. Il sera cependant nécessaire d'étudier le prix des machines pour semis direct qui sont très élevés.

**Le non labour a aussi des inconvénients :**

**Inconvénients agronomiques :**

La formation d'un mulch (mélange de terre et de débris végétaux) favorisant les parasites et les maladies des plantes. En effet, le labour n'est pas seulement une préparation du sol pour l'amener à une bonne structure, mais joue aussi un rôle dans les contrôles des adventices. Le non-labour se traduit ainsi par une surconsommation de produits chimiques si l'agriculteur ne possède pas une excellente maîtrise des techniques de traitements phytosanitaires. La maîtrise des mauvaises herbes (adventices) et des parasites est plus délicate qu'en technique conventionnelle et essentiellement chimique (désherbant).

**Inconvénients économiques :**

Ils portent essentiellement sur la maîtrise des adventices (mauvaises herbes) et des parasites (notamment les limaces). Si l'agriculteur n'est pas techniquement très qualifié, le coût des produits phytosanitaires peut devenir prohibitif, ou bien le rendement peut en souffrir.

En remettant en cause l'outil le plus symbolique de l'agriculture, les techniques culturelles simplifiées ont réalisé une vraie révolution dans les pays à écosystème fragile comme les pays tropicaux. Dans les pays à climat tempéré, le labour reste une technique tout à fait adaptée, mais les techniques culturelles simplifiées trouvent un écho favorable notamment pour leur intérêt économique.

Concernant l'Algérie, l'introduction des techniques simplifiées sera favorable au niveau des régions sahariennes caractérisées par des sols sableux à texture très fragile, mais la maîtrise de la fertilisation et de la lutte chimique contre les mauvaises herbes est à prendre avec beaucoup de sérieux.

## **4.5. Conclusion**

---

Si pour l'agriculteur et l'économiste, l'évaluation de la consommation en énergie peut se limiter à la méthode présentée ci-dessus, pour le concepteur et le fabricant elle reste insuffisante car peu précise. Pour ces derniers, la méthode la plus commode pour estimer

le besoin en énergie d'un outil donné avec précision est certainement de mesurer l'effort exigé pour tirer cet outil dans des conditions de travail les plus favorables.

Tenant compte des nombreux paramètres intervenant lors du travail du sol et des nombreuses formes de pièces travaillantes, les chercheurs, pour l'évaluation des besoins en énergie lors des opérations de préparation du sol, ont subdivisé les outils aratoires en deux catégories suivantes :

- Les outils passifs eux même subdivisés en deux groupes, les formes simples tel que les outils à dents et les formes plus complexes comme les charrues à socs.
- Le deuxième groupe concerne plutôt les outils animés par la prise de force du tracteur.

Pour plus de précision dans l'évaluation des besoins en énergie des opérations de travail du sol, il est donc plus intéressant de déterminer la valeur de l'effort de résistance à la traction. Actuellement les moyens de mesure de cet effort et de toutes ses composantes sont nombreux et très fiables.

Enfin la méthodologie adoptée est d'analyser le système de force agissant sur la surface active de la pièce travaillante et d'établir par la suite des modèles mathématiques permettant de quantifier l'effort de résistance à la traction en relation avec les caractéristiques géométriques des pièces travaillantes en tenant compte évidemment de l'état initial du sol. Ce qui est d'autant plus de facilité par les techniques de modélisation et d'analyse dimensionnelle.

L'établissement des modèles mathématiques en relation avec les caractéristiques géométriques des surfaces actives présentera un intérêt pour le concepteur et le fabricant des outils aratoires.

## **Chapitre 5. Analyse du système de forces appliquées au corps de charrue à socs et de la modélisation de l'effort de résistance à la traction.**

### **5.1. Analyse du système de forces appliqué à un corps de charrue à soc.**

---

#### **5.1.1. Introduction**

L'évaluation des besoins en énergie pour la réalisation des travaux de préparation du sol est souvent illustrée par l'effort de résistance à la traction qu'oppose le sol à l'avancement des outils aratoires. Si pour les outils simples, comme les cultivateurs à dents, la détermination de cet effort est relativement simple, pour les outils complexes comme la charrue à socs, l'évaluation de cet effort au niveau de la pièce travaillante nécessite plus de précision et de moyens dans les calculs. En effet, contrairement aux pièces travaillantes des outils à dents, la détermination du point d'application de l'effort appliqué sur la surface active d'un corps de charrue à socs, est très difficile à déterminer vu la complexité cette surface.

Selon plusieurs auteurs, le point d'application de cette force est généralement situé à un 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 de celui-ci. Cependant le centre de gravité de la surface active du corps de charrue est situé à une hauteur supérieure. Cette différence est indispensable pour créer le moment permettant le basculement de la bande de terre. Ce basculement et la déformation de la bande de terre sont fonction de la valeur de cette différence de position du centre de gravité de la bande de terre et de celui de la surface active, d'où l'intérêt de définir correctement la position du centre d'action de la surface active lors de la conception du corps de charrue à soc.

### **5.1.2. Effort de résistance et ses composantes**

L'effort noté  $F_t$  de la résistance qu'oppose le sol à la charrue et que le tracteur doit vaincre lors du labour, peut se décomposer en une somme de composantes dues chacune à un effet particulier. Selon Kuczewski (1978), cet effort peut être définie comme suit :

$$F_t = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7$$

Avec :

$F_1$  : Composante horizontale de la résistance au découpage vertical de la bande de terre, ce découpage est assuré généralement par le coutre. Sa valeur dépend de la forme du coutre et de son affûtage. Evidemment ci le coutre existe.

$F_2$  : Composante horizontale de la résistance au découpage horizontal de la bande de terre, résistance du sol au niveau du soc. Son intensité est fonction de l'état d'usure de la partie affûtée du soc et de l'angle d'attaque  $\gamma$ .

$F_3$  : Composante horizontale de la résistance au soulèvement et à la mise en mouvement de la bande de terre. La valeur de cette composante dépend de la forme du versoir donc de la variation de l'angle de courbure ou d'inclinaison du versoir à savoir l'angle  $\theta$ .

$F_4$  : Composante horizontale de la résistance à la déformation de la bande de terre, cette composante est fonction de l'état du sol au moment du labour (humidité, texture et structure).

$F_5$  : Composante horizontale de la résultante des forces de frottement entre la surface active du corps de charrue principalement du versoir et de la bande de terre en mouvement.

$F_6$  : Composante horizontale de la force de frottement entre le talon de la charrue et le sillon- muraille, et la résistance au roulement de la roue de jauge si celle-ci existe.

$F_7$  : Composante horizontale supplémentaire due à un mauvais réglage de la charrue.

Cette relation met en évidence l'importance de l'état d'usure de l'outil aratoire ainsi que de ces caractéristiques géométriques sur l'effort de résistance à la traction. Mais ces différentes composantes sont calculées indépendamment les unes des autres, ce qui n'est pas pratique car cela impose des moyens spécifiques. L'évaluation de la résultante n'est donc pas directe.

A la limite, en supposant que les réglages sont corrects, et qu'actuellement les charrues sont généralement portées, cet effort sera donné par la relation :

$$F_t = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5$$

Rappelons que cette force est uniquement la composante horizontale de la force totale de résistance à la traction qui est la plus importante, notamment pour les outils portés. Les deux autres composantes sont respectivement : la composante latérale notée (FL ou Fy) et la composante verticale notée (FV ou Fz), cette dernière est souvent négligée pour les outils portés car sa valeur est très faible.

Pour cette raison l'effort résultant est généralement assimilé à la composante horizontale (FH ou Fx) suivant la direction d'avancement.

Rapportée à un repère OXYZ, la force de résistance se décompose en trois forces élémentaires proportionnelles entre elles et reliées par la relation de Kuczewski (1978) :

$$F_t = F_{XY} + F_{ZY} + F_{XZ}$$

La direction de la force  $F_{XY} = F_X + F_Y$  fait un angle de  $\varphi = 15 - 25^\circ$  avec la direction d'avancement et coupe l'arête affûtée du soc à une distance de  $l = 0,4b$  à partir de la pointe du soc (b représente la largeur de travail).

Selon Kanafojski (1967), La direction de la force  $F_{XZ}$  fait avec la direction d'avancement un angle de  $\psi = \pm 11^\circ$ , la valeur négative de cet angle correspond celle des socs usés.

La direction  $F_{ZY}$  présente par rapport à l'horizontale un angle de  $\rho = \frac{tg\varphi}{tg\psi}$ . Pour les sols compacts et

des socs usés les valeurs de cet angle sont négatives.

compacts et des socs usés les valeurs de cet angle sont négatives.

Ces trois composantes sont reliées entre elles par les relations suivantes :

$$F_y = F_x \cdot tg \varphi ; F_z = F_x \cdot tg \rho ; F_x = k \cdot a \cdot b$$

Où :

a : la profondeur de travail, b : la largeur de travail, k : la résistance spécifique du sol

Les schémas suivants représentent les différentes composantes appliquées sur le corps de charrue suivant les trois projections XOY, XOZ et YOZ.

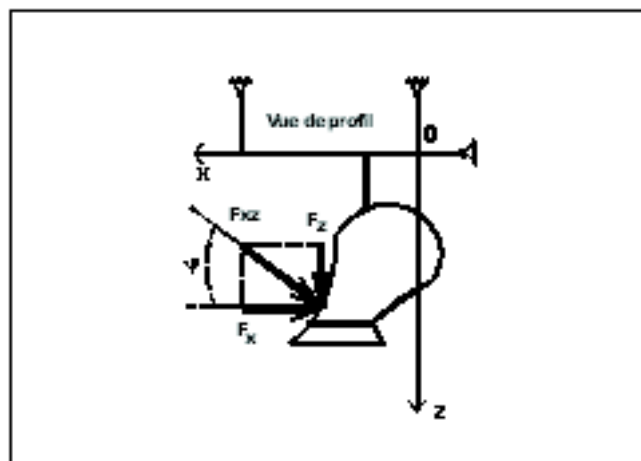
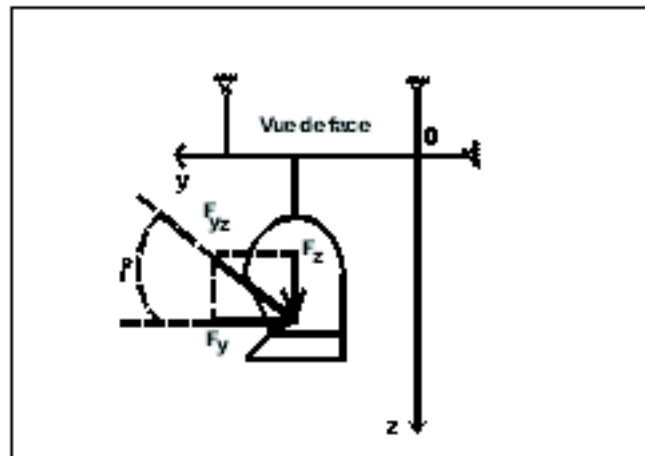
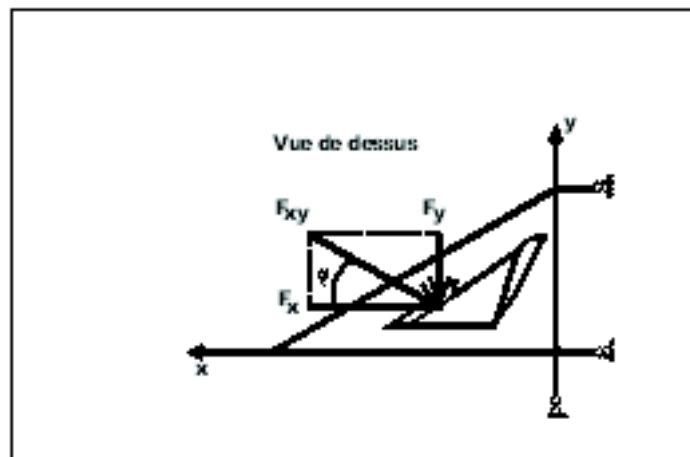


Fig. 22 : Composantes suivant le plan XOZ





**Fig.23** : Composantes suivant le plan YOZ



**Fig.24** : Composantes suivant le plan XOY

L'utilisation de ces représentations montrant les différentes composantes de l'effort de résistance à la traction qu'oppose le sol à l'avancement d'un corps de charrue à socs pendant le labour sont nécessaires entre autre pour :

- La compréhension du comportement dynamique de la bande de terre sur la surface active du corps de charrue.
- L'étude de la forme de cette surface active en vue de son amélioration pour l'optimisation des besoins en énergie.

Tenant compte de l'importance de la composante horizontale, suivant la direction d'avancement, l'effort de résistance à la traction lui est assimilé. En effet tenant compte de la liaison de la charrue avec le tracteur par l'intermédiaire de l'attelage trois points, les composantes verticales et latérales sont négligées, car transmises à la structure de l'ensemble tracteur-charrue.

## 5.2. Synthèse sur la modélisation de l'effort de résistance à la traction

---

### 5.2.1. Introduction



Durant ces dernières années plusieurs modèles mathématiques pour l'évaluation de l'effort de résistance à la traction ont été développés. Ces modèles sont de deux types, le premier à deux dimensions qui concernent les outils dits simples telle que les lames et les socs des outils à dents ; le second type à trois dimensions, est relatif aux outils à surfaces complexes telle que les charrues à socs.

En général la validité de ces modèles a été établie en comparant les prévisions avec les résultats expérimentaux souvent obtenus sur un canal de traction.

### 5.2.2. Analyse des différents modèles mathématiques de l'effort de résistance à la traction.

Dans ce qui suit, nous présentons les principaux modèles mathématiques établis par des chercheurs en insistant sur les paramètres utilisés pour l'évaluation de l'effort de résistance à la traction qui reste l'un des paramètres principaux pour l'évaluation des besoins en énergie pour la réalisation des opérations de préparation du sol.

#### 5.2.2.1. Modèle GORJATSCHKIN et SOEHNE (1960)

$$F_t = f \cdot G + k \cdot a \cdot b + \varepsilon \cdot a \cdot b \cdot v^2$$

avec :  $F_t$  = effort de résistance à la traction (N).

$f$  = coefficient de résistance au roulement (0.029 <  $f$  < 0.50 )

$G$  = poids de la charrue (N).

$a$  = profondeur de travail (m).

$b$  = largeur de travail en (m).

$v$  = vitesse d'avancement (m / s).

$\varepsilon$  = coefficient de forme du versoir (daN.s<sup>2</sup> / m<sup>4</sup>)

$k$  = coefficient de résistance spécifique du sol (N / m<sup>2</sup>).

Ces deux auteurs ont introduit, dans le modèle qu'ils proposent, les paramètres généraux tels que la profondeur (a) et la largeur de travail (b), la vitesse d'avancement et trois coefficients :

L'un lié au type de sol ( $k$  résistance spécifique du sol), le second  $f$ , coefficient de résistance au roulement, relatif à la liaison tracteur – charrue et enfin le troisième,  $\varepsilon$ , caractérisant la forme du versoir utilisé. Si les deux premiers paramètres sont facilement déterminés, le troisième est par contre difficilement évalué suite à la complexité de la forme des versoirs.

Pour ce qui est des valeurs de  $k$ , coefficient de résistance spécifique du sol qui traduit la sensibilité du sol à se déformer, celles-ci sont respectivement de 25000 à 35000 N/m<sup>2</sup> pour les sols légers, de 35000 à 60000 N / m<sup>2</sup> pour les sols moyens et est supérieur à 60000 N / m<sup>2</sup> pour les sols lourds, les valeurs de  $\varepsilon$  sont comprise entre 150 et 200 daN. s<sup>2</sup> / m<sup>4</sup>.

#### 5.2.2.2. Modèle LARSON et al (1968)

$$F_t = \gamma b^3 \left[ 0.42 + 1.53 fg\phi \left\{ 0.23 \left( \frac{C}{\gamma a} \right)^{1.50} \right\} + 0.42 + 1.53 fg\phi \left\{ 0.035 \left( \frac{C}{\gamma a} \right)^{1.37} \right\} \frac{v^2}{gb} \right]$$

avec :  $F_t$  = effort de résistance à la traction (KN)  
 $a$  = profondeur de travail (m)  
 $b$  = largeur de travail (m)  
 $\phi$  = angle de frottement interne du sol ( $^\circ$ )  
 $C$  = cohésion du sol (Kpa)  
 $\gamma$  = masse volumique du sol (KN / m<sup>3</sup>)  
 $g$  = constante de gravité (m / s<sup>2</sup>)  
 $v$  = vitesse d'avancement (m / s)

L'avantage de ce modèle plus complexe est l'introduction par les auteurs des propriétés mécaniques du sol ; la cohésion introduit indirectement la teneur en eau. Cependant le paramètre forme n'est pas pris en compte ce qui n'est pas sans effet sur la valeur de l'effort de résistance à la traction.

### 5.2.2.3. Modèle BINESSE (1970)

Le modèle précédent (Larson et al, 1968) a été repris par Binesse qui l'a simplifié comme suit :

$$F_t = S \left[ \frac{C}{\cos \phi} (0.85 + \sin \phi) \right]$$

avec :

$F_t$  = effort de résistance à la traction (daN).  
 $S$  = section de la bande de terre travaillée (dm<sup>2</sup>)  
 $\phi$  = angle de frottement interne du sol ( $^\circ$ )  
 $C$  = cohésion du sol (daN / dm<sup>2</sup>)

Ce modèle ne fait intervenir ni l'effet de la vitesse ni celui de la forme du corps de charrue.

### 5.2.2.4. Modèle GEE GLOUGH et al (1972)

Au vu des paramètres (profondeur et largeur de travail, masse volumique et vitesse d'avancement) facilement déterminables, introduits dans le modèle proposé par GEE CLOUG et al, ce modèle est pratiquement l'un des plus simples.

$$F_t = \alpha.b. \left\{ 13.30.\gamma.\alpha + 3.06.\gamma.\frac{v^2}{g} \right\}$$

Avec :  $F_t$  = effort de résistance à la traction (KN)

$\alpha$  = profondeur de travail (m)

$b$  = largeur de travail (m)

$\gamma$  = masse volumique du sol (KN / m<sup>3</sup>)

$v$  = vitesse d'avancement (m / s)

$g$  = constante de gravité (m / s<sup>2</sup>)

Ce modèle établi à partir d'essais réalisés sur 14 parcelles, est le plus utilisé par les chercheurs pour l'évaluation de l'effort de résistance à la traction des corps de charrue à socs car il met en relief les paramètres les plus influant sur l'effort de résistance à la traction, à savoir les dimensions du labour, l'état du sol et la vitesse de travail.

#### 5.2.2.5. Modèle KUCZEWSKI (1978)

$$F_t = F_{XY} + F_{ZY} + F_{XZ}$$

Avec :

$F_t$  = effort de résistance à la traction total (KN)

$F_{xy}$  = composante de  $F_t$  dans le plan xOy (KN)

$F_{zy}$  = composante de  $F_t$  dans le plan yOz (KN)

$F_{xz}$  = composante de  $F_t$  dans le plan xOz (KN)

Le détail sur les directions de ces différentes composantes a été mentionné précédemment.

L'avantage de ce modèle est la possibilité de définir les différentes composantes de l'effort de résistance à la traction et en déduire de ce fait quelle est la composante la plus importante à étudier ou celle à négliger ; ce qui pourrait être utile pour la conception de la forme de l'outil.

L'évaluation de ces différentes composantes nécessite cependant des moyens appropriés telles que les jauges de contraintes qui seront placées sur la surface active des corps de charrue à socs.

#### 5.2.2.6. Modèle OSKOUI et al (1982)

$$G = K_1 \cdot CI + K_2 \cdot \gamma \cdot (1 - \cos \phi) \cdot \frac{v^2}{g}$$

Où :  $G = \frac{F_t}{S}$  = résistance spécifique (KN / m<sup>2</sup>)

$CI$  = cône index (KN / m<sup>3</sup>)

$\gamma$  = masse volumique du sol (KN / m<sup>3</sup>)

$\phi$  = angle de frottement interne du sol (°)

$v$  = vitesse d'avancement (m / s)

$g$  = constante de gravité (m / s<sup>2</sup>)

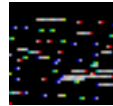
$K_1$  et  $K_2$  = constantes de régression

Ce modèle fait intervenir le cône index ( $CI$ ) du sol en fonction de sa teneur en eau et de sa masse volumique ( $\gamma$ ). La détermination du cône index est obtenue à partir de la relation :

$$CI = 450.50.w^{-2} + 0.019.\gamma$$

Ce modèle présente un avantage car la teneur en eau a un effet certain sur la valeur du CI et par conséquent sur l'effort de résistance à la traction. L'humidité du sol intervient donc au indirectement niveau de ce modèle.

En remplaçant la valeur de G par le rapport :



nous aurons la valeur de l'effort de résistance à la traction qui sera :

$$\frac{F_t}{S} = K_1 \cdot CI + K_2 \cdot \gamma \cdot (1 - \cos \phi) \cdot \frac{v^2}{g}$$

$$F_t = S \left( K_1 \cdot CI + K_2 \cdot \gamma \cdot (1 - \cos \phi) \cdot \frac{v^2}{g} \right)$$

#### 5.2.2.7. Modèle de QIONG et al (1986)

$$F_t = \gamma . a . (b_1 + b_2 . v^2)$$

Où:

$F_t$  = effort de résistance à la traction (KN).

$\gamma$  = masse volumique du sol (KN / m<sup>3</sup>).

$a$  = profondeur de travail (m).

$v$  = vitesse d'avancement (m / s).

$b_1 = 1,5$  et  $b_2 = 0,228$

#### 5.2.2.8. Modèle GRISSO et al (1983)

$$F_t = \gamma . a . b^2 . N_\gamma + c . a . b . N_c + A_d . a . b . N_a$$

Où, après factorisation afin de faire ressortir la section de la bande de terre labourée:

$$F_t = a . b . (\gamma b . N_\gamma + c . N_c + A_d . N_a)$$

Où :  $F_t$  = effort de résistance à la traction total (KN)

$a$  = profondeur de travail (m)

$b$  = largeur de travail (m)

$c$  = coefficient de cohésion du sol

$\gamma$  = masse volumique du sol (N / m<sup>3</sup>)

$N_\gamma$  = force due à la masse du sol (N)

$N_c$  = cohésion du sol (N / cm<sup>2</sup>)

$N_a$  = adhésivité du sol (N / cm<sup>2</sup>)

$A_d$  = coefficient d'adhésion

À partir de ce modèle ces auteurs ont déduit les deux composantes :

Verticale :  $F_z = F_t . \cos(\alpha + \delta)$  et Horizontale :  $F_x = F_t . \sin(\alpha + \delta)$

### 5.3. Conclusion

Hormis le modèle de Kuzewski (1978), les autres modèles proposés sont basés sur le principe de la pression outil / sol. Ce principe reste valable pour des surfaces actives planes qui sont qualifiées de formes simples, mais ne l'est pas pour les pièces travaillantes à surfaces actives complexes comme celles des corps de charrues à socs.

Plusieurs travaux de recherches importants (Nichols et Kummer, 1932; Doner et Nichols, 1934; Gao Qiong et al, 1986) ont été réalisés pour décrire la surface active des versoirs et classer les forces produites pendant l'exécution du labour ainsi que la relation de ces forces avec uniquement les propriétés dynamiques du sol.

Plusieurs modèles prédisant l'effort de traction pour la charrue Larson et al. 1968; Gee Clough et al, 1972, ont été développés sur la base de l'analyse dimensionnelle. Oskoui et al. (1982) ont proposé un modèle spécifique en adaptant la formule développée par Gorjatchkin, tenant compte de l'effet de l'angle d'enture ( $\alpha$ ) et en prenant le cône index du sol comme base de mesure de la force.

Si les caractéristiques angulaires des pièces travaillantes des outils aratoires simples, comme les socs des cultivateurs à dents, ont fait l'objet d'une analyse de leurs effets sur l'effort de résistance à la traction, les caractéristiques géométriques des surfaces actives des corps de charrues à socs ont rarement fait l'objet de tels travaux.

Selon Ros V. (1993), si les angles et les dimensions des surfaces actives des corps de charrue à socs ont été étudiés, c'est pratiquement dans le cadre de la description de ces pièces travaillantes ou dans celui de leurs effets sur les indices qualitatifs.

Le choix de l'un de ces modèles pour l'évaluation avec précision de l'effort de résistance à la traction est souvent délicat. En effet si nous considérons les modèles de Gee Clough et de Gorjatchkin pour l'évaluation de l'effort de résistance à la traction pour une même forme de surface active et dans de mêmes conditions de sol et de travail, les valeurs obtenues seront-elles les mêmes pour les deux modèles si non quel sera le modèle le plus fiable pour une évaluation précise de la consommation en énergie. Ce point sera abordé au niveau de la partie relative à la modélisation de l'effort de résistance à la traction.

## **CONCLUSION BIBLIOGRAPHIQUE**

Au travers de cette première partie de notre travail, nous avons voulu faire ressortir l'importance et le rôle des techniques de préparation du sol pour la mise en place d'une culture. Les principaux points à retenir sont principalement les différentes interactions entre les nombreux paramètres relatifs aux caractéristiques physico - mécaniques du sol, les exigences agronomiques pour la mise en place de la culture et les caractéristiques géométriques des outils aratoires utilisés.

Tenant compte de la complexité de la surface active d'un corps de charrue à socs, les travaux de recherche portant sur cet outil, ont souvent été orientés vers l'analyse des indices qualitatifs des labours mais non sur la quantification de la forme de la surface active et sur celle de l'effet des caractéristiques géométriques des surfaces actives des corps de charrue à soc sur l'effort de résistance à la traction.

La partie relative à la consommation en énergie a cependant été limitée à l'évaluation de la consommation en carburant et ce en relation avec les caractéristiques physico - mécaniques du sol et certaines conditions de travail telles que la vitesse d'avancement de la charrue ainsi que la largeur et la profondeur de travail.

Les caractéristiques géométriques de la surface active des corps de charrue à socs n'ont pas été prises en considération pour la proposition de modèles mathématiques permettant d'évaluer l'effort de résistance à la traction. Cela a entraîné un arrêt du développement géométrique de cet outil au profit de celui des dispositifs de sécurité d'utilisation et des dimensions de la charrue à socs.

En Algérie, les fabricants de la charrue à socs n'ont guère amélioré les caractéristiques de cet outil. Les charrues importées comme celle fabriquées localement ne répondent pas correctement aux objectifs recherchés par les labours notamment du point de vue énergétique.

Malgré les nouvelles techniques simplifiées de la préparation du sol présentant des avantages économiques 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 et la lutte contre les mauvaises herbes.

L'ensemble de ces constats et remarques nous a amené à orienter notre travail avec les objectifs suivants :

- Caractérisation géométrique des deux corps de charrue à socs fabriqués et largement utilisés en Algérie.
- Modélisation des surfaces actives de ces deux corps de charrue en vue de leur optimisation.
- Analyse de leurs effets sur les indices qualitatifs des labours.
- Analyse de l'effort de résistance à la traction par la méthode de l'analyse dimensionnelle.
- Etablissement de modèles mathématiques de l'effort de résistance à la traction en relation avec les caractéristiques géométriques des surfaces actives.
- Optimisation de l'effort de résistance à la traction en vue de réduire la consommation en énergie lors des labours.
- Analyse du comportement mécanique de la surface active

Modélisation de l'effort de résistance à la traction des socs de cultivateur à dents en relation avec les caractéristiques géométriques et l'état d'usure.

Enfin, ce travail est une approche méthodologique de l'étude des deux formes d'outils aratoires les plus fréquemment utilisés en Algérie. Il permettra à l'ingénieur agronome de choisir correctement la forme de versoir à utiliser dans des conditions de sol, prédéfinies et d'en prévoir l'effort nécessaire pour la réalisation du labour et de choisir en conséquence la puissance du tracteur. Ce travail sera également une base nécessaire pour le concepteur et le fabricant des outils aratoires de forme complexe comme le corps de charrue à socs.

# DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE : Modélisation et Optimisation de la forme et de l'effort

## Objectifs et présentation des essais

- Objectifs

Trois objectifs sont recherchés au cours de notre travail.

Le premier est la proposition d'une méthode d'analyse de la forme géométrique des outils aratoires utilisés pendant la première étape de l'itinéraire technique pour la mise en place des cultures.

Le second est de montrer l'importance de l'effet de la forme des outils aratoires sur les indices qualitatifs et énergétiques des labours.

Le troisième objectif concerne l'optimisation de la forme des surfaces actives et l'établissement d'un modèle mathématique qui permet de quantifier l'effort de résistance à la traction en relation avec les caractéristiques géométriques de l'outil et des caractéristiques d'usure des socs de cultivateurs à dents.

- Présentation des essais

Les essais entrepris au cours de nos travaux portent sur :

- La caractérisation géométrique des corps de charrue à socs fréquemment rencontrés sur champ, à savoir les charrues fabriquées par l'Entreprise Nationale de Production de Matériel Agricole (ENPMA entreprise de l'ex SONACOME) et par l'Entreprise de Matériel Aratoire d'Alger (EMARAL ex SACRA). Pour des raisons de commodité dans le texte, nous retiendrons les appellations (ENPMA et SACRA).
- L'analyse de l'interaction des corps de charrue à socs avec le sol, il s'agit dans cette partie, d'étudier l'influence de la forme des versoirs et des conditions de travail, particulièrement la vitesse, sur les indices qualitatifs des labours.
- La réalisation des modèles réduits (modélisation géométrique) pour proposer des équations de formes des surfaces actives des corps de charrue à socs.
- La simulation par la méthode des éléments finis du comportement de la bande de terre sous l'action des corps de charrue à socs sous l'effet de la position du point d'application de l'effort en relation avec le centre de gravité de la surface active du corps de charrue.
- L'utilisation de ces modèles réduits pour l'analyse de l'influence de la forme des versoirs sur l'effort de résistance à la traction.
- L'établissement des modèles mathématiques mettant en relation l'effort de résistance à la traction avec les caractéristiques géométriques des surfaces actives des outils aratoires et les conditions de travail.



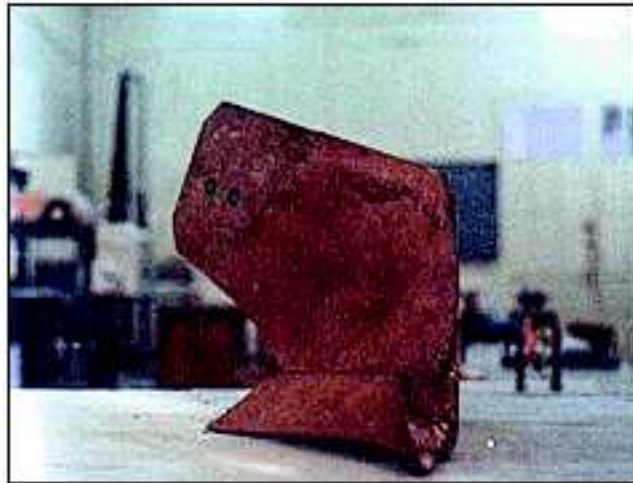
- En dernière partie, un modèle de l'effort de résistance à la traction en relation avec les caractéristiques d'usure des socs de cultivateurs à dents est proposé pour optimiser l'utilisation des socs de cultivateurs.

## Chapitre 6. Caractérisation des surfaces actives des corps de charrues à socs

### 6.1. Caractérisation des surfaces actives des corps de charrue à socs étudiés

---

Les corps de charrue, utilisés lors de nos essais, sont représentés sur les figures suivantes :



*Fig. 25 : Forme ENPMA (vue de face YOZ)*



*Fig.26 : Forme SACRA (vue de face YOZ)*



*Fig. 27 : Forme ENPMA (vue de dessus XOY) XOY)*



*Fig.28 : Forme SACRA (vue de dessus*

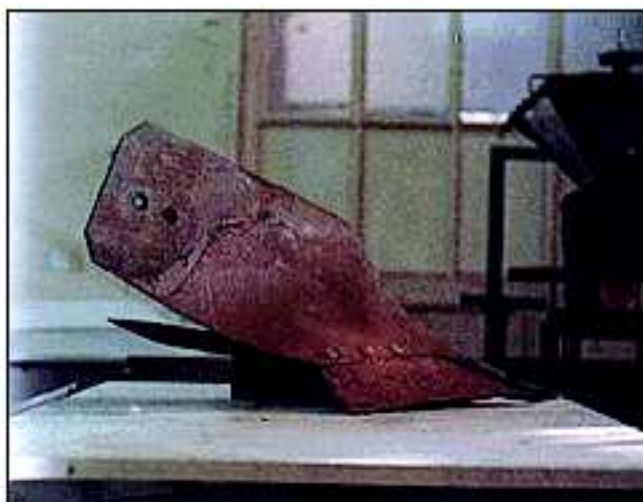


Fig. 29 : Forme ENPMA (vue latérale YOZ)



Fig. 30: Forme SACRA (vue latérale YOZ)

### 6.1.1. Caractéristiques générales

Les principales caractéristiques géométriques des deux corps de charrue à socs sont consignées dans le tableau ci-dessous :

Corps de charrue	ENPMA	SACRA
Forme du soc	carrelet	carrelet
Hauteur du corps $h$ (mm)	440	425
Longueur projetée $l$ (mm)	940	740
Largeur $b$ (mm)	350	310
Angle d'entrure ( $\alpha_0$ )	29	17
Angle d'attaque ( $\gamma_0$ )	38	39
Angle d'inclinaison ( $\theta_0$ )	35	33
Angle de monté de la bande de terre ( $\beta_0$ )	40	48

*Tableau 7: caractéristiques constructives des deux corps de charrues.*

### **6.1.2. Les longueurs**

Les formes des versoirs sont très nombreuses et complexes, afin de les distinguer les unes des autres, l'utilisation des angles ne suffit pas, 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.

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

$L_1 = AL$  : Longueur maximale du corps

$l_1 = BL$  : La plus grande dimension du versoir

$l_2 = Cl$  : Longueur du bord supérieur du versoir

$m = DM$  : Largeur du bord inférieur jusqu'au point de courbe maximale

$h = CC'$  : Hauteur de chute du point C jusqu'au fond de labour de C'

$c = AC$  : Distance entre la pointe du soc et le point d'inflexion C

$d_1 = LL'$  : Largeur arrière du versoir

$d_2 = DD'$  : Largeur de la gorge du corps de la charrue ou largeur minimale

$d_3 = MM'$  : Largeur du versoir au point de courbure maximale

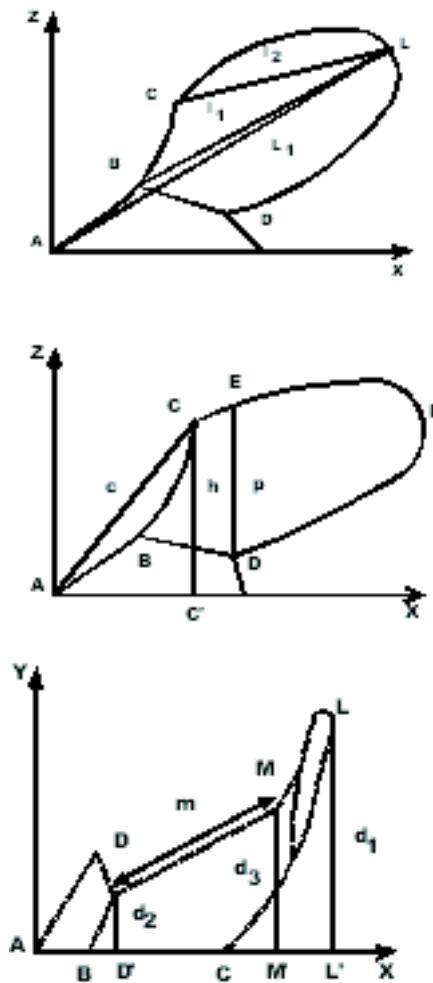


Fig.31: Caractéristiques dimensionnelles d'un corps de charrue à socs

### 6.1.3. Les angles initiaux

Ces angles sont ceux mentionnés dans le tableau 7. 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 ( $\alpha_0$ ) est important, plus la charrue pénètre bien dans le sol, mais l'effort de résistance à la traction en sera plus important.

## 6.2. Projections des surfaces actives et mesure des angles principaux

### 6.2.1. Moyens et méthode

Les projections des surfaces actives des deux corps de charrues ont été réalisées à l'aide d'un profilographe conçu au laboratoire de machinisme agricole (fig. 32).

Les corps de charrues sont placés suivant leurs plans de travail sur un support mobile dans le sens vertical, en face du profilographe composé d'un mécanisme directeur à coulisseau, muni à sa base d'une pointe mobile qui suit les différentes courbures de la surface active du corps de charrue.



**Fig. 32 :** Dispositif de réalisation des projections (profilographe)

La détermination des trois angles principaux caractérisant les formes des surfaces actives est réalisée sur les différentes courbes obtenues sur les trois projections réalisées à l'aide d'un profilographe (Fig.32). Les trois angles en question sont respectivement :

Angle de montée de la bande de terre ( $\alpha$ ) initialement d'enture ( $\alpha_0$ ).

Angle de déplacement latéral de la bande de terre ( $\gamma$ ) ou angle d'attaque ( $\gamma_0$ ).

Angle de retournement de la bande de terre ( $\theta$ ).

Les angles initiaux  $\alpha_0$  et  $\gamma_0$ , sont mesurés au niveau du soc.

### 6.2.2. Résultats

Les résultats obtenus sur la variation des trois angles principaux caractérisant les surfaces actives des deux corps de charrue à socs sont consignés sur les tableaux suivants où les valeurs des angles sont données en degrés.

**Tableau 8: Variation de l'angle  $\alpha$  en relation avec la hauteur du corps de charrue**

h (mm)	40	80	120	160	200	240	280	320	360
ENPMA	29	30	39	45	57,5	68,5	76,5	80	83
SACRA	17,5	47	52,5	68	75	85	86	88,5	90

**Tableau 9 : Variation de l'angle  $\gamma$  en relation avec la hauteur du corps de charrue**



h (mm)	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
ENPMA	39	39	39	39	40,5	43	43,5	44	45	45	47
SACRA	40	40	41	41,5	42	42	43	43,5	43,5	43	43

**Tableau 10: Variation de l'angle  $\theta$  en relation avec la hauteur du corps de charrue**

h (mm)	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290	310
ENPMA	38	43	46,5	51	55	60	62	64	67	70,5	74	75
SACRA	35	58	65	66,5	72	75	76,5	85	87	89	92	94

**Tableau 11 : Variation de l'angle  $\gamma$  en relation avec la longueur du corps de charrue**

l (mm)	0	60	120	180	240	300	360
ENPMA	44,36	43,88	42,63	42,46	42,71	44,8	45,79
SACRA	43,85	43,85	43,85	43,85	43,85	43,85	43,85

**Tableau 12 : Variation de l'angle  $\theta$  en relation avec la longueur du corps de charrue**

L (mm)	0	60	120	180	240	300	360
ENPMA	61	61	62	65	72	73	75
SACRA	67	67	67	67	67	67	67

## 6.3. Analyse de la variation des angles

---

### 6.3.1. Méthode adoptée pour l'analyse

Afin de mettre en relation la variation de ces trois angles avec la hauteur du corps de charrue et de sa longueur, nous avons adopté la méthode des régressions polynomiales. Cette méthode permet de quantifier les variations des angles en proposant des équations mathématiques simples à analyser.

Avant d'aborder cette analyse, il nous a semblé intéressant de comparer à partir des coordonnées des points de mesure des surfaces actives, les courbures à différents niveaux des deux versoirs.

Pour cela, les surfaces actives des deux corps de charrues à socs, étant complexes dans leur totalité, ont été subdivisées chacune en trois parties ou surfaces distinctes par des plans verticaux parallèles à la direction d'avancement, à partir de la pointe du soc tel que mentionné sur le schéma suivant (fig.33):

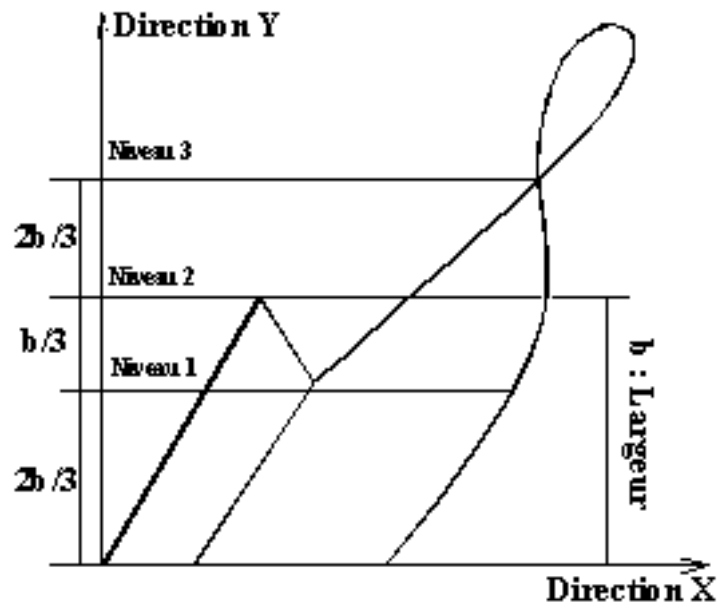


Fig.33 : Plans des courbures moyennes

Les coordonnées des points de ces trois surfaces élémentaires sont analysées par la méthode des régressions polynomiales du second degré. Les équations obtenues sont :

Niveau 1 : ENPMA : $y = 10,91 - 0,31x - 10^{-3}x^2$	SACRA : $y = 10,59 - 0,36x + 0,01x^2$
Niveau 2 : ENPMA : $y = 14,39 - 0,73x + 0,01x^2$	SACRA : $y = 9,57 - 0,07x - 0,01x^2$
Niveau 3 : ENPMA : $y = 3,15 - 0,98x + 0,02x^2$	SACRA : $y = 4,71 - 0,82x + 0,06x^2$

Au niveau de ces équations, x représente la hauteur du corps de charrue et y la direction transversale. Ce qui a permis de tracer les courbures moyennes représentées sur le graphe sur la page suivante. (fig.34).

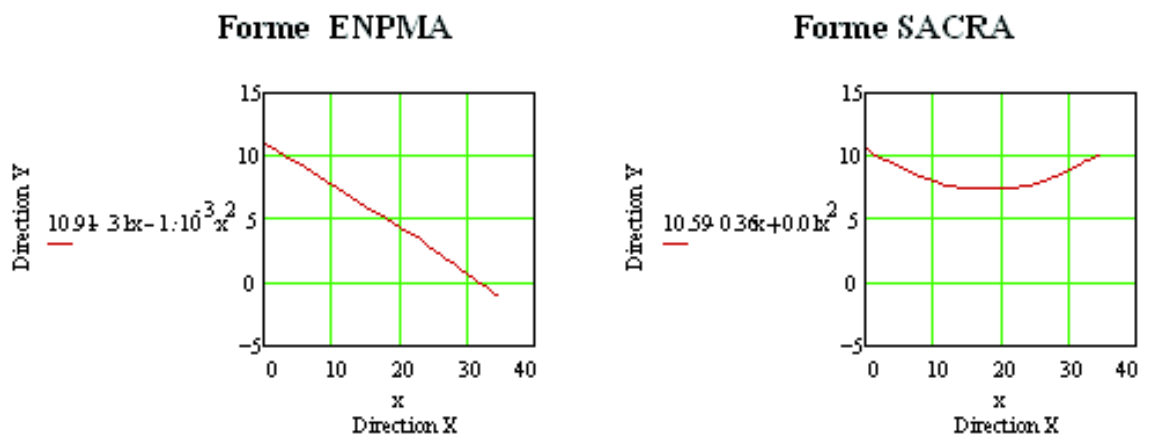
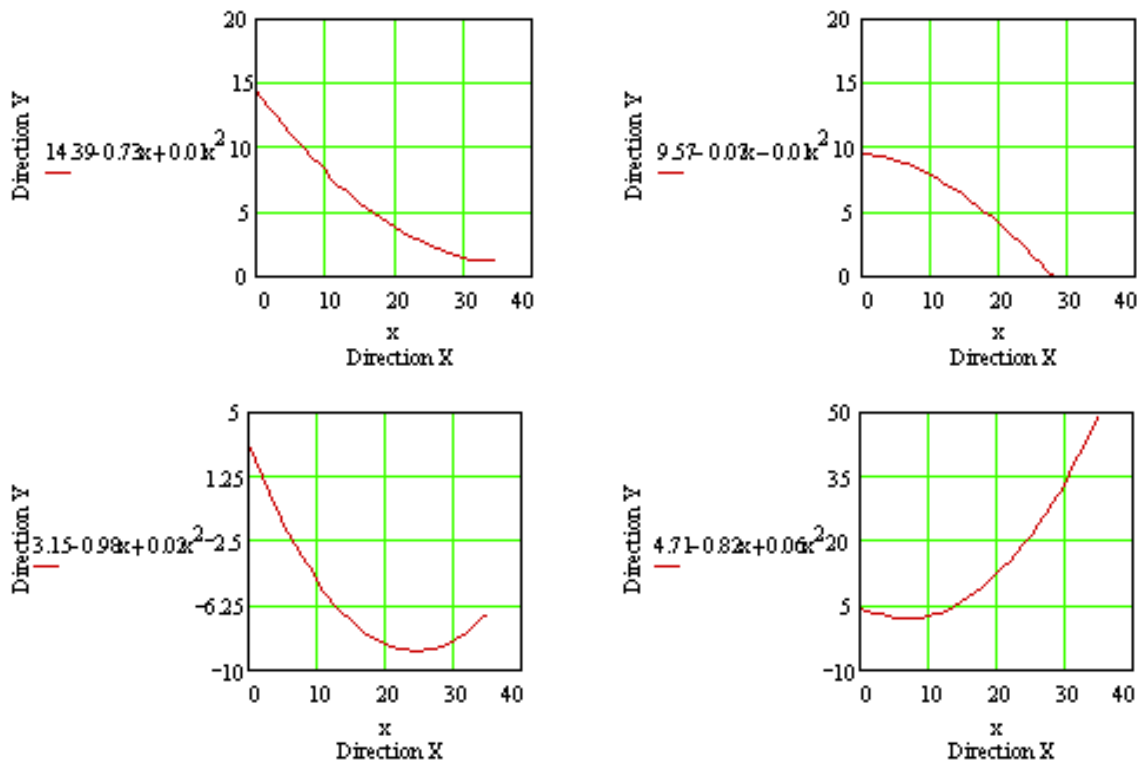


Fig. 34 : Courbures moyennes des surfaces actives des corps de charrue





Ces représentations montrent que la courbure de la surface active de la forme SACRA est plus accentuée que celle de la forme ENPMA. Ceci est important sur la déformation du sol. La forme SACRA permettrait un meilleur retournement de la bande de terre. Pour des sols à faible humidité l'émiettement serait plus accentué. Il est à noter que la courbure est plus importante à l'avant du corps (premier tiers) de charrue pour la forme ENPMA.

Pour plus de précision, une analyse de la variation des angles principaux est réalisée dans ce qui suit.

### 6.3.2. Mise en équations de la variation des angles principaux des surfaces actives

Les équations ci-dessous représentent la variation des angles en fonction de la hauteur du corps de charrue. L'axe des X sur la représentation graphique représente respectivement, x (longueur du corps), y (largeur du corps) et z (la hauteur du corps).

L'analyse statistique, par la méthode des régressions polynomiales, de la variation des angles caractéristiques des surfaces actives des deux formes de corps de charrue à socs a donné les résultats suivants :

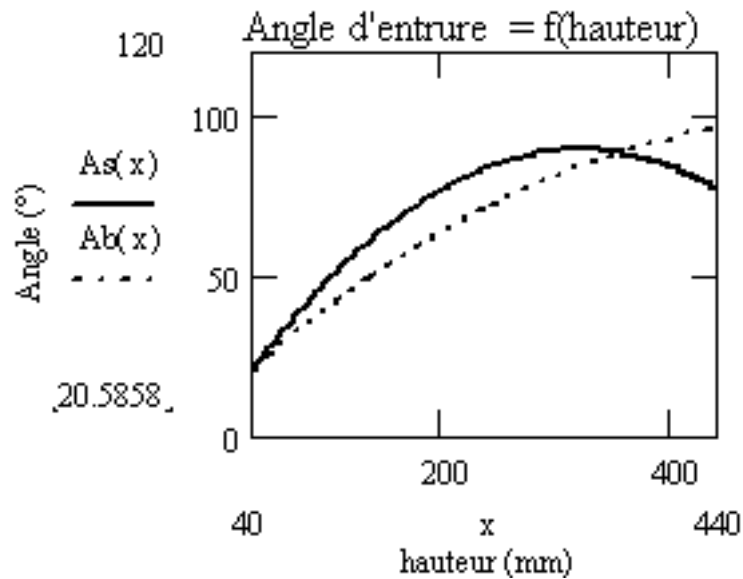
#### 6.3.2.1. Variation de l'angle $\alpha$ en fonction de la hauteur h

##### SACRA

$$\alpha_{\text{SACRA}} = -0,46 + 0,56 h - 8,72 \cdot 10^{-4} h^2 \quad R^2 = 0,98 \quad SD=3,51 \quad p<0.0001$$

##### ENPMA

$$\alpha_{\text{ENPMA}} = 8,45 + 0,34 h - 3,21 \cdot 10^{-4} h^2 \quad R^2 = 0,97 \quad SD=4,92 \quad p<0.0001$$



**Fig. 35 :** Variation de l'angle  $\alpha$  en fonction de la hauteur du corps de charrue  $As(x) : \alpha_{SACRA}(x)$  et  $Ab(x) : \alpha_{ENPMA}(x)$

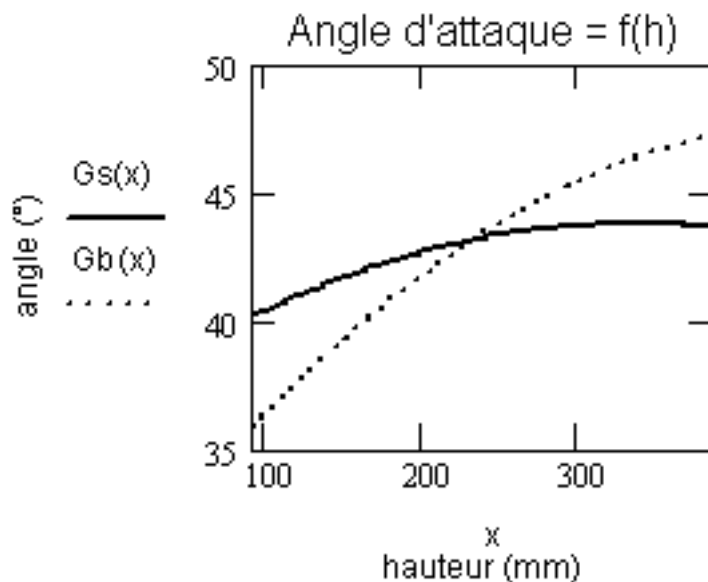
### 6.3.2.2. Variation de l'angle $\gamma$ en fonction de la hauteur $h$

#### SACRA

$$y_{SACRA} = 37,02 + 0,04 h - 5,9 \cdot 10^{-5} h^2 \quad R=0,97 \quad SD = 0,21 \quad p < 0,0001$$

#### ENPMA

$$y_{ENPMA} = 29,28 + 0,08 h - 8,7 \cdot 10^{-5} h^2 \quad R=0,98 \quad SD = 0,56 \quad p < 0,0001$$



**Fig. 36 :** Variation de l'angle  $\gamma$  en fonction de la hauteur du corps de charrue  $Gs(x) : \gamma_{SACRA}(x)$  et  $Gb(x) : \gamma_{ENPMA}(x)$

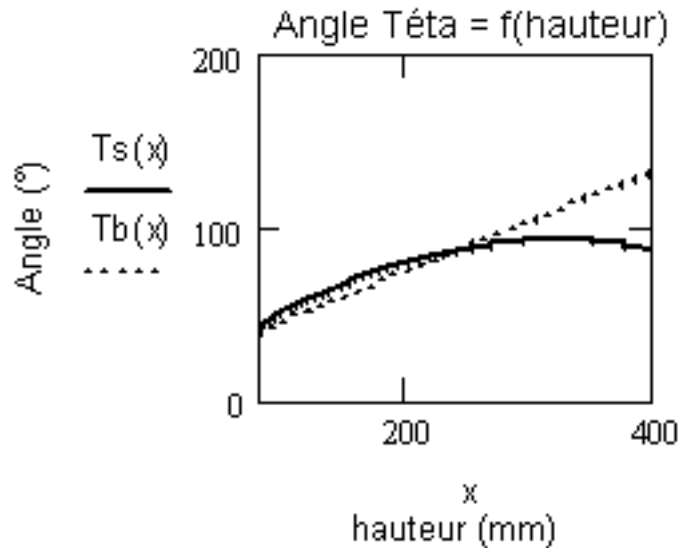
### 6.3.2.3. Variation de l'angle $\theta$ en fonction de la hauteur $h$

SACRA

$$\theta_S = 6,75 + 0,53 h - 8,2 \cdot 10^{-4} h^2 \quad R^2 = 0,94 \quad SD = 4,16 \quad p < 0,0001$$

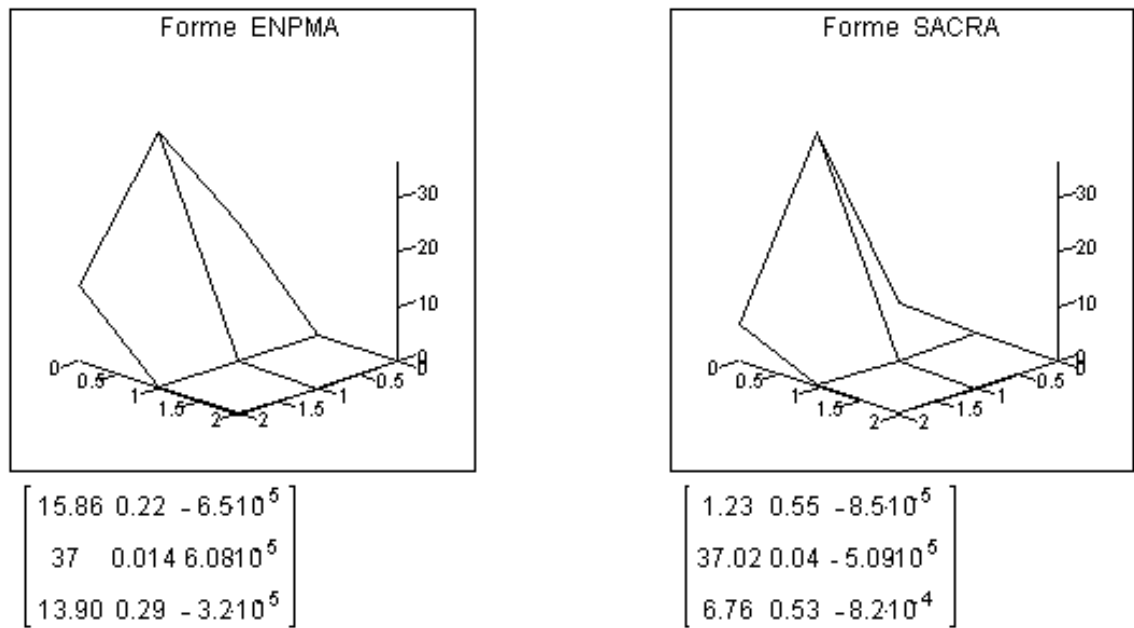
ENPMA

$$\theta_B = 16,78 + 0,29 h - 3,0 \cdot 10^{-4} h^2 \quad R^2 = 0,98 \quad SD = 1,83 \quad p < 0,0001$$

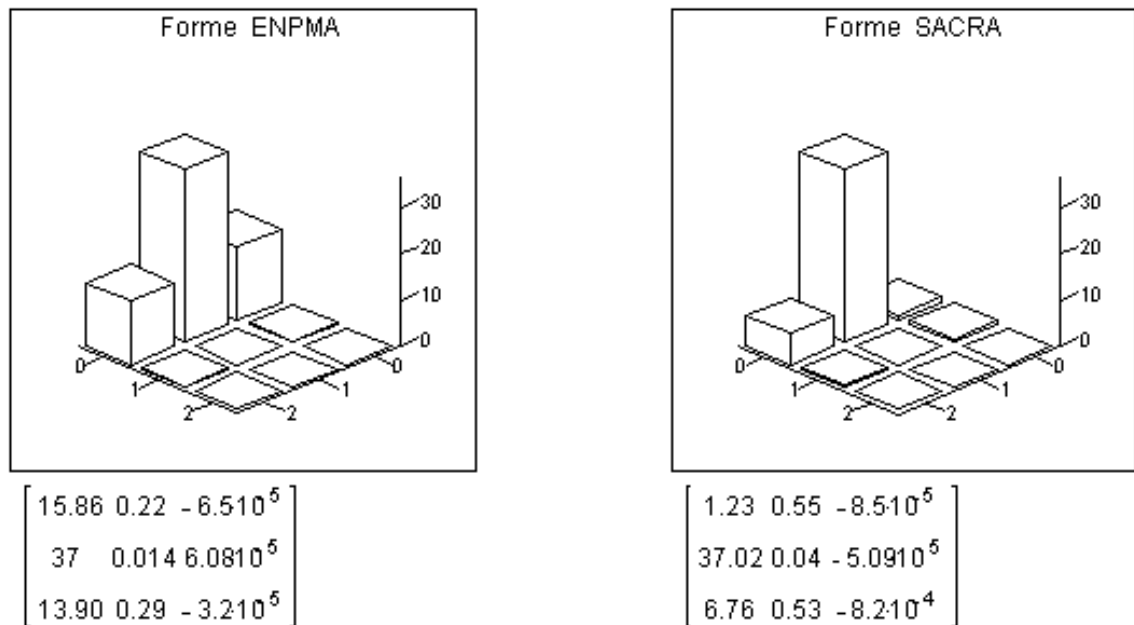


**Fig. 37** : Variation de l'angle  $\theta$  en fonction de la hauteur du corps de charrue Ts(x) :  $\theta_{SACRA}(x)$  et Tb(x) :  $\theta_{ENPMA}(x)$

L'analyse de la variation de ces angles, met en évidence que la courbure de la surface active de forme SACRA a une courbure plus accentuée que celle de la forme ENPMA. L'utilisation de ces relations a permis de tracer les modèles théoriques des deux surfaces actives des corps de charrue dans l'espace avec leurs décompositions en quatre parties. La représentation sous forme d'histogrammes permet de prévoir le comportement du sol sous l'action des deux surfaces. (Fig.38).



**Fig.38** : Représentation graphique des surfaces actives



Cette représentation permet de voir la forme de la surface sur laquelle se déplacera la bande de terre pendant le travail, et d'en prévoir la déformation du sol, celle-ci sera plus accentuée sur la surface de la forme SACRA particulièrement à l'arrière du versoir. L'analyse de la variation des angles permet de classer ces deux formes dans la catégorie des corps de charrue de type cylindroïde. La différence des surfaces actives réside au niveau des deux tiers arrières des corps de charrue. La partie arrière de la forme SACRA est plus cylindrique que celle de la forme ENPMA qui est plutôt plane.

#### 6.4. Etablissement des équations des surfaces projetées

Avant l'établissement des équations de surfaces des deux corps de charrue, nous analyserons leurs courbures moyennes qui nous renseigneront sur la trajectoire que suivra la bande de terre pendant le travail.

#### 6.4.1. Analyse des courbures moyennes des surfaces actives des deux formes de corps de charrues.

Après avoir déterminé les coordonnées des surfaces actives des deux corps de charrues de l'échelle 1/3, des projections sur les trois plans de travail ont été réalisées, avec l'établissement des équations de surface par la méthode des régressions polynomiales. Plusieurs méthodes sont possibles pour l'établissement de ces équations.

Les modèles mathématiques illustrant les surfaces actives peuvent être choisis en relation avec la précision recherchée. En première approximation, nous utiliserons la régression linéaire à un degré. Ce qui donne les équations suivantes:

##### SACRA

Projection : XZ  $Z = -0,979 + 0,583 x$   $R = 0,715$

Projection : XY  $Y = -2,864 + 0,723 x$   $R = 0,817$

Projection : YZ  $Z = 5,692 + 0,299 y$   $R = 0,325$

##### ENPMA

Projection : XZ  $Z = -2,635 + 0,658 x$   $R = 0,813$

Projection : XY  $Y = -4,202 + 0,679 x$   $R = 0,836$

Projection : YZ  $Z = 4,530 + 0,529 y$   $R = 0,531$

Pour plus de précision nous avons utilisé des modèles de Gauss, plus complexes mais beaucoup plus précis, pour illustrer les surfaces actives par des courbes qui traduisent clairement le déplacement de la bande de terre sur la surface active suivant les trois plans de travail. Les courbures moyennes obtenues sont représentées sur les pages suivantes :

##### Forme SACRA

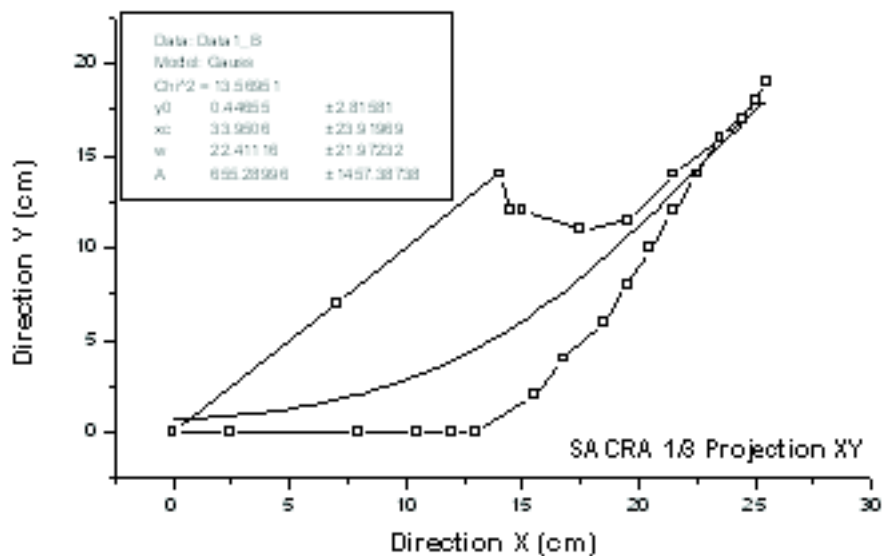


Fig.39 : Courbure moyenne suivant le plan XOY (SACRA)

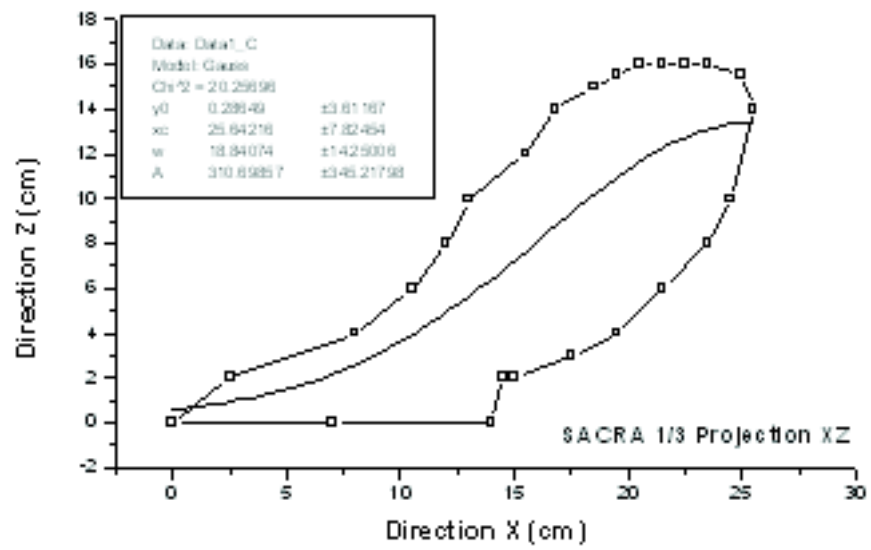


Fig.40 : Courbure moyenne suivant le plan XOZ (SACRA)

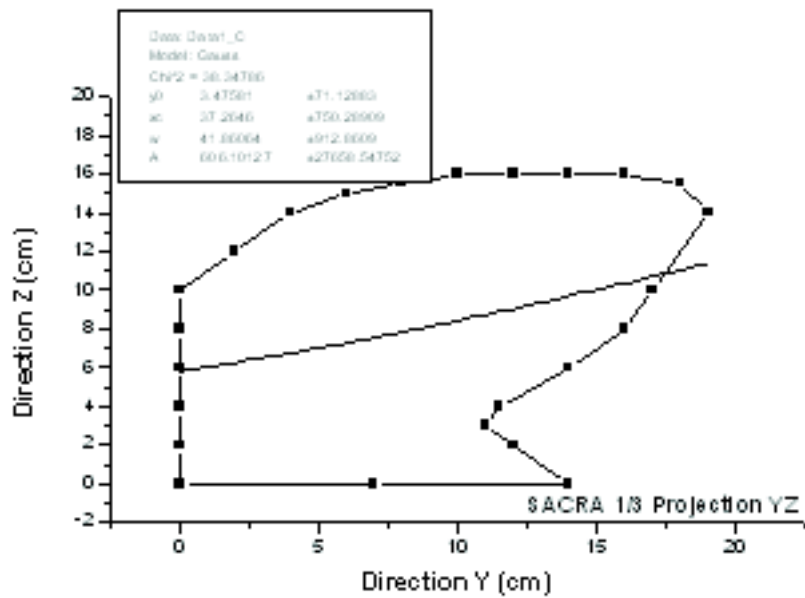


Fig.41 : Courbure moyenne suivant le plan YOZ (SACRA)

Forme ENPMA

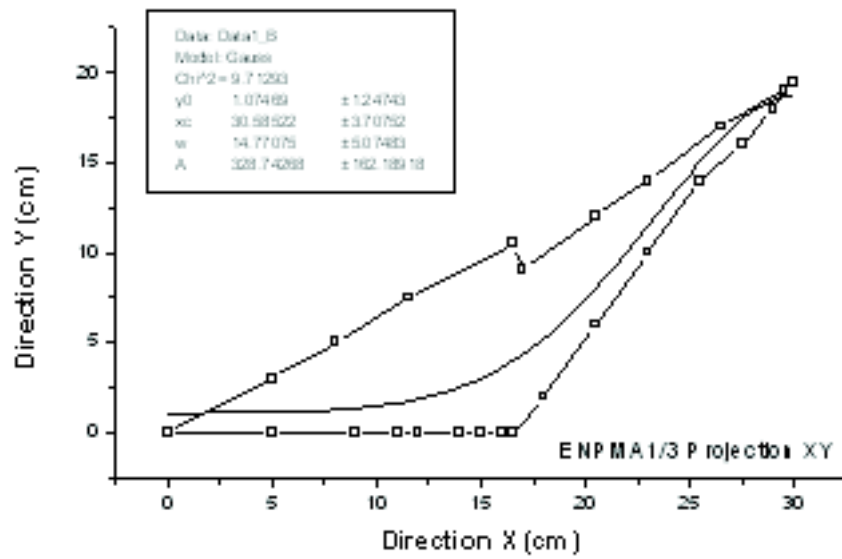


Fig.42 : Courbure moyenne suivant le plan XOY (ENPMA)

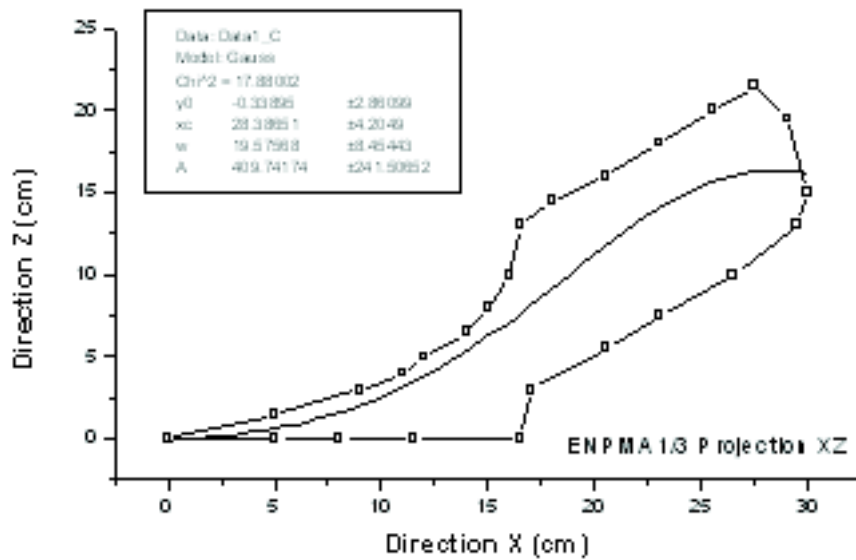


Fig.43 : Courbure moyenne suivant le plan XOZ (ENPMA)

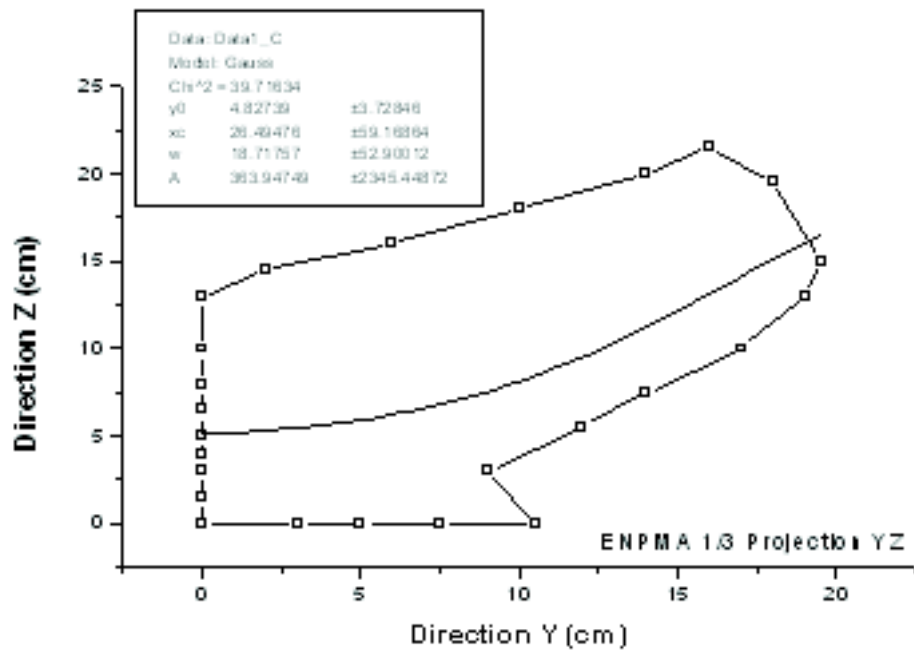


Fig.44 : Courbure moyenne suivant le plan YOZ (ENPMA)

Le modèle mathématique choisi, pour l'obtention de ces courbures moyennes des surfaces actives est celui de GAUSS, car il permet de voir le mode de distribution des points de la surface active avec plus de précision, et qui est de la forme :

$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} \cdot e^{-\frac{2(x-x_c)^2}{w^2}}$$

avec :

$y_0$  : ligne de base

$w$  :  $2 \cdot \sigma$  , approximativement 0.849 de la largeur de la courbe à mi-hauteur ( $\sigma$  écart type).

$A$  : Surface délimitée par la courbe et l'axe des abscisses.

$x$  : valeurs observées (suivant la direction de travail soit X ou Y selon la projection)

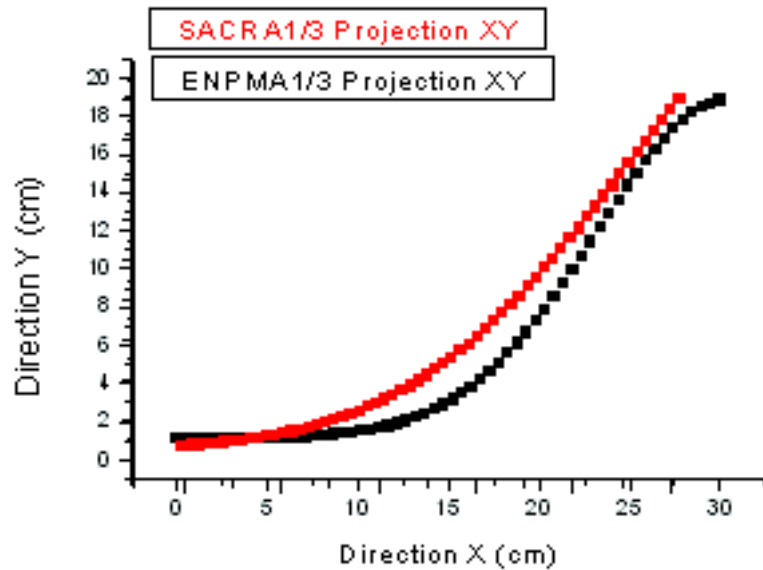
$x_c$ : valeur moyenne des valeurs observées.

Tableau 13 : valeurs des différents coefficients du modèle de Gauss

Forme	Projection	$Y_0$	$X_c$	$w$	$A$	Chi <sup>2</sup>
	XY	0,44	33,95	22,41	655,28	13,56
SACRA	XZ	0,28	25,64	18,84	310,69	20,25
	YZ	3,47	37,26	41,86	606,1	38,34
ENPMA	XY	1,07	30,58	14,77	328,74	9,71
	XZ	-0,33	28,38	19,57	409,74	17,88
	YZ	4,82	26,49	18,71	363,94	39,71

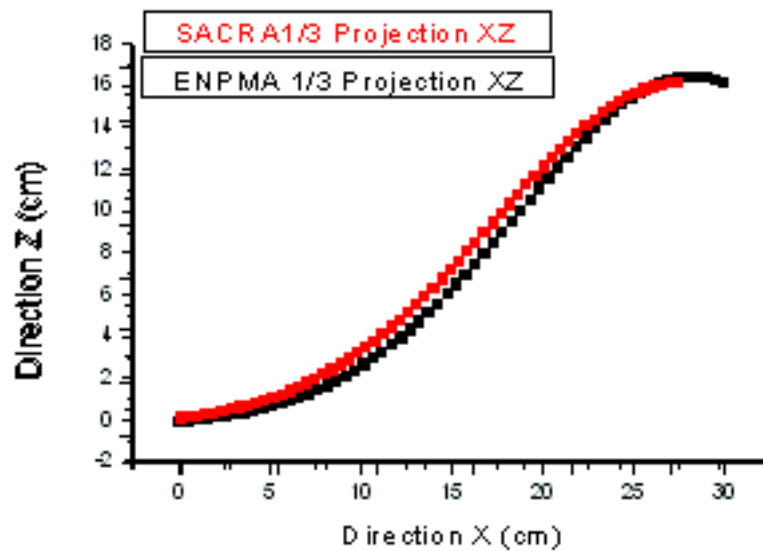


Ces représentations permettent de comparer avec plus de précision les courbures des surfaces actives des deux corps de charrue à socs et d'en déduire le comportement du sol pendant le travail. Cette analyse a permis l'obtention des courbes comparatives suivantes :

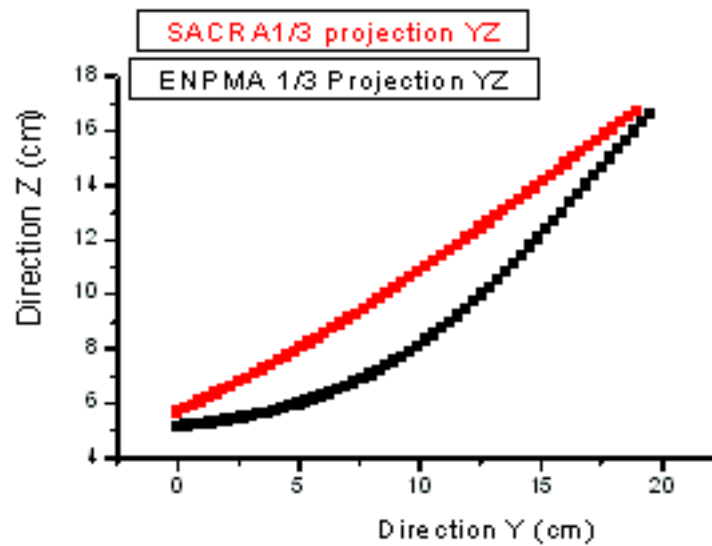


(a)

**Fig. 45 :** Comparaison des courbures des surfaces actives des deux Corps de charrue. ( a ) projection sur le plan XY, ( b ) projection sur le plan XZ et ( c ) projection sur le plan YZ



(b)



(c)

Ces représentations graphiques montrent que la bande de terre est plus sollicitée par la surface active du corps de charrue de forme ENPMA, notamment sur les plans XOY et XOZ. Sur le plan XOZ, C'est ce qui définit le retournement de la bande de terre qui devra être plus important sous l'action de la forme ENPMA. Les courbures sont relativement les mêmes pour les deux formes.

## 6.5. Etablissement des équations de surface des corps de charrue à socs à partir des coordonnées des contours

D'autres modèles plus complexes ont également été utilisés pour quantifier les surfaces actives des corps de charrue à socs. Pour cela l'utilisation d'un logiciel (TableCurve3D) plus performant a été nécessaire.

Les équations de surfaces utilisées sont de la forme  $z = f(x,y)$  les résultats sont consignés ci-dessous :

**SACRA : Echelle 1/3**

$$z = (a + b.x + c.y + d.y^2 + e.y^3) / (1 + fx + gy + hy^2 + iy^3) \text{ avec } R^2 = 0,928$$

Parameters	Values	Std Error	T Value	95% Conf Lim
a	0,5812	1,1332	0,5128	2,9721
b	0,1470	0,2315	0,6349	0,6354
c	-0,5951	1,3630	-0,4366	2,2806
d	0,0727	0,2291	0,3175	0,5561
e	-0,0032	0,0094	-0,3356	0,0167
f	-0,0586	0,0266	-2,2016	-0,0024
g	0,0218	0,1280	0,1702	0,2919
h	0,0023	0,0172	0,1349	0,0386
i	-0,0001	0,0007	-0,1952	0,0013

Tableau 14: valeurs des coefficients de l'équation de surface de SACRA 1/3

ENPMA : Echelle 1/3

$$Z = a + bx + c.y + d.x^2 + e.y^2 + fxy + g.x^3 + h.y^3 + ixy^3 + j.x^2.y$$

avec  $R^2 = 0,990$

Parameters	Values	Std Error	T Value	95% Conf Lim
a	-0,0729	0,6020	-0,1210	1,2034
b	0,9442	0,4612	2,0471	1,9219
c	-1,2120	0,7272	-1,6667	0,3295
d	-0,1430	0,0705	-2,0295	0,0064
e	0,1945	0,1849	1,0521	0,5865
f	0,0452	0,1907	0,2372	0,4494
g	0,0080	0,0027	2,9018	0,0138
h	-0,0085	0,0083	-1,0190	0,0092
i	-0,0013	0,0173	-0,0772	0,0352
j	-0,0056	0,0107	-0,5243	0,0171

Tableau 15: Valeurs des coefficients de l'équation de surface de ENPMA 1/3

Ces deux équations sont intéressantes car elles permettent de définir théoriquement tous les points des contours des surfaces actives. L'application de ces relations au cours de la conception, lors du découpage de la pièce brute avant formatage par pression de déformation, permettrait d'avoir des contours plus fins. La déformation du sol en sera plus uniforme, d'où réduction des forces parasites supplémentaires.

## 6.6. Equations de forme des deux surfaces actives

Après analyse et traitement statistique des coordonnées X, Y et Z des points des surfaces actives des deux corps de charrues, les équations  $Z = f(X)$  et  $Z = f(Y)$  ont été établies par régressions polynomiales. Ceci a permis la détermination des équations  $Z = f(X, Y)$  pour chacun des corps de charrues. Par une double intégration (surface) de ces équations, les modèles mathématiques des surfaces actives sont représentés par les équations suivantes :

Forme SACRA :

$$f(x, y) = 9,05.x.y + 21,76.\ln(1+\exp(-3.x + 4,5)) .y - 97,70.y + 0,03.x.y^2 + 0,036.x.y^2 + 0,005.x.y^4$$

Forme ENPMA :

$$f(x, y) = 4,13.x.y + 8,5.x.\exp(-6,25 / -89+25.\ln(x)) .y + 0,20.x.y^2 - 0,026.x.y^3$$

Dans ces équations, x, y et z représentent respectivement la profondeur, la largeur et la hauteur du corps de charrue. L'intérêt de cette méthode algébrique de quantification des surfaces, est intéressant car elle utilise les coordonnées des points des surfaces.

## 6.7. Comparaison des deux formes de surfaces actives

---

L'analyse de ces courbes montre clairement la différence des courbures des surfaces actives des deux corps de charrues à socs qui font l'objet de notre travail, en effet les rayons de courbures des surfaces sur les plans de projection, vertical- perpendiculaire à la direction d'avancement (yOz) et parallèle au fond de raie (xOy) sont légèrement plus grands pour la forme SACRA que pour la forme ENPMA. Cependant sur le plan vertical longitudinal la courbure des deux surfaces est sensiblement la même.

L'importance de cette analyse réside dans celle du déplacement de la bande de terre. Les courbes représentées ci-dessus peuvent être assimilées aux trajectoires moyennes que suivra le centre de gravité de la bande de terre labourée et d'en prévoir ainsi le comportement de celle-ci sous l'action de la forme du versoir.

Sur les figures précédentes (Fig.39 à 45), il est possible de mettre en évidence la trajectoire que suivra la bande de terre et les différentes sollicitations qu'elle subira, suivant les trois plans Ox, Oy ; Oy, Oz et Ox, Oz et d'en déduire ainsi le mode de déformation de la bande de terre.

Tenant compte des différents objectifs du labour, le retournement de la bande de terre, l'enfouissement des résidus végétaux ou l'emmagasinement de l'eau dans le sol, le concepteur de la forme du versoir agira sur ces courbures, soit en les accentuant ou en les réduisant pour atteindre l'un de ces objectifs prioritaires.

## 6.8. Réalisation des modèles réduits des deux corps de charrue

---

A partir des projections des surfaces des corps de charrue de dimensions réelles, et une réduction de ces projections à 1 / 4 , 1 / 3 et 1 / 2 , des moules ont été réalisés. A partir de ces derniers des modèles réduits ont été réalisés au niveau de l'entreprise ENPMA de Rouiba. Ces modèles sont représentés sur les figures suivantes:



*Fig.46 : Modèles réduits à l'échelle 1 / 4*



*Fig.47 : Modèles réduits à l'échelle 1 / 3*



*Fig.48 : Modèles réduits à l'échelle 1 / 2*



*Fig.49 : Moules des surfaces actives des deux corps de charrue à l'échelle 1/ 4*

## **Chapitre 7. Modélisation de la surface active des versoirs par les courbes paramétriques cubiques de Bézier.**

### **7.1. Objectifs**

La quantification et la caractérisation de la forme de la surface active d'un versoir ont un intérêt pratique pour le concepteur qui doit réaliser une surface permettant à l'agriculteur d'obtenir ou tout au moins approcher les objectifs agronomiques escomptés lors de la première opération de la préparation du sol (voir un bon retournement de la terre, un bon enfouissement des résidus de récoltes et enfin une bonne régénération de la structure du



sol) sans pour autant négliger le coté énergétique. La forme à concevoir doit permettre en effet une consommation d'énergie la plus faible possible. A cet effet l'analyse des surfaces actives et plus particulièrement leurs quantifications deviennent nécessaires. Pour cela plusieurs méthodes sont possibles.

## 7.2. Méthodes de quantification des surfaces actives

---

Les travaux de recherches réalisés sur la caractérisation et l'identification des différentes formes de versoirs, peuvent être classés suivant deux visions:

**7.2.1. La première vision qui repose sur la méthode empirique classique, consiste à mesurer les coordonnées des différents points de la surface active du corps de charrue plus particulièrement ceux du contour de la surface. Cette méthode permet la caractérisation des surfaces par des projections sur les trois plans de travail.**

L'efficacité de cette méthode a été améliorée ultérieurement par l'utilisation des techniques optiques qui consistent à utiliser les propriétés de réflexion de rayons lumineux sur la surface active de l'outil, cette technique nécessite la préparation de la surface par un revêtement permettant la réflexion. (Ravonison et Destain, 1994).

**7.2.2. La deuxième vision est celle utilisant, à travers les résultats de la première vision, les modèles mathématiques pouvant décrire les différentes formes des surfaces actives des outils aratoires. White (1918), cité par Ravonison et Destain, (1994), a utilisé des paraboles hyperboliques pour représenter les différentes formes de versoirs.**

Nichols et Kummer (1932), ont proposé la définition de toute la surface active du corps de charrue, par le déplacement d'un arc de cercle, le long de la ligne allant de la pointe du soc à l'extrémité du versoir.

### 7.2.3. Autres méthodes

Actuellement des techniques de calcul plus précises et plus performantes sont possibles en utilisant les possibilités graphiques 3D des outils informatiques. Ces techniques sont basées sur l'utilisation des équations paramétriques qui permettent la modélisation complète de la forme des outils telles que les surfaces actives des corps de charrue à socs.

A l'état actuel des recherches avec les possibilités que nous offrent les moyens informatiques, la méthode qui nous semble la plus appropriée pour l'analyse et l'amélioration de la forme des surfaces actives gauches des outils aratoires comme celles des corps de charrues à socs, est la méthode des courbes de Bezier.

## 7.3. Rappel sur la notion de courbes de Bezier :

---

Les courbes de Bezier sont largement utilisées dans les logiciels de graphiques pour produire des formes de contours par lissage. Ces courbes sont également employées principalement dans la fabrication, particulièrement dans l'industrie mécanique.

Les segments de courbe sont déterminés par les deux points finaux, (a, b) et (c, d) et un troisième point (u, v), a, appelé une ancre, qui contrôle la forme du segment de courbe.

Les équations paramétriques définissant les coordonnées x et y sont :

$$x(t) = (a - 2u + c) t^2 - 2(a - u) t + a$$

$$y(t) = (b - 2v + d) t^2 - 2(b - v) t + b$$

Pour la compréhension des courbes de Bezier, prenons l'exemple suivant :

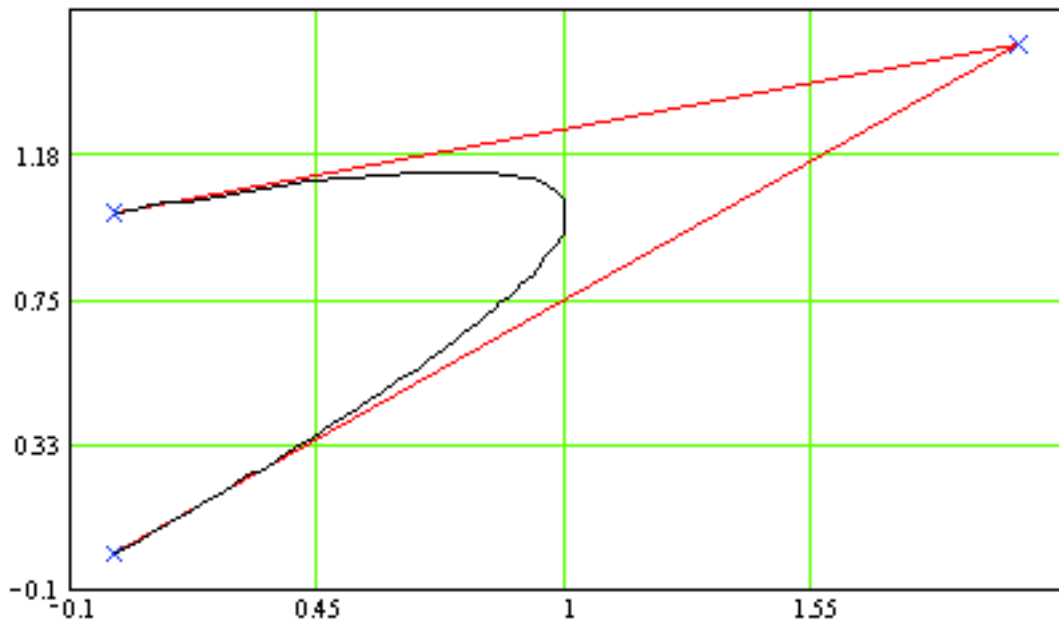
Soit, la série de couples de points (x, y) : (0, 0) ; (2, 1.5) et (0, 1) en traçant la représentation graphique nous aurons une ligne brisée ; en appliquant la méthode de Bézier, nous pourrions lisser cette ligne en la transformant en une ligne courbe correspondante (fig. 50).

Cette méthode permet d'arrondir la partie angulaire de coordonnée (2,1.5) qui correspond au couple (u, v) définissant ce que l'on appelle le point d'ancrage.

Donc si :  $u = 2$  et  $v = 1.5$  et  $(a, b) = (0,0)$  et  $(c, d) = (0,1)$  avec  $t =$  nombre d'itérations dans notre cas ce nombre est égal à  $100$   $t = 0.01 \dots 1$ , nous aurons les valeurs de variation de  $x(t)$  et de  $y(t)$ , ce nombre de valeurs est de 100. Nous aurons donc 100 couples de point (x,y) qui permettent de tracer la ligne courbe. Ces couples sont équivalents à :  $(-4 t^2 + 4 t, -2 t^2 + 3 t)$  c'est à dire :

$$x(t) = (-4 t^2 + 4 t)$$

$$y(t) = (-2 t^2 + 3 t)$$



**Fig.50** : Méthode de tracé des courbes de Bezier

Enfin cette méthode permet de corriger la forme des contours et donc des caractéristiques des surfaces actives des outils aratoires, la précision de cette méthode réside dans le nombre d'itérations prises entre deux valeurs consécutives.

En appliquant cette méthode aux surfaces actives des corps de charrues à socs nous obtenons les contours suivants en relation avec les différents plans de projections ou plans de travail du corps de charrue.



Les courbures des contours obtenus permettent de quantifier et de rectifier les surfaces actives pour une amélioration des indices qualitatifs et une optimisation des besoins en énergie lors des labours.

## 7.4. Projections des contours par la méthode des courbes de Bezier

Cette méthode permet l'optimisation de la forme du contour de la surface active des corps de charrues à socs.

### 7.4.1. Tracé du contour de la forme SACRA (Echelle 1/3)

En appliquant cette méthode pour les surfaces actives des corps de charrues étudiés d'échelle 1/3 nous obtenons les surfaces projetées suivantes : (les coordonnées des contours ont été obtenues avec le profilographe).

<b>x</b>	0	2,5	8	10,5	12	13	15,5	16,8	18,5	19,5	20,5	21,5	22,5
<b>y</b>	0	0	0	0	0	0	2	4	6	8	10	12	14
<b>z</b>	0	2	4	6	8	10	12	14	15	15,5	16	16	16
<b>x</b>	23,5	25	25,5	24,5	23,5	21,5	19,5	17,5	15	14,5	14	7	0
<b>y</b>	16	18	19	17	16	14	11,5	11	12	12	14	7	0
<b>z</b>	16	15,5	14	10	8	6	4	3	2	2	0	0	0

Tableau 16 : valeurs des coordonnées des points du contour SACRA 1/3

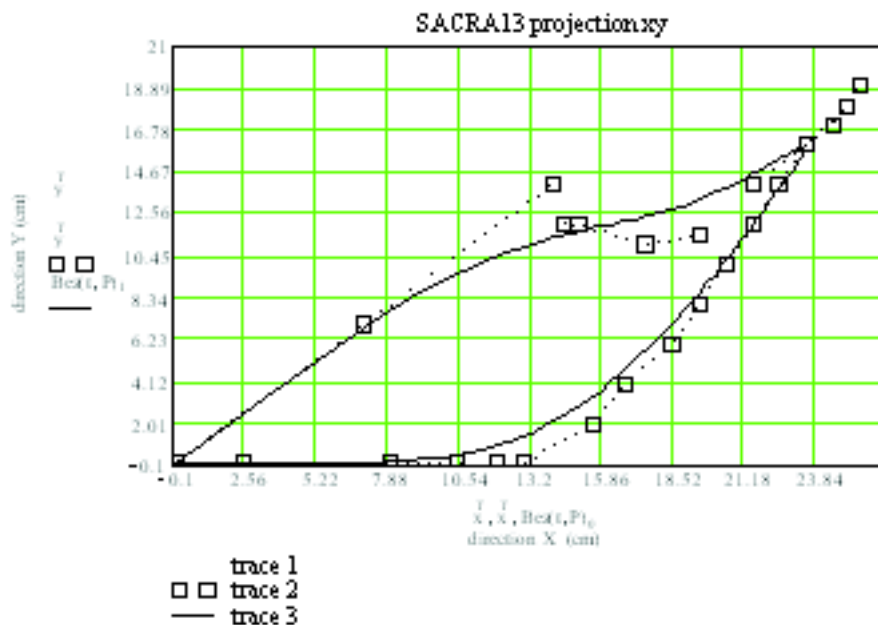


Fig. 51 : Projection sur le plan XOY du contour par la méthode de Bezier- SACRA

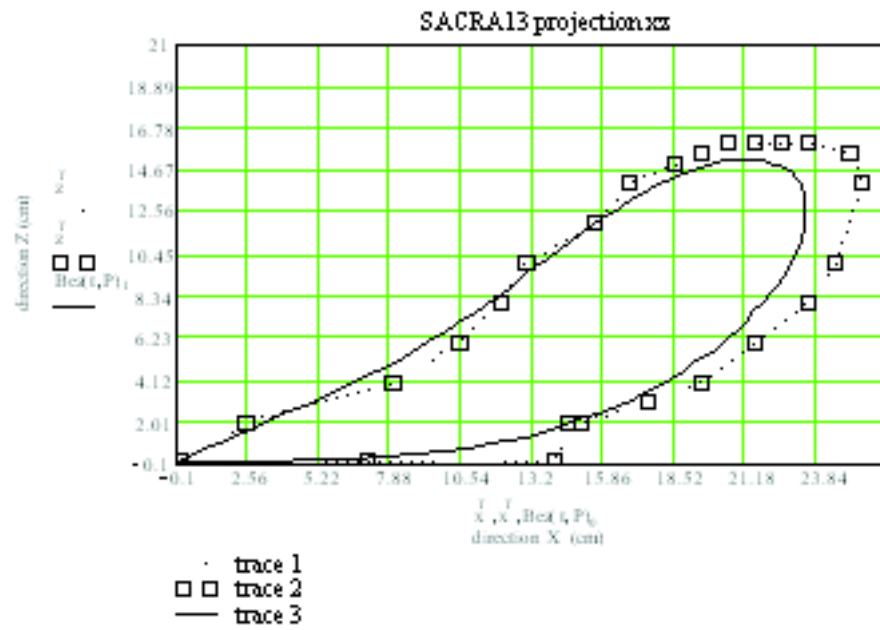


Fig. 52 : Projection sur le plan XOZ du contour par la méthode de Bezier- SACRA

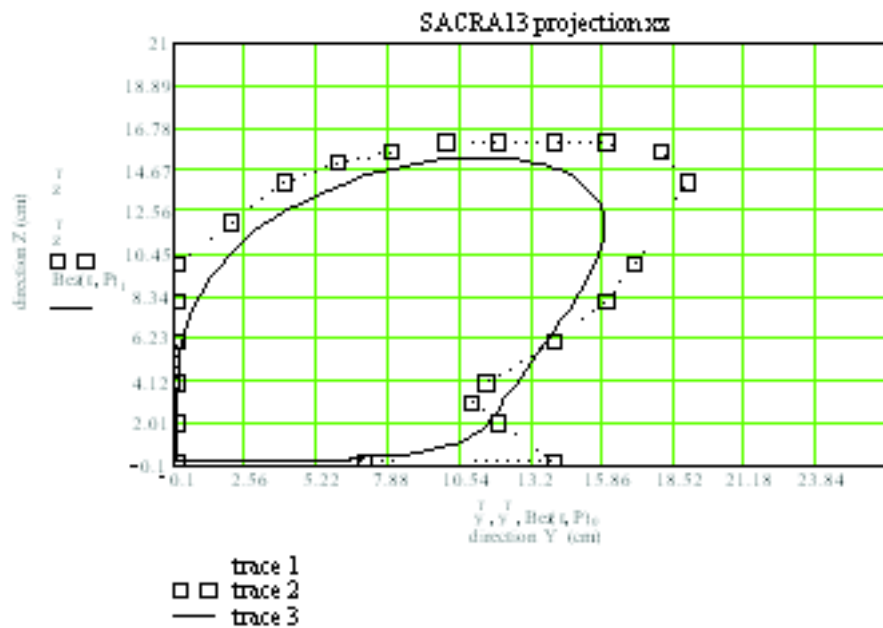


Fig. 53 : Projection sur le plan YOZ du contour par la méthode de Bezier- SACRA

#### 7.4.2. Tracé du contour de la forme ENPMA (Echelle 1/3)

<b>x</b>	0	5	9	11	12	14	15	16	16,5	18	20,5	23	25,5
<b>y</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	6	10	14
<b>z</b>	0	1,5	3	4	5	6,5	8	10	13	14,5	16	18	20
<b>x</b>	27,5	29	30	29,5	26,5	23	20,5	17	16,5	11,5	8	5	0
<b>y</b>	16	18	19,5	19	17	14	12	9	10,5	7,5	5	3	0
<b>z</b>	21,5	19,5	15	13	10	7,5	5,5	3	0	0	0	0	0

Tableau 17 : Valeurs des coordonnées des points du contour ENPMA 1/3

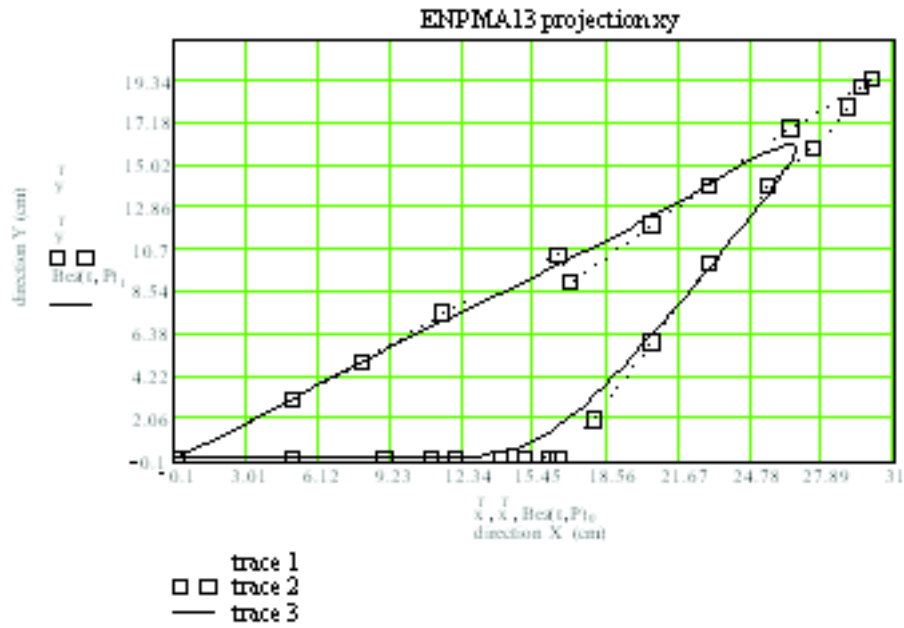


Fig. 54 : Projection sur le plan XOY du contour par la méthode de Bezier-

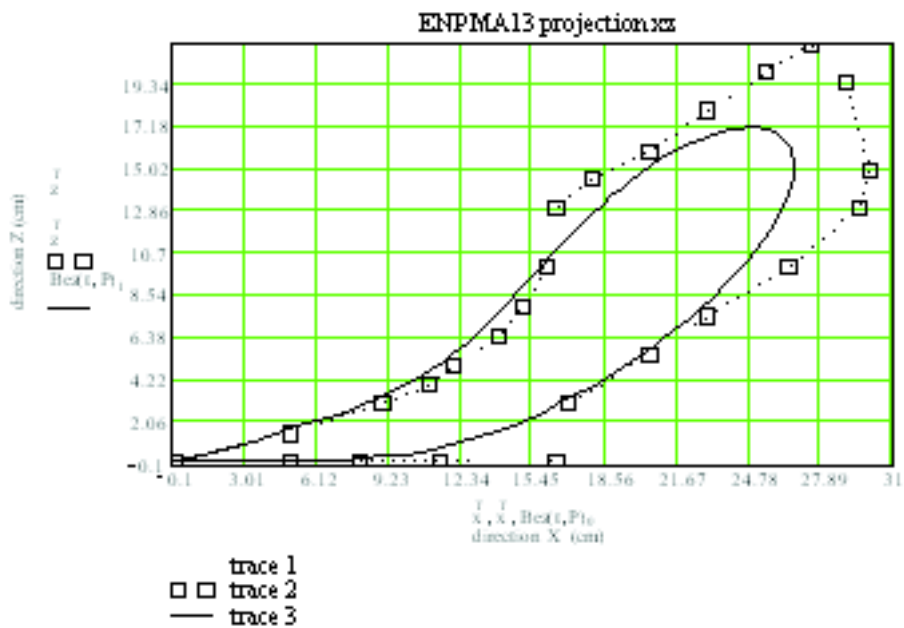


Fig. 55 : Projection sur le plan XOZ du contour par la méthode de Bezier- ENPMA

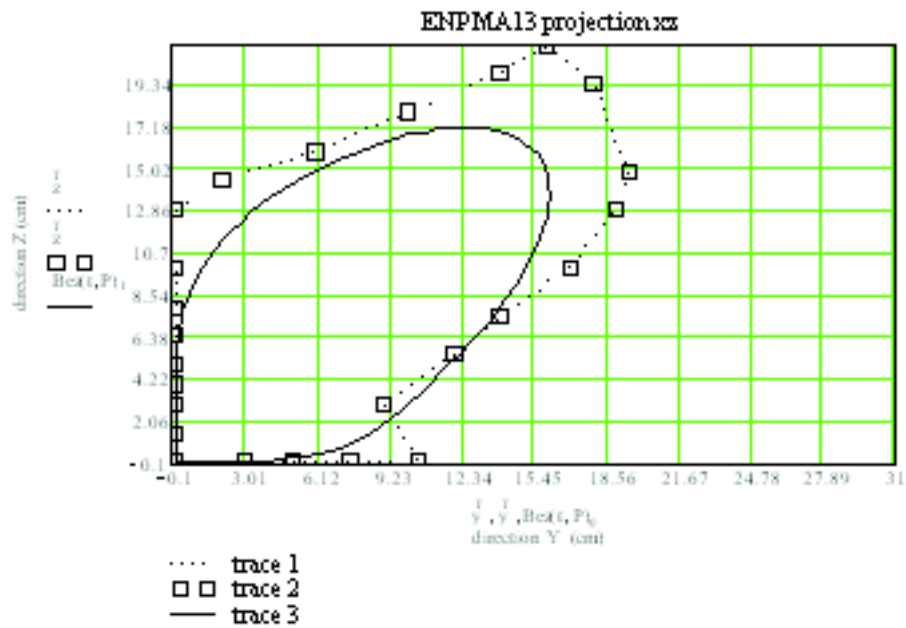


Fig. 56 : Projection sur le plan XOZ du contour par la méthode de Bezier- ENPMA

Les surfaces comprises entre les contours de Bezier, sont celles qui sont le plus sollicitées par la bande de terre travaillée. Le centre géométrique de ces surfaces peut être assimilé au centre de pression de la bande de terre sur la surface active du corps de charrue. La position de ce point est intéressant à connaître pour plusieurs raisons : la plus importante est celle relative au basculement ou au retournement de la bande de terre, en effet plus ce point est haut par rapport au centre de gravité (G) de la bande de terre, plus facile sera le mouvement de pivotement de la bande de terre par rapport à la partie affûtée du soc ou du fond de raie. Ceci pourrait être illustré par le schéma suivant :

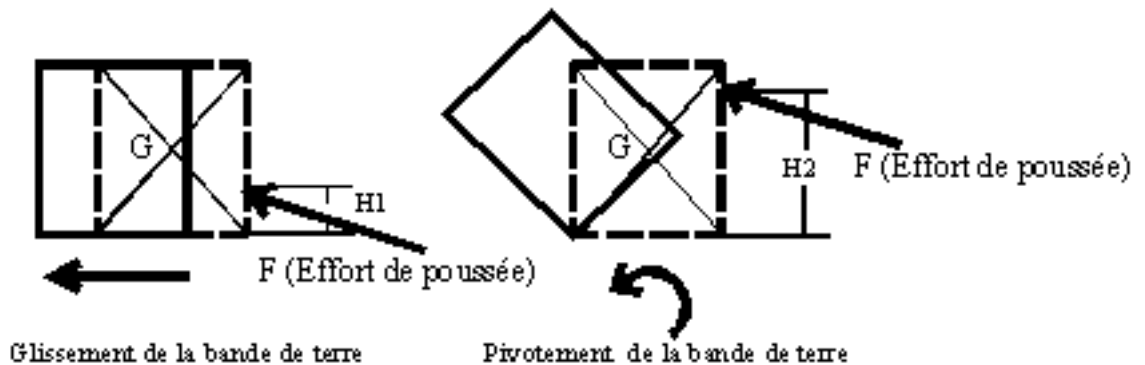


Fig. 57 : Position du point d'application de l'effort de pression de la surface active par rapport au centre de gravité de la bande de terre

L'analyse de la hauteur du centre de pression de la surface active du corps de charrue, défini par ses coordonnées déterminées ci-dessous, permettra de concevoir la forme du corps de charrue en relation avec la profondeur de labour désirée et les caractéristiques physiques du sol. Cela permettra aussi de définir le rapport ( $\rho$ ) entre la largeur et la profondeur de travail du corps de charrue pour qu'il y ai retournement de la bande de terre.

Théoriquement le labour consiste à découper une bande de terre de forme parallélépipédique de section transversale à la direction d'avancement et de dimensions a

x b avec a : la profondeur de travail et b : la largeur de travail. Une fois cette bande de terre découpée, elle sera renversée avec un angle

$$\delta = \arcsin \left( \frac{a}{b} \right)$$

(Kanafojski, 1967) tel que montré ci-dessous :

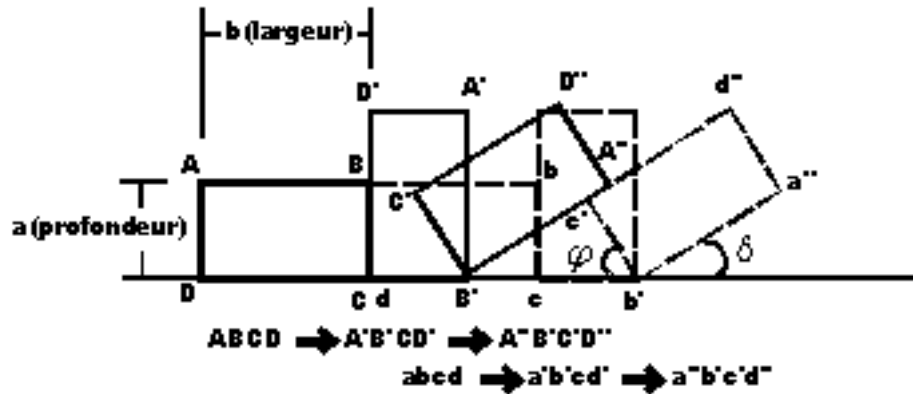
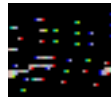


Fig. 58 : Déplacement théorique de deux bandes de terre ABCD et abcd

Hémin (1960), par contre, suppose que la bande de terre labourée pivote autour de la charnière C avec un angle de 90 degrés de la position ABCD à la position A' B' C D' , la bande de terre continue son mouvement de rotation autour de B' nouvelle charnière avec un angle de  $\varphi$  et prend sa position finale A'' B' C' D'' .sous un angle d'inclinaison de la couche superficielle A'' B' par rapport à l'horizontale.

Hémin propose un coefficient de stabilité ou de renversement égal au rapport de la profondeur de labour sur la largeur de travail et le note :



Cette cinématique dépend de la position du centre de gravité de la bande de terre et de celui de la surface active du corps de charrue à partir duquel agit la force de poussée qui est à l'équilibre égale à la force de résistance à la traction en sens opposé.

## 7.5. Détermination des caractéristiques mécaniques des surfaces actives.

Les caractéristiques, surfaces et coordonnées des centres de gravités, des surfaces actives projetées des corps de charrue obtenues à l'aide du logiciel AutoCAD, sont consignées dans le tableau et les figures suivantes (les valeurs des surfaces sont données en mm<sup>2</sup>) :

Projections	ENPMA Réel	ENPMA	SACRA Réel	SACRA
XY	10717,163	9756,057	13221,182	11936,635
XZ	12652,524	8731,034	15051,921	12316,757
YZ	17123,233	12467,459	19979,244	16075,504

Tableau 18 : Valeurs de Surfaces projetées pour les contours réels et de

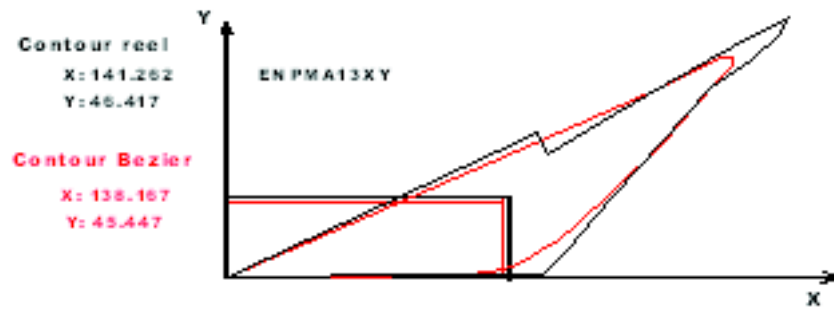
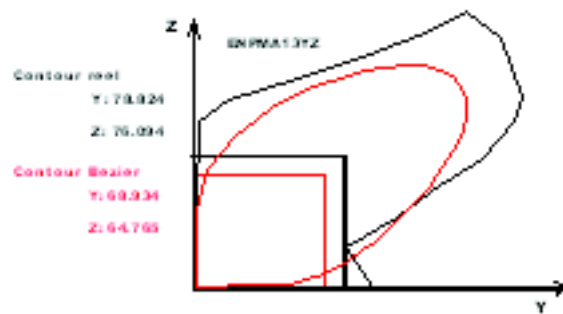
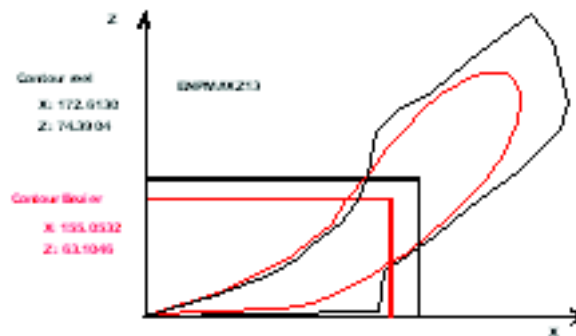


Fig. 59 : Position des centres de gravité des surfaces projetées ENPMA pour les contours réels et les contours de Bezier

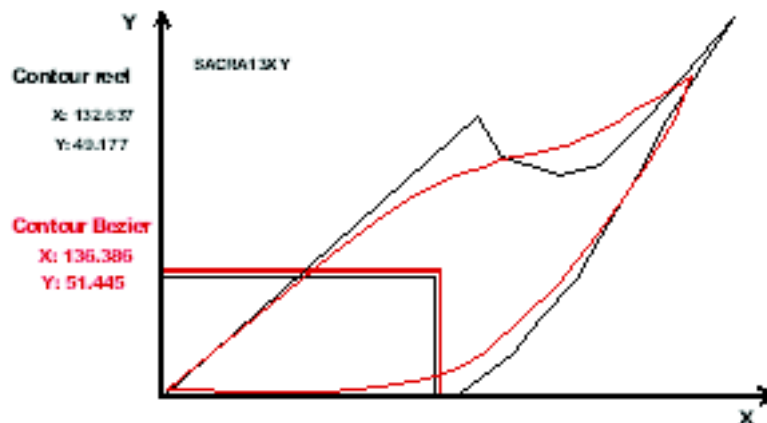
(a) : projection XOY



(b) : projection YOZ

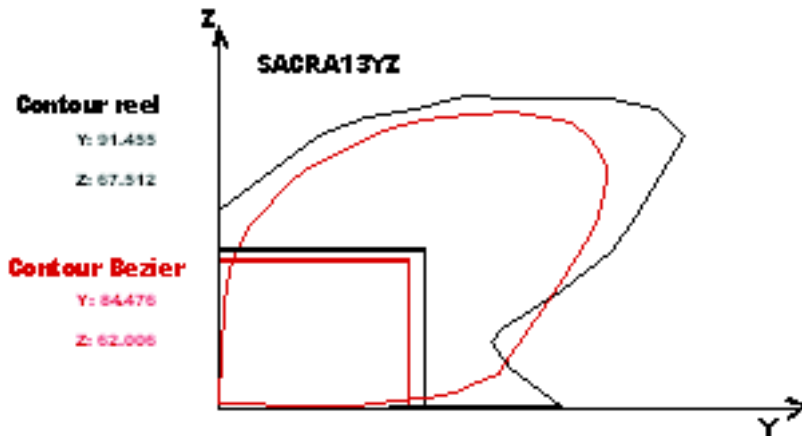


(c) : projection XOZ



**Fig. 60 (a, b et c) : Position des centres de gravité des surfaces projetées SACRA pour les contours réels et les contours de Bezier**

(a) : projection XOY



(b) : projection YOZ



(c) : projection XOZ

L'analyse des coordonnées des centres de gravités des surfaces projetées permet de déterminer ceux des centres de gravités des surfaces actives, pour cela nous prendrons les valeurs médianes des différentes coordonnées, ce qui donne les résultats suivants :

	Projection	xy	xz	yz	CDG Surface
<b>Forme ENPMA</b>	<b>x</b>	141,263	172,613	0	<b>156,938</b>
	<b>y</b>	46,418	0	288,824	<b>167,621</b>
	<b>z</b>	0	74,390	206,094	<b>140,242</b>
	Projection	xy	xz	yz	CDG Surface
<b>Forme SACRA</b>	<b>x</b>	131,905	171,344	0	<b>151,624</b>
	<b>y</b>	48,031	0	91,456	<b>69,743</b>
	<b>z</b>	0	58,044	67,512	<b>62,778</b>

Les valeurs sont données en (mm)

**Tableau 19 : Centre de gravité (CDG) pour les surfaces projetées à contours réels**

	Projection	xy	xz	yz	CDG Surface
<b>Forme</b>	<b>x</b>	138,168	155,053	0	<b>146,610</b>
<b>ENPMA</b>	<b>y</b>	45,448	0	278,934	<b>162,191</b>
	<b>z</b>	0	63,105	194,765	<b>128,935</b>
	Projection	xy	xz	yz	CDG Surface
<b>Forme</b>	<b>x</b>	135,655	158,599	0	<b>147,127</b>
<b>SACRA</b>	<b>y</b>	50,299	0	84,476	<b>67,387</b>
	<b>z</b>	0	55,144	62,007	<b>58,575</b>

Les valeurs sont données en (mm)

**Tableau 20** : Centre de gravité (CDG) pour les surfaces projetées à contours Bezier

L'analyse de ces valeurs montre que la position du centre de gravité de la surface active de la forme SACRA (151,624 ; 69,743 ; 62,778) se situe à une position plus basse que celle du centre de gravité de la forme ENPMA (156,938 ; 167,621 ; 140,242) pour le contour réel et SACRA (147,127 ; 67,387 ; 58,575) et ENPMA (146,610 ; 162,191 ; 128,935). Cette différence de position a un effet sur les indices qualitatifs et énergétiques.

Il est également à remarquer que les surfaces projetées sur les plans de travail de la forme SACRA sont plus importantes que celles de la forme ENPMA. Cependant la surface active totale développée (tableau 21) de la forme ENPMA est plus importante (39725 mm<sup>2</sup>), ceci confirme que la courbure de la forme SACRA est plus importante.

	Ech1/2	Ech1/3	Ech1/4
<b>SACRA</b>	50350	33950	13050
<b>ENPMA</b>	60650	39725	16550

**Tableau 21** : Surfaces développées des deux formes et pour chaque échelle (mm<sup>2</sup>)

La détermination des coordonnées du centre de gravité de la surface active serait utile pour le concepteur des corps de charrue, cela permettrait de positionner correctement la pièce brute sur la presse et d'appliquer la force de pression sur le centre de gravité pour donner la forme convenable à la surface active.

Cette différence de position des centres de gravités des surfaces actives et de la différence des directions moyennes qu'offrent celles-ci à la bande de terre sont à l'origine de la déformation de la bande de terre travaillée, ceci fera l'objet du chapitre suivant qui porte sur l'effet de la forme des versoirs et des conditions de travail sur les indices qualitatifs des labours.

## **7.6. Analyse de l'effet de la position du centre de gravité de la surface active sur le comportement de la bande de terre.**

Pour montrer l'importance de la position du centre de gravité de la surface active du corps de charrue sur le comportement et la déformation de la bande de terre, une analyse théorique par simulation de l'effet de la force d'action du corps de charrue et de la position de celle-ci sur de la bande de terre a été réalisée.

### **7.6.1. Analyse théorique de l'effet de la position du point d'application de l'effort sur le comportement d'une bande de terre.**

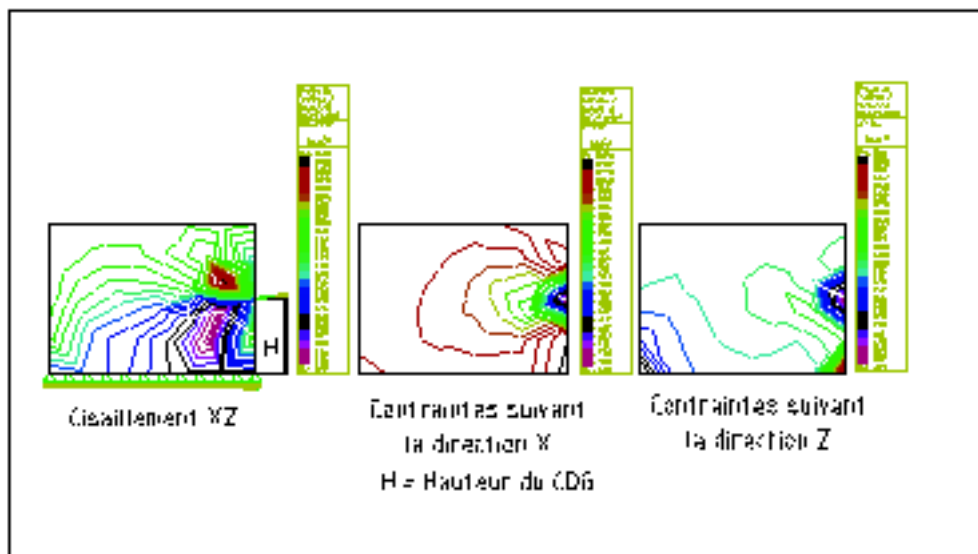


### 7.6.1.1. Méthodologie et résultats de l'essai théorique

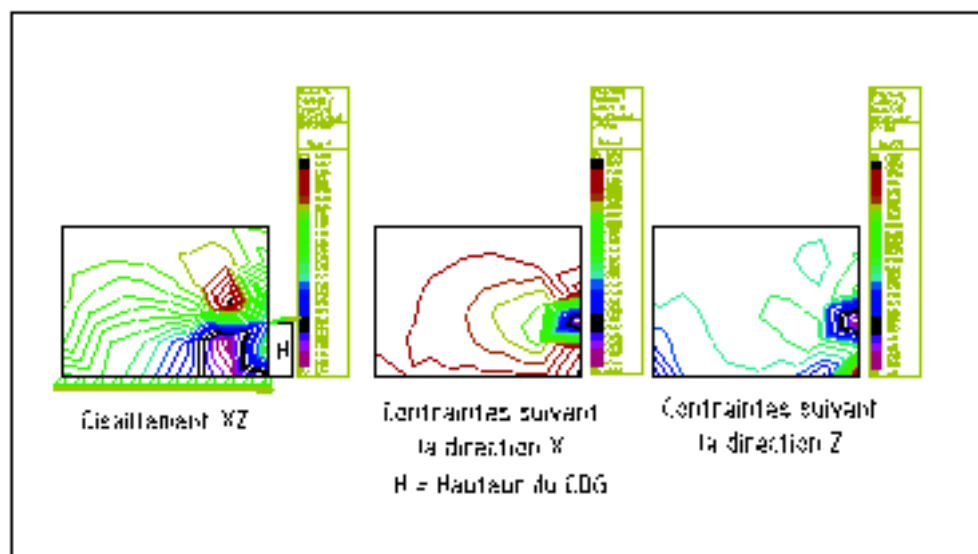
La bande de terre est assimilée à un parallélépipède vu latéralement suivant le plan vertical parallèle à la direction d'avancement. Celle-ci est sollicitée par un effort à deux niveaux différents correspondant aux positions du centre de gravité (cdg) en position normale pour les surfaces non optimisées et en position plus basse correspondant aux surfaces optimisées des corps de charrue à socs. Pour cela l'utilisation du module de l'analyse par la méthode des éléments finis du comportement des matériaux du logiciel Auto CAD a été nécessaire.

Deux cas ont été utilisés, le premier lorsque la bande de terre est fixée sur sa partie inférieure ; le deuxième cas, la bande de terre est fixée sur deux cotés.

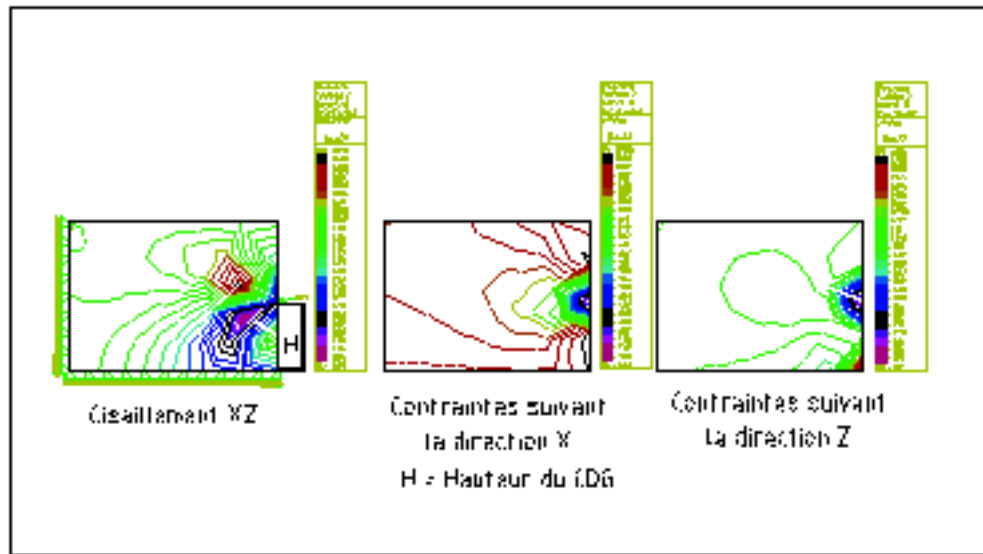
Les résultats de l'analyse de la variation des contraintes subies par la bande de terre sont illustrés par les figures suivantes (fig. 61 à 67).



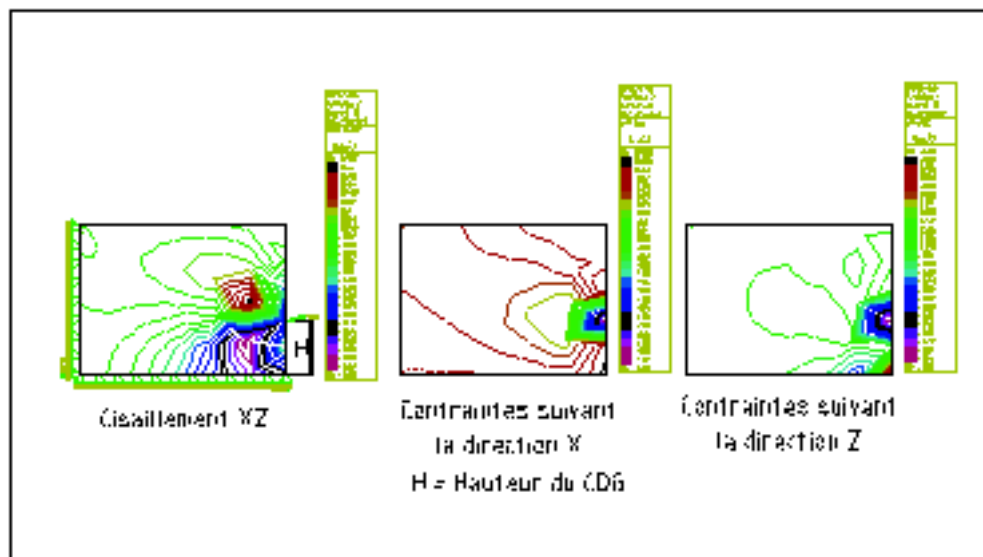
*Fig.61 : Contraintes du sol pour la position haute du centre de gravité avant optimisation, bande de terre fixée sur un coté*



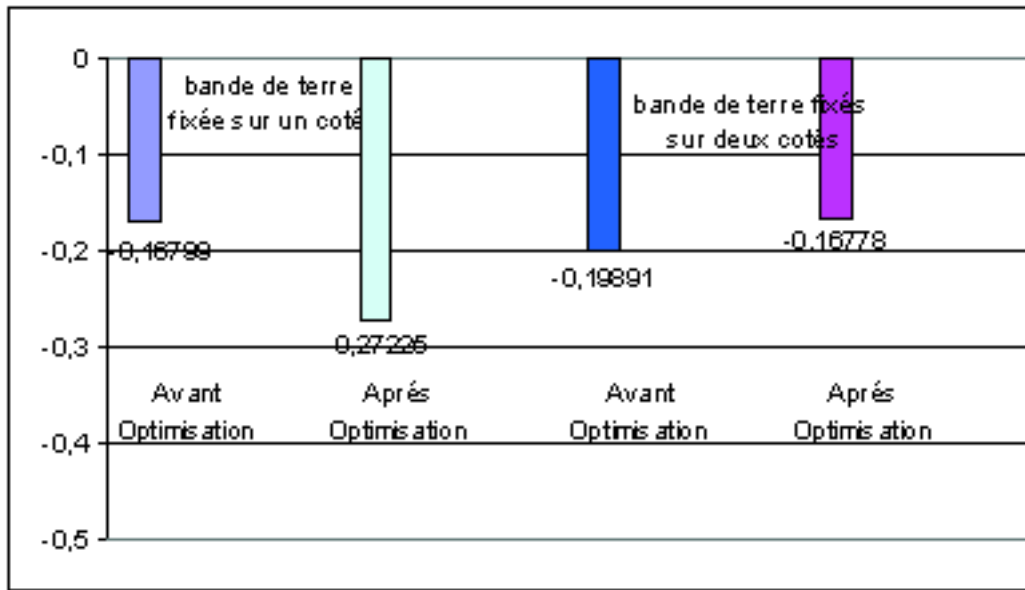
**Fig.62** : Contraintes du sol pour la position basse du centre de gravité après optimisation, bande de terre fixée sur un côté



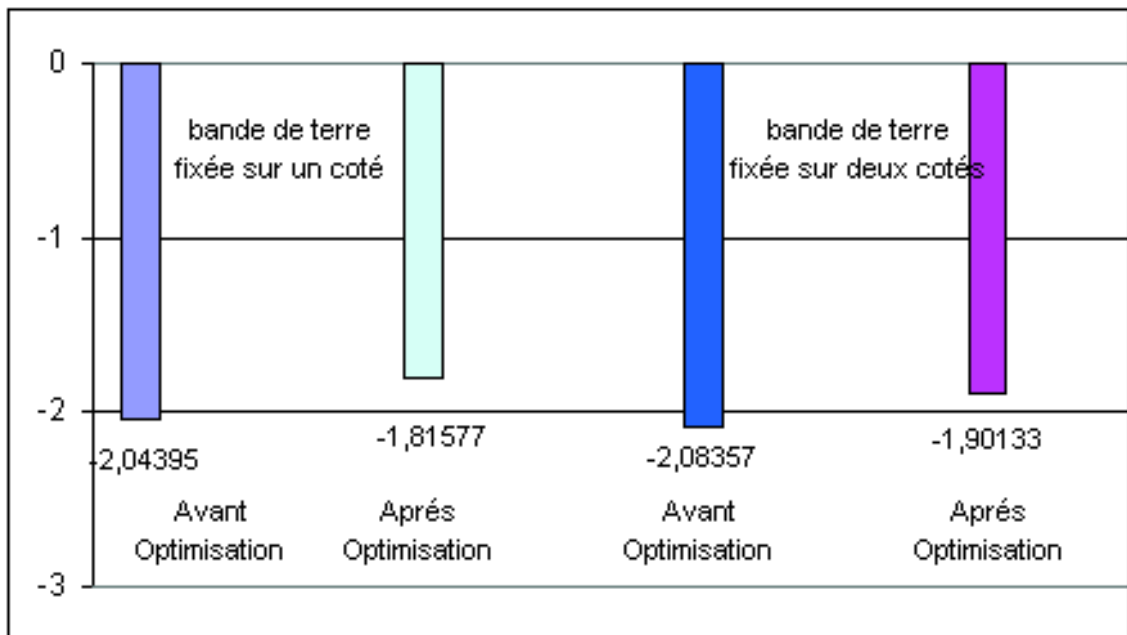
**Fig.63** : Contraintes du sol pour la position haute du centre de gravité avant optimisation, bande de terre fixée sur deux côtés



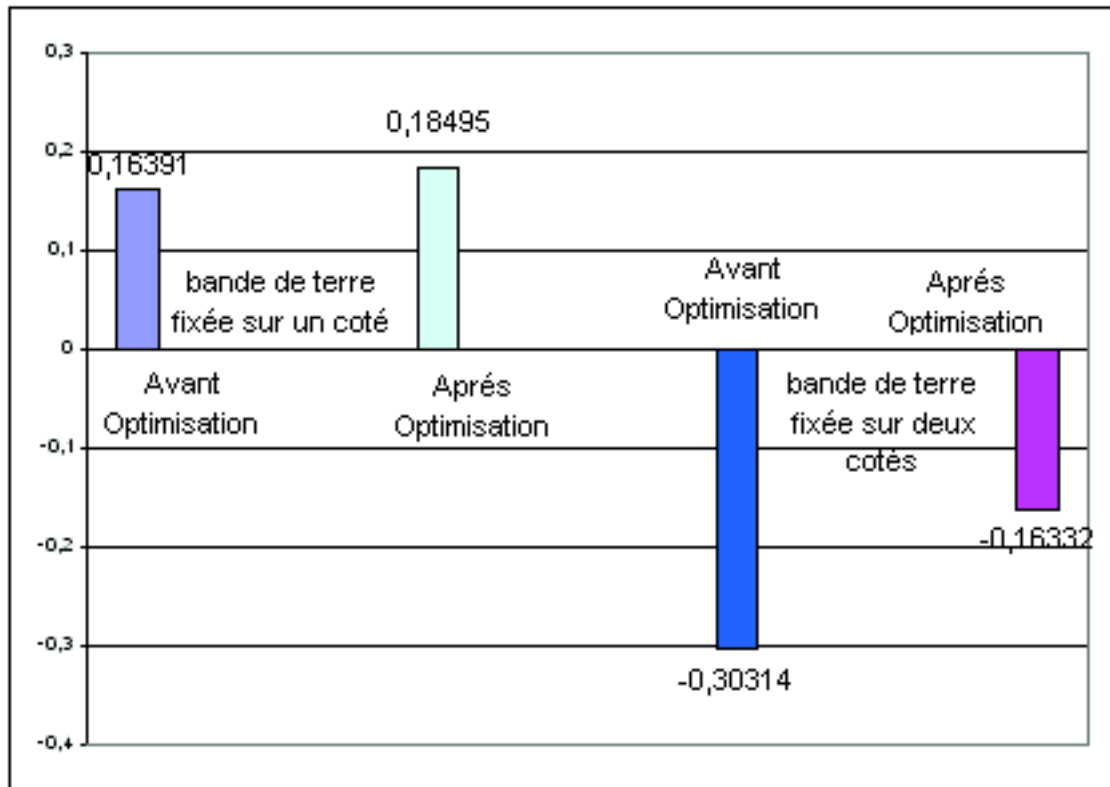
**Fig.64** : Contraintes du sol pour la position basse du centre de gravité après optimisation, bande de terre fixée sur deux côtés



**Fig 65** : Variation de la contrainte de cisaillement  $\tau$  de la bande de terre, sous l'effet d'un effort appliqué suivant la position du centre de gravité de la surface active.



**Fig 66** : Variation de la contrainte normale  $\sigma$  suivant la direction de travail de la bande de terre, sous l'effet d'un effort appliqué suivant la position du centre de gravité de la surface active.



**Fig. 67 :** Variation de la contrainte normale  $\sigma$  suivant la direction verticale de la bande de terre, sous l'effet d'un effort appliqué suivant la position du centre de gravité de la surface active.

### 7.6.1.2. Interprétations et conclusion

Les figures 61, 62, 63 et 64 sur les pages précédentes, montrent les variations des contraintes de cisaillement  $\tau$  et des contraintes normales  $\sigma$  que subirait la bande de terre suivant le plan de travail vertical-longitudinal sous l'action d'un effort de 2000 Newtons avant et après optimisation de la surfaces active d'un corps de charrue à socs.

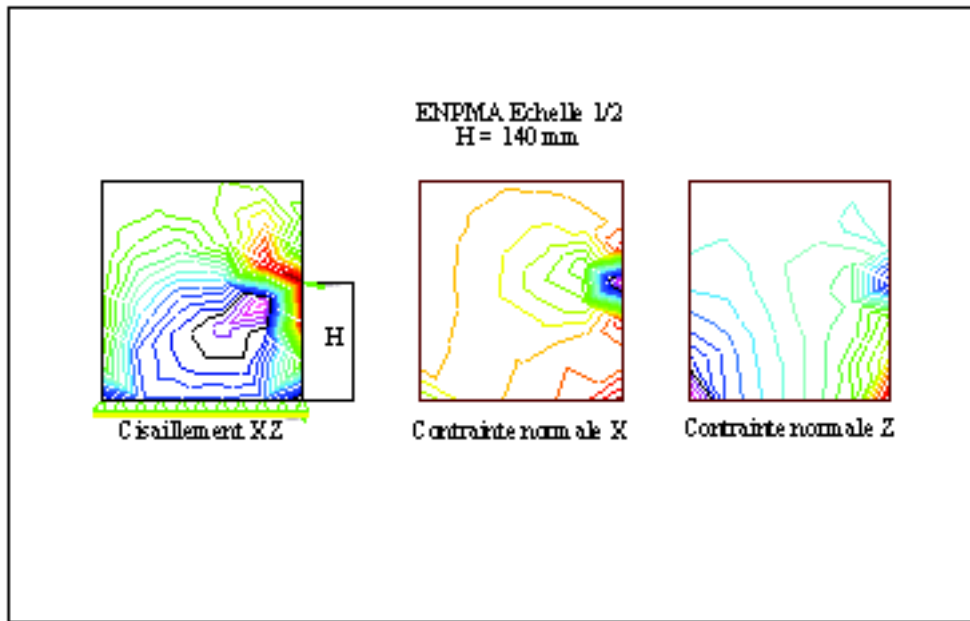
Les figures 65, 66 et 67 montrent la variation des contraintes moyennes dans deux cas, le premier quand la bande de terre est fixée sur un seul côté, celui du fond de raie du labour, le deuxième cas est celui où la bande de terre est fixée sur deux cotés comme mentionné sur les figures précédentes.

L'analyse de ces différentes représentations montre clairement que la position du point d'application de l'effort sur la bande de terre par rapport à son centre de gravité a un effet sur les valeurs des contraintes et donc sur la déformation de la bande de terre.

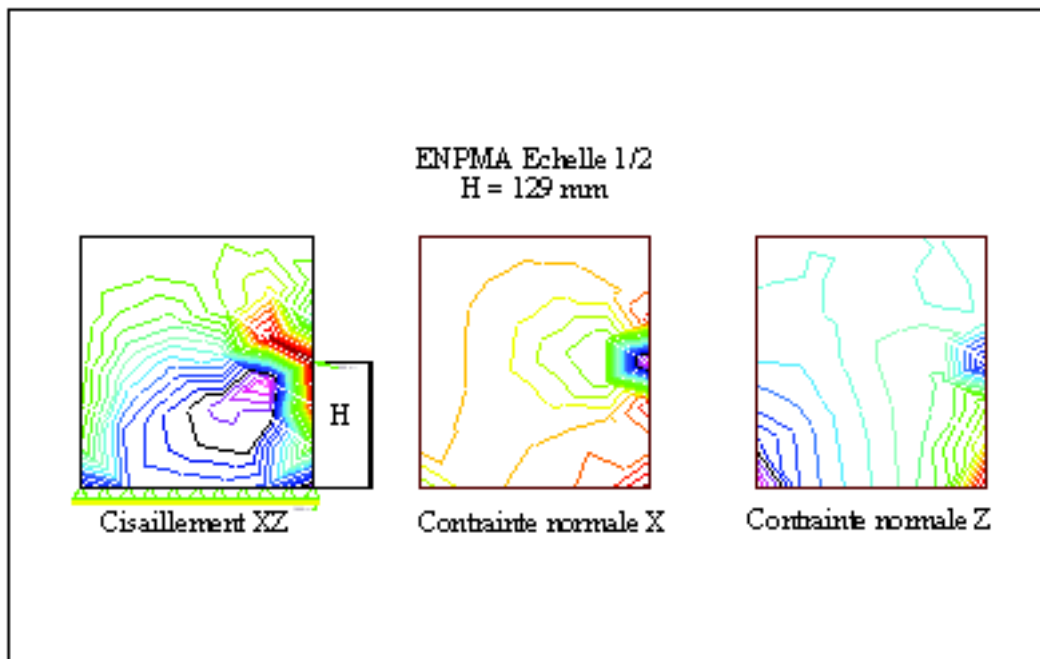
Dans ce qui suit, cette méthode est utilisée pour analyser l'effet de la position du centre de gravité avant et après optimisation de la surface active des corps de charrues ENPMA et SACRA sur le comportement mécanique de la bande de terre. Les résultats sont illustrés par les figures ci-dessous.

### 7.6.2. Application pour les surfaces actives réelles des corps de charrue

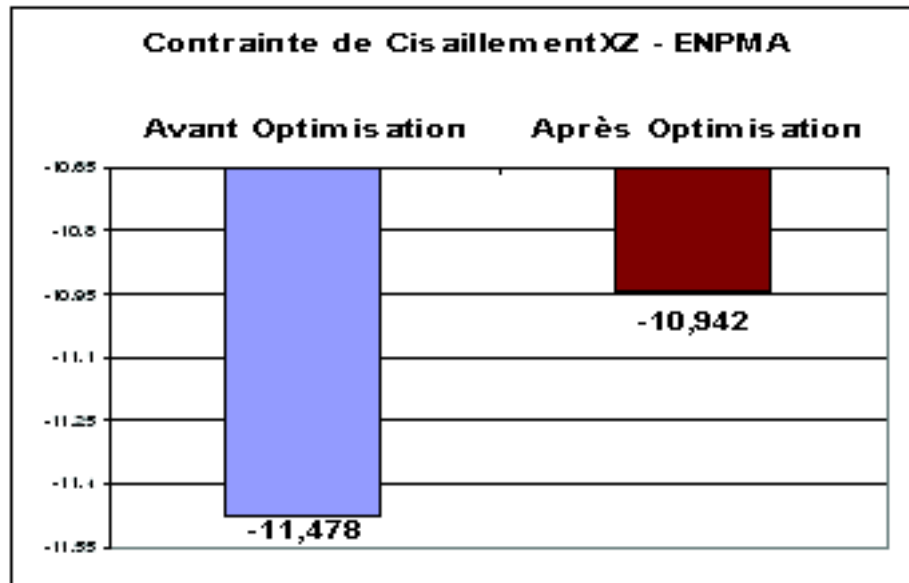
#### 7.6.2.1. Cas de la forme ENPMA



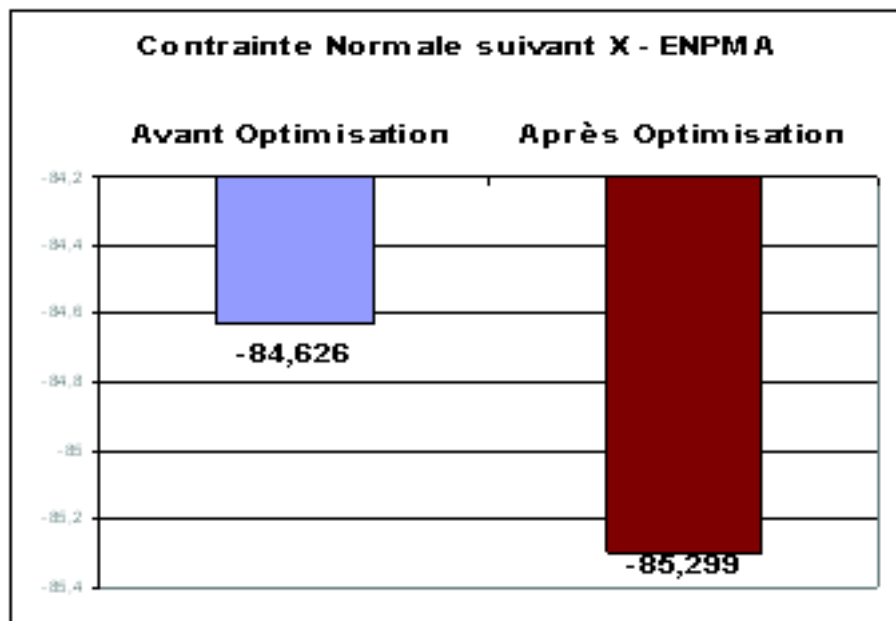
**Fig.68** : Comportement de la bande de terre sous l'action d'un effort appliqué à une hauteur de  $H=140$  mm avant l'optimisation de la surface active ENPMA



**Fig.69** : Comportement de la bande de terre sous l'action d'un effort appliqué à une hauteur de  $H=129$  mm après l'optimisation de la surface active ENPMA



*Fig.70 : Valeurs moyennes des contraintes de cisaillement suivant le plan XZ avant et après optimisation de la surface active ENPMA*



*Fig.71 : Valeurs moyennes des contraintes normales suivant la direction X avant et après optimisation de la surface active ENPMA*

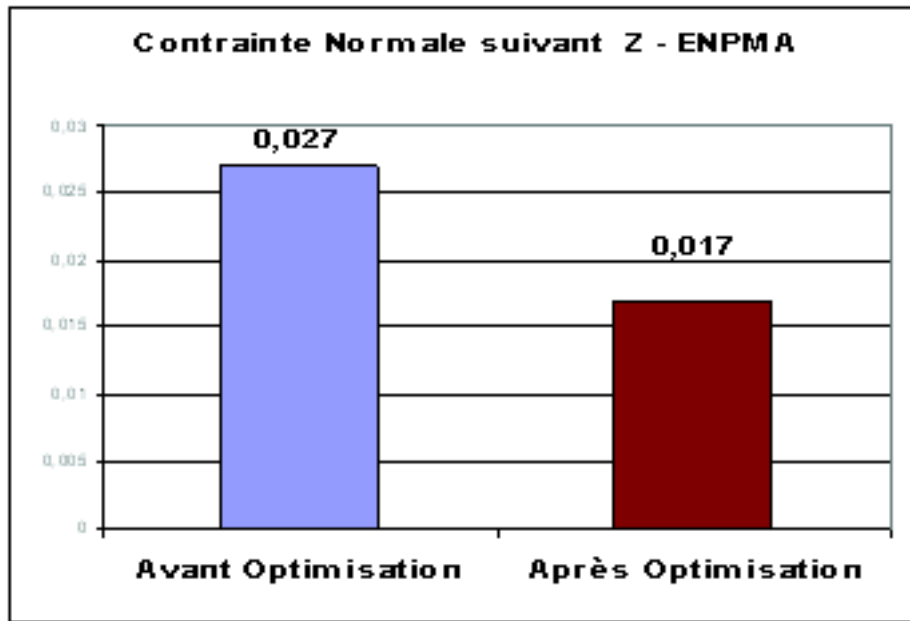


Fig.72 : Valeurs moyennes des contraintes normales suivant la direction Z avant et après optimisation de la surface active ENPMA

#### 7.6.2.2. Cas de la forme SACRA

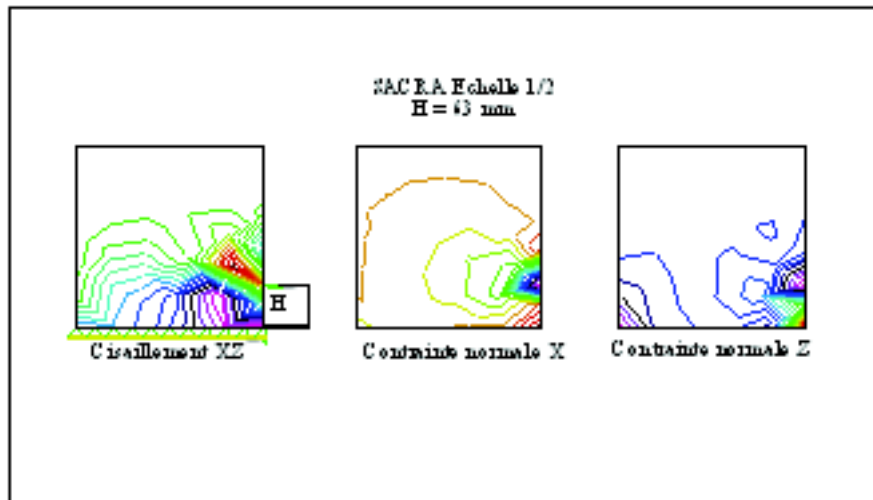


Fig.73 : Comportement de la bande de terre sous l'action d'un effort appliqué à une hauteur de H=63 mm avant l'optimisation de la surface active SACRA

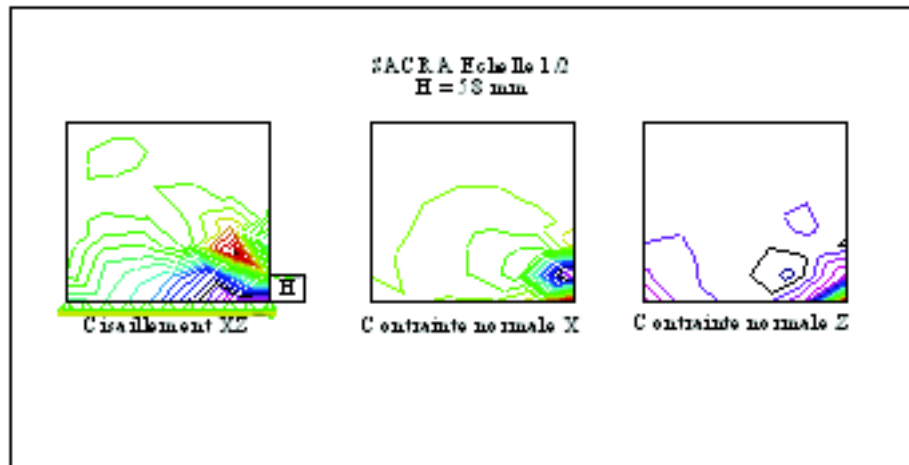


Fig.74 : Comportement de la bande de terre sous l'action d'un effort appliqué à une hauteur de  $H=58$  mm après l'optimisation de la surface active SACRA

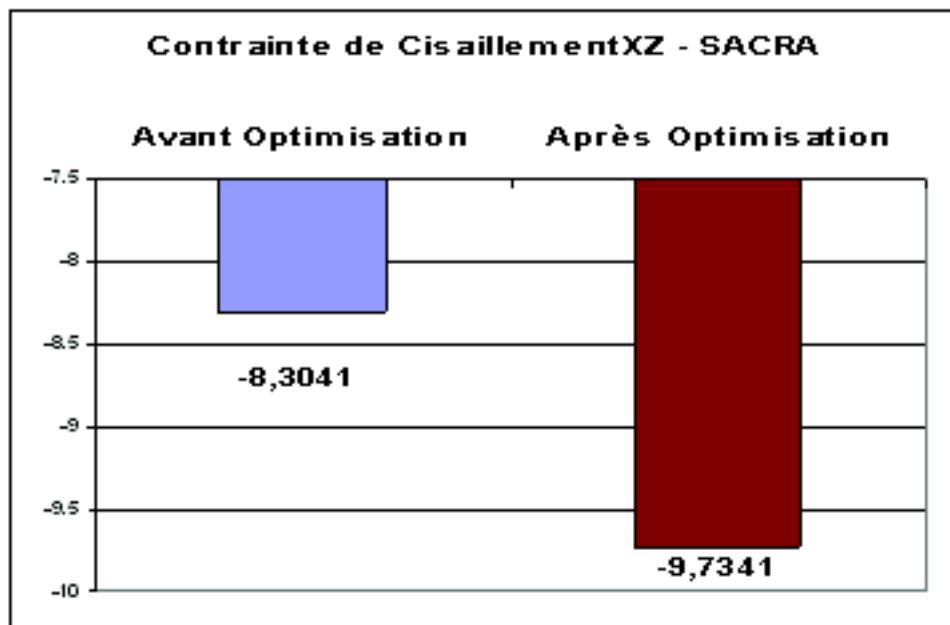
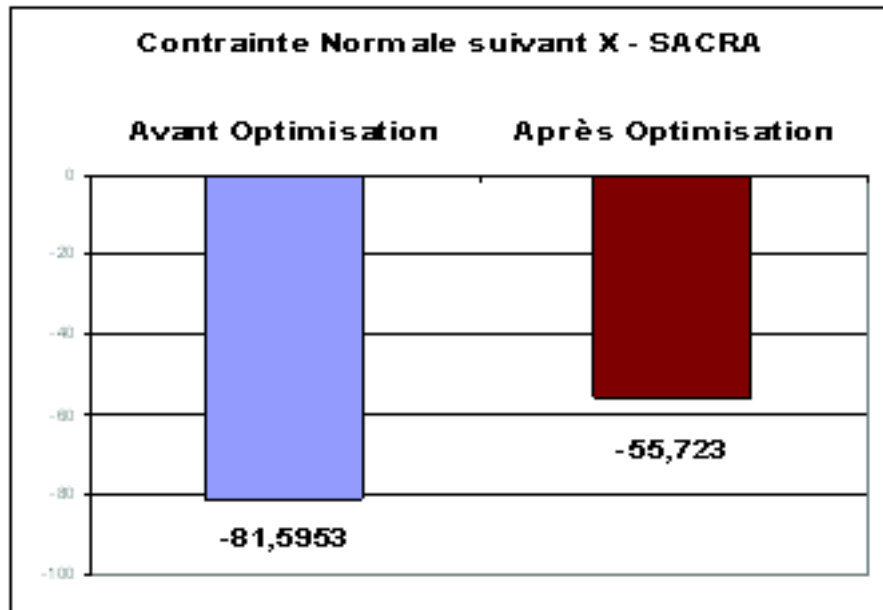
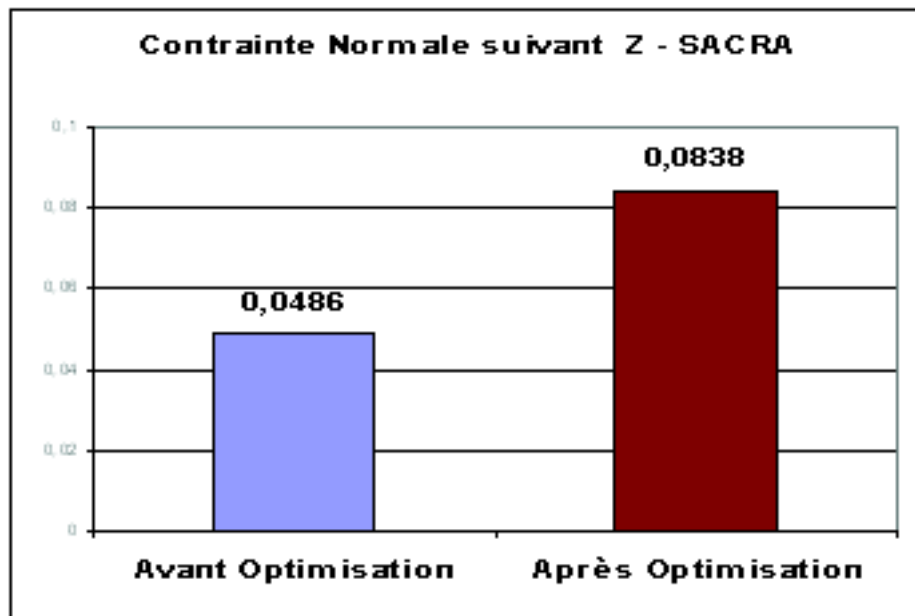


Fig.75 : Valeurs moyennes des contraintes de cisaillement suivant le plan XZ avant et après optimisation de la surface active SACRA





*Fig.76 : valeurs moyennes des contraintes normales suivant la direction X avant et après optimisation de la surface active SACRA*



*Fig.77 : Valeurs moyennes des contraintes normales suivant la direction Z avant et après optimisation de la surface active SACRA*

## 7.7. Interprétations

L'observation générale des courbes iso-contraintes montre que la position du centre de gravité de la surface active du corps de charrue à socs a un effet sur le comportement de la bande de terre.

Les histogrammes représentant respectivement les valeurs moyennes des contraintes de cisaillement et des contraintes normales montrent que :

La contrainte de cisaillement en valeurs absolues, suivant le plan vertical-parallèle à la direction d'avancement de la bande de terre, est réduite pour la forme ENPMA après optimisation de la surface, celle-ci passe de 11,478 N/mm<sup>2</sup> à 10,942 N/mm<sup>2</sup> et qu'elle est légèrement plus importante pour la forme SACRA dans ce cas elle passe de 8,30 N/mm<sup>2</sup> à 9,73 N/mm<sup>2</sup>.

Par contre en valeurs absolues les contraintes normales, suivant la direction d'avancement X, sont plus importantes après optimisation de la surface de la forme ENPMA elles passent de 84,626 N/mm<sup>2</sup> à 85,299 N/mm<sup>2</sup>, l'effet inverse est constaté pour la forme SACRA où la contrainte moyenne passe de 81,59 N/mm<sup>2</sup> à 55,72 N/mm<sup>2</sup>.

Toujours pour la contrainte normale suivant la direction Z, la première remarque est que les valeurs des contraintes suivant cette direction sont très faibles, ce qui confirme que la composante verticale de l'effort de résistance à la traction est négligée par plusieurs auteurs.

La comparaison des valeurs moyennes de cette contrainte montre que l'abaissement du centre de gravité de la surface active et donc du point d'application de l'effort de résistance à la traction sur la bande de terre entraîne une diminution de cette contrainte pour la forme ENPMA et une augmentation pour SACRA.

## **7-8-Conclusion**

---

Les contraintes étant les réactions du sol à l'effort de résistance à la traction permet donc de tirer les conclusions suivantes :

Le changement de la position du centre de gravité de la surface active des corps de charrue a un effet sur la cinématique et le comportement de la bande de terre.

L'objectif principal des labours étant le retournement de la bande de terre, l'abaissement du point d'application de la force de résistance à la traction 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 végétaux.

En respectant la loi de Hooke qui dit que la déformation d'un solide est proportionnelle à l'intensité de la force qui la crée, la déformation de la bande de terre est donc proportionnelle à la force de pression de la surface active sur le sol.

Pour ce qui est des deux formes de surfaces actives étudiées, et suivant les représentations graphiques des variations des contraintes, nous pouvons énoncer les conclusions suivantes :

La forme ENPMA permettra par l'abaissement du point d'application de l'effort un cisaillement moins important d'où un éclatement moins important, par contre la compression de la bande de terre est plus accentuée suivant la direction verticale Z. Pour la forme SACRA nous remarquerons un effet inverse du changement de position du centre de gravité.

Ceci met en évidence l'importance de la position du centre de gravité de la surface active d'un corps de charrue à soc sur le comportement de la bande de terre et donc de la déformation du sol lors des labours.

Afin de vérifier l'effet de la forme de la surface active sur les indices qualitatifs du labour, des essais ont été réalisés sur terrain avec les deux formes de corps de charrue étudiés.

## Chapitre 8. Influence de la forme des versoirs des deux corps de charrue à socs sur les indices qualitatifs des labours.

### 8.1. Objectifs et conditions de travail

---

Cette partie a pour objet de montrer l'effet de la forme du versoir et des conditions de travail sur les indices qualitatifs des labours.

Ces indices qualitatifs sont le résultat de la réaction simultanée de l'action du corps de charrue sur le sol et la réaction de celui-ci.

L'objectif est de montrer l'effet de la forme du versoir et donc des principales caractéristiques géométriques des surfaces actives sur les indices qualitatifs des labours ce qui permet le choix de la forme du corps de charrue en relation avec les conditions de sol prédéfinis et les objectifs recherchés.

Les essais ont été réalisés sur une parcelle de l'exploitation de l'institut national agronomique dont les caractéristiques sont représentées ci-dessous :

- Précédent cultural : vesce avoine
- Composition granulométrique qui est de 36.08 % d'argile, 32.41 % de limon et 31.50 % de sable.
- Densité réelle :  $2.32 \text{ g / cm}^3$
- Densité apparente initiale :  $1.29 \text{ g / cm}^3$
- Porosité initiale : 44 %
- Humidité du sol : 14.64 %

Pour la réalisation des essais, quatre vitesses ont été définies, elles sont respectivement de 0.52 (1.89), 0.80 (2.90), 1.05 (3.83) et 1.78 (6.43) m / s (km /h).

### 8.2. Indices qualitatifs étudiés :

---

Les indices qualitatifs étudiés, et cités ci-dessous, permettent de qualifier le type de labour, ils sont en relation directe avec les objectifs recherchés lors du labour.

- Indice d'irrégularité de la largeur de travail :  $(\Delta b = \frac{\sigma b}{b_m})$
- Indice d'irrégularité de la profondeur de labour :  $(\Delta a = \frac{\sigma a}{a_m})$
- Indice de recouvrement des résidus végétaux :  $(\Delta \delta = \frac{\sigma \delta}{\delta_m})$
- Indice d'inclinaison de la bande de terre :  $(\Delta \omega = \frac{\sigma \omega}{b_\omega})$
- Porosité :  $n = (1 - \frac{da}{ds}).100\% (n)$

- Foisonnement : cet indice est illustré par l'augmentation du volume du sol travaillé, il correspond à la variation de la densité apparente :

$$I_f = \left( \frac{da_f}{da_i} \right).100\%$$

- Emiettement : il s'agit plutôt de la taille des mottes laissées après passages de charrues à socs, cet indice caractérise l'état de surface du sol dont l'intérêt réside sur la capacité du sol à recevoir et à conserver les eaux de pluie. Cet indice pourrait également nous renseigner sur la stabilité structurale du sol qui est évidemment fonction de la composition granulométrique. La détermination des tailles des mottes par classes a été réalisée par la méthode photographique qui consiste à prendre des photos après chaque passage et de calculer par la suite le nombre de mottes par classe de 1-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 et 25-30 cm. L'avantage de cette méthode est la non destruction des mottes par leurs manipulations.

### 8.3. Résultats et discussions

---

Il est à noter que les résultats ci-dessous correspondent aux moyennes de dix valeurs de chacune des trois répétitions et ce pour chacun des indices étudiés.

Tableau 22 : Indice d'irrégularité de la largeur de travail :  $\Delta b$

---

Forme du versoir	vitesse (m/s)			
	0,52	0,8	1,05	1,78
ENPMA	12,59	8,92	6,85	4,38
SACRA	5,38	3,53	4,3	3,7

A travers ces résultats, il apparaît que la largeur de travail est plus régulière lorsque le labour est réalisé avec la charrue SACRA, elle l'est d'autant plus que la vitesse augmente.

**Tableau 23 : Indice d'irrégularité de la profondeur de travail :  $\Delta a$**

Forme du versoir	vitesse (m/s)			
	0,52	0,8	1,05	1,78
ENPMA	7,7	9,93	14,17	12,22
SACRA	8,22	7,92	7,52	13,88

A la vitesse couramment utilisée pour les labours (1.05 m / s), la profondeur de travail est plus régulière pour la forme SACRA (7,52) que pour la forme ENPMA (14,17).

**Tableau 24 : Indice d'irrégularité de l'inclinaison de la bande de terre et de recouvrement des résidus végétaux :  $\Delta \delta$  et  $\Delta \varphi$**

Forme du versoir		vitesse (m/s)			
		0,52	0,8	1,05	1,78
ENPMA	$\Delta \delta$	3,39	7,08	5,79	6,48
	$\Delta \varphi$	7,16	5,58	4,19	2,11
SACRA	$\Delta \delta$	3,69	6,46	5,99	7,38
	$\Delta \varphi$	13,61	10,78	8,73	5,73

Ces résultats indiquent que l'inclinaison de la bande de terre est plus régulière quand la vitesse d'avancement augmente pour les deux formes de versoirs, ce qui s'expliquerait par l'inertie de la bande de terre. La forme du versoir ENPMA permet une meilleure régularité d'inclinaison de la bande de terre. Ceci est la conséquence de la courbure moyenne de la surface active qui est plus importante pour la forme ENPMA étudiée précédemment.

Pour ce qui est du recouvrement des résidus végétaux, les valeurs des indices obtenus font ressortir que la régularité du recouvrement des résidus est sensiblement la même pour les deux formes de versoirs.

Forme du versoir	vitesse (m/s)			
	0,52	0,8	1,05	1,78
ENPMA	62,4	67,1	65,3	64,5
SACRA	62	64,9	64,8	63,8

**Tableau 25 : Variation de la porosité :  $n$**

Pour ce qui est de la porosité, celle-ci est légèrement plus importante quand le labour est réalisé avec le corps de charrue ENPMA. Ceci est confirmé par les valeurs des indices de foisonnement et des indices d'émiettement obtenus.

En effet le foisonnement (éclatement du sol) est plus important lorsque le travail est réalisé avec la charrue SACRA, ceci est confirmé par la taille des mottes. (Tableaux suivants)

Forme du versoir	vitesse (m/s)			
	0,52	0,8	1,05	1,78
ENPMA	67,5	59,2	62,6	64
SACRA	68,5	63,3	63,4	65,3

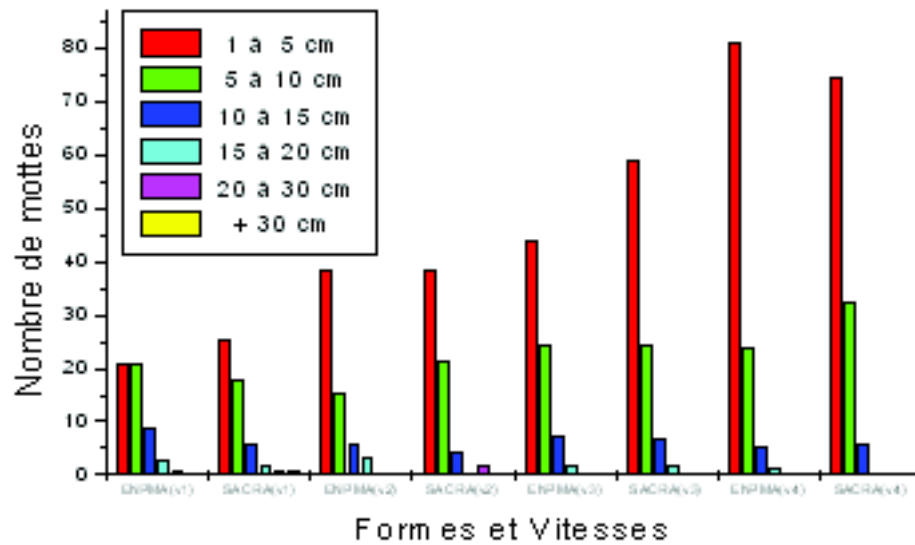
**Tableau 26 : Indice de foisonnement :  $I_f$**

**Tableau 27 : Nombre de mottes par classe et par  $m^2$  (Indice d'émiettement  $I_e$ )**

Vitesses (m / s)	classes Versoirs	1à5cm	5à10cm	10à15cm	15à20cm	20à25cm	25à30cm
		0,52	ENPMA	21	21	8,66	2,66
	SACRA	25,66	18	5,66	2	1	1
0,8	ENPMA	38,33	15,33	5,66	3,33	0,33	0,33
	SACRA	38,33	21,66	4,33	0,33	1,66	0
1,05	ENPMA	44	24,33	7,33	1,66	0,33	0
	SACRA	59	24,33	7	2	0	0
1,78	ENPMA	81	24	5,33	1,33	0	0
	SACRA	74,66	32,66	5,66	0,33	0	0

Les valeurs de ce tableau représentent les moyennes de 5 échantillons pour chacune des trois répétitions. Il apparaît que l'augmentation de la vitesse entraîne celle du nombre de mottes de la première classe ( 1 à 5 cm ) d'autre part le nombre de mottes de cette classe est plus important pour la forme du versoir SACRA.

A partir de la troisième vitesse (1.05 m / s), vitesse habituellement utilisée pour le labour, la taille des mottes est pratiquement inférieure à 20 cm pour les deux formes de versoirs. Enfin la taille des mottes est plus importante lorsque le labour est réalisé avec la charrue ENPMA. Ces résultats sont illustrés par la figure suivante (Fig.78).



**Fig. 78 :** Effet de la forme des versoirs et de la vitesse de travail sur la taille des mottes

## 8.4. Conclusion

Les résultats obtenus lors de ces essais, mettent en évidence et confirment de façon claire, l'effet de la vitesse et surtout de la forme du versoir; les socs des deux corps de charrue étant identiques (soc trapézoïdal), sur les indices qualitatifs.

Cette première partie de nos essais a permis donc de mettre en évidence, l'importance de la forme des versoirs sur les indices qualitatifs.

Le choix de la forme du versoir du corps de charrue à socs doit donc être pris en considération pour atteindre les objectifs agronomiques escomptés. Les caractéristiques physico mécaniques du sol sont évidemment des paramètres à ne pas négliger pour ce choix.

Ces effets peuvent être expliqués par la variation de la forme de la surface active et surtout par le mode d'action des efforts appliqués par les surfaces actives de corps de charrue sur le sol. D'où l'intérêt de l'évaluation de l'effort de résistance à la traction en relation avec les caractéristiques géométriques de ces surfaces.

## Chapitre 9. Influence de la forme des outils aratoires et des conditions de travail sur l'effort de résistance à la traction.

Après avoir analysé et montré l'effet des formes des surfaces actives des corps de charrues sur les indices qualitatifs, il sera question dans ce qui suit de l'effet des formes et des conditions de travail sur l'effort de résistance à la traction.

### 9.1. Présentation du protocole expérimental

Les efforts de résistance à la traction ont été déterminés sur un canal d'essais de traction d'outils aratoires muni d'un chariot porte outils (fig.79). Sur les étançons des corps de charrues, des jauges de contraintes extensiométriques sont collées, l'ensemble est relié à une chaîne de mesure extensiométrique composée d'un pont de Wheatstone avec amplification de signal et d'un enregistreur à six voies pour la détermination de l'effort de résistance à la traction.

Sur le chariot porte-outils, deux modèles réduits de même échelle et de formes différentes sont montés. L'ensemble est animé d'un mouvement de translation le long du canal à l'aide d'un câble en acier relié à un moteur électrique, par l'intermédiaire d'un variateur de vitesses. Avant le déplacement du chariot, certains facteurs sont maintenus constants, le paramètre étudié subira une variation après chaque passage. L'avantage que représente ce dispositif est la mise dans les mêmes conditions de travail de deux corps de charrues.

Après chaque passage du chariot deux courbes sont obtenues, l'une pour **SACRA**, l'autre pour la forme **ENPMA**. Dix valeurs de l'effort de résistance à la traction sont mesurées sur chacune des courbes enregistrées.

## **9.2. Etablissement des paramètres étudiés et conditions de travail**

---

### **9.2.1. Paramètres de formes des corps de charrues.**

Parmi les nombreuses caractéristiques des corps de charrues à socs ayant fait l'objet de nos analyses, les angles choisis sont respectivement: l'angle d'entrure ( $\alpha$ ), l'angle d'attaque ( $\gamma$ ) et l'angle de courbure ou d'inclinaison ( $\theta$ ), vu l'importance de leurs effets sur les indices qualitatifs et surtout énergétiques.

### **9.2.2. Texture du sol**

Pour la détermination de l'effort de résistance à la traction, un sol à texture Limono - sableuse (49% de sable, 24,5% de limon et 26,5% d'argile), a été utilisé sur canal d'essais de traction. Pour éviter les interactions dues à l'anisotropie du sol, sur l'effort de résistance à la traction, ce sol a été tamisé à l'aide d'un tamis ayant des mailles carrées d'un centimètre de coté.

### **9.2.3. Paramètres conditions de travail**

- Profondeur de travail (a)

Trois profondeurs ont été prises en considération, la première, à la hauteur du soc la deuxième, à la mi - hauteur du versoir et la troisième à la hauteur totale du corps de charrue, ces valeurs sont consignées dans le tableau suivant :

**Tableau 28 : Profondeurs de travail (p)**

<b>Echelle du corps</b>	<b>1/4</b>	<b>1/3 Profondeur (m)</b>	<b>1/2</b>
P1	0.03	0.05	0.07
P2	0.04	0.06	0.09
P3	0.07	0.09	0.12

- Largeur de travail (b)



La largeur de travail est la même pour les deux formes de même échelle, ce qui est pratique pour nos essais car cela met en évidence la différence de l'effet des deux formes de versoirs. Les valeurs sont respectivement de : pour l'échelle 1 / 4,  $b = 0.09$  m ; pour l'échelle 1 / 3,  $b = 0,013$  et pour l'échelle 1 / 2,  $b = 0,16$  m.

- Vitesses d'avancement des outils (v)

Quatre vitesses ont été choisies, elles sont respectivement de:  $V1=0.23$  m/s ,  $V2 = 0,29$  m/s  $V3 = 0,43$  m/s et  $V4 = 0,87$  m/s.

- **Tassement du sol :**

Cette caractéristique est quantifiée par la densité apparente du sol. Les différentes valeurs de tassement ont été obtenues à l'aide d'un rouleau de 75 kg de largeur 0,80 mètre (approximativement la largeur du canal qui est d'un mètre).

Pour le premier tassement, un passage du rouleau, pour le deuxième tassement, deux passages et pour le troisième tassement trois passages.

Les valeurs des densités apparentes sont respectivement de  $t1=d1= 1,02$  g / cm<sup>3</sup>,  $t2 : d2 = 1,35$  g /cm<sup>3</sup> pour  $t3 : d3 = 1,63$  g / cm<sup>3</sup>. la densité réelle du sol déterminée par la méthode classique qui consiste au déplacement d'un volume d'eau par un échantillon de sol sec et écrasé dont le poids est connu, est de  $2,32$  g / cm<sup>3</sup> . La densité réelle du sol, déterminée par la méthode du volume d'eau déplacé par un échantillon de sol sec, est :  $d_r = 162,5 / 70 = 2,32$  g / cm<sup>3</sup>

Les valeurs détaillées de la densité apparente sont représentées ci-dessous :

**Tableau 29 : Densité apparente pour le premier tassement**

<b>Ps(g)</b>	<b>Vc(cm3)</b>	<b>d(g/cm3)</b>
366,43	339,29	1,08
390,18	339,29	1,15
291,79	339,29	0,86
380,00	339,29	1,12
308,75	339,29	0,91

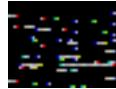
**Tableau 30 : Densité apparente pour le deuxième tassement**

<b>Ps(g)</b>	<b>Vc(cm3)</b>	<b>d(g/cm3)</b>
424,11	339,29	1,25
393,58	339,29	1,16
498,76	339,29	1,47
512,33	339,29	1,51
454,65	339,29	1,34

**Tableau 31 : Densité apparente pour le troisième tassement**

<b>Ps(g)</b>	<b>Vc(cm3)</b>	<b>d(g/cm3)</b>
593,76	339,29	1,75
563,22	339,29	1,66
498,76	339,29	1,47
512,33	339,29	1,51
522,51	339,29	1,74

Le cylindre utilisé pour le prélèvement des échantillons a pour dimensions : Diamètre = 6 cm, la hauteur choisie est de 12 cm pour avoir la densité sur le profil travaillé avec les modèles réduits. La relation utilisée pour la détermination de la densité apparente est :



· **Humidité du sol :**

Deux valeurs ont été obtenues après arrosage, les valeurs obtenues après un ressuyage de 24 heures, sont respectivement de 3,69 % et 13,76 %. La relation utilisée pour déterminer la teneur en eau est :

$$w\% = \frac{Ph - Ps}{Ps} \cdot 100$$

Les résultats détaillés sont repris dans les tableaux suivants :

**Tableau 32 : Première humidité**

<b>Poids humide (g)</b>	<b>Poids sec (g)</b>	<b>Humidité (%)</b>
44,96	43,11	4,29
46,12	44,65	3,29
41,52	40,03	3,73
44,84	43,00	4,29
46,20	44,90	2,89

**Tableau 33 : Deuxième humidité**

<b>Poids humide (g)</b>	<b>Poids sec (g)</b>	<b>Humidité (%)</b>
193,07	171,04	12,88
168,49	153,08	10,07
197,68	172,50	14,60
158,72	134,12	18,34
123,17	109,09	12,91

· **Angles d'inclinaison des outils :**

Les angles pris en considération, sont les angles constructifs, à savoir : l'angle d'entrure, l'angle d'attaque et l'angle de courbure des surfaces actives. Leurs valeurs sont respectivement :

Formes	Angles (rad)		
	$\alpha_0$	$\gamma_0$	$\theta_0$
SACRA	0,297	0,698	0,576
ENPMA	0,506	0,663	0,611

*Tableau 34 : Angles constructifs des deux corps de charrues*

### 9.3. Moyens matériels

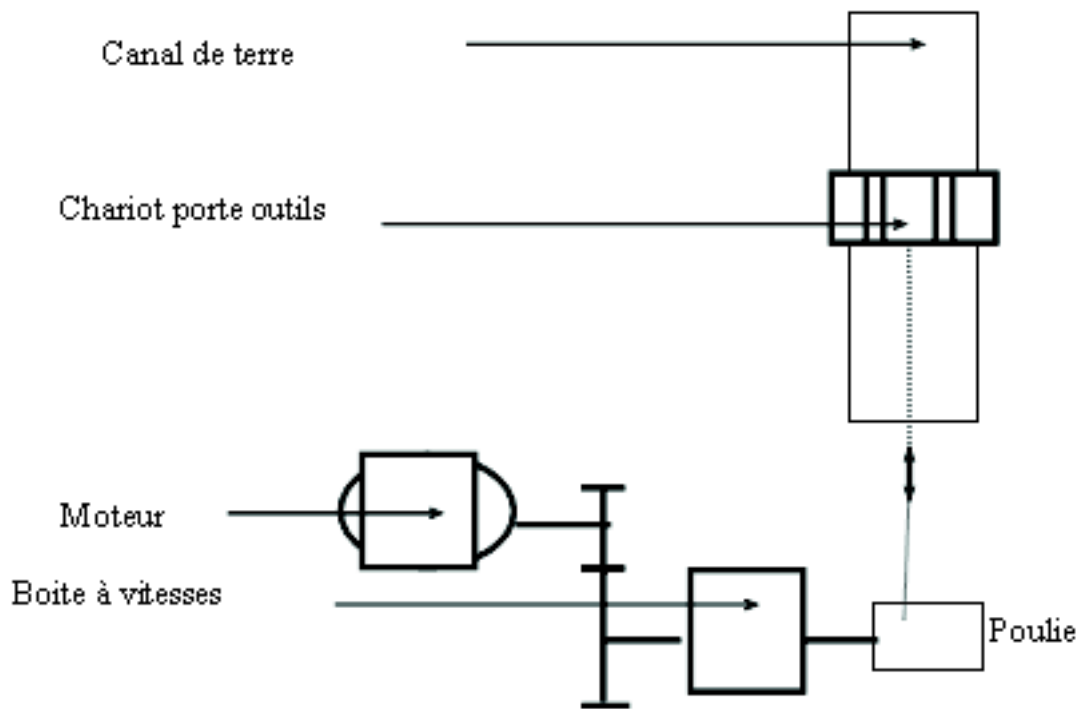
---

#### 9.3.1. Canal d'essais et chariot porte-outils

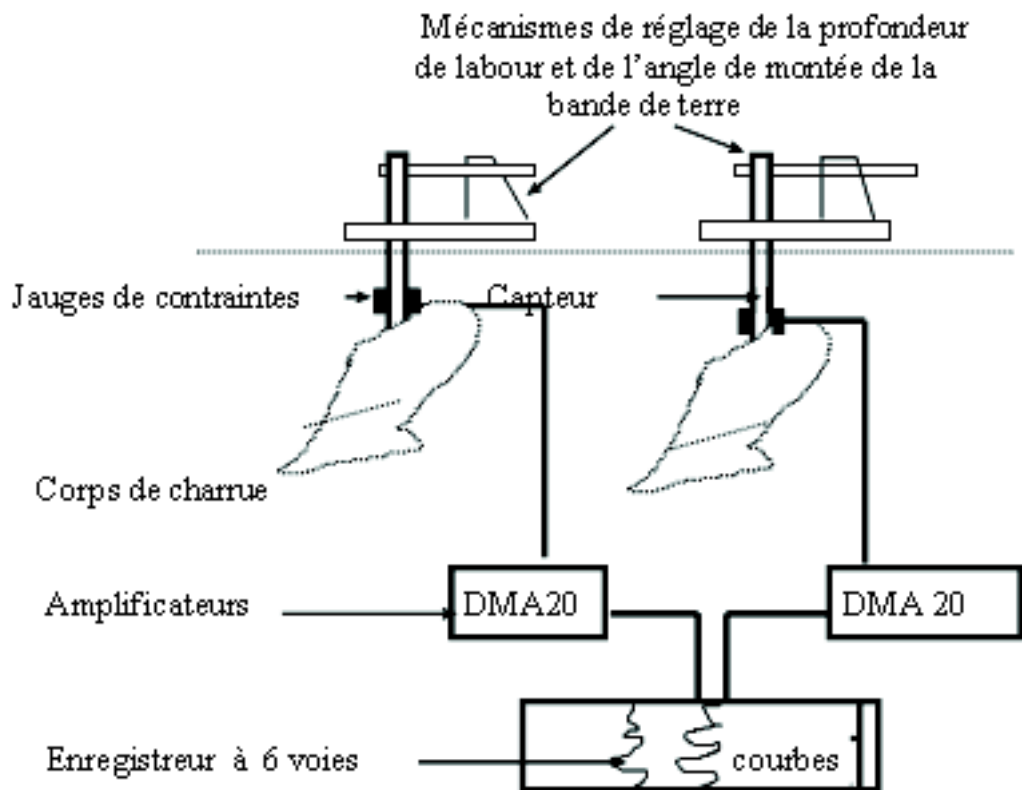
Le canal réalisé au laboratoire de machinisme agricole, où se sont déroulés nos essais est représenté sur la figure suivante :



*Fig. 79 : Vue générale du canal d'essai de traction*



*Fig. 80 : Schéma du canal d'essais de traction des outils aratoires*



*Fig. 81: Chaîne de mesure de l'effort de résistance à la traction*



*Fig. 82 : Modèles réduits montés sur porte-chariot*

### 9.3.2. Transmission du mouvement

#### Moteur

Le mouvement du chariot porte outils est obtenu par une transmission flexible (poulies et courroies) reliée à un moteur électrique de type asynchrone triphasé avec réducteur de vitesse, dont les caractéristiques sont :

- Tension d'alimentation : 220volts,  $\cos\varphi = 0.82$
- Vitesse de rotation du moteur :  $n = 1500 \text{ tr / mn}$
- Vitesses de sortie : 40, 60, 100, 200, 400 et 750 tr / mn
- Puissances du moteur : 1, 2, 3 et 4 CV.

Tenant compte de la longueur du canal d'essai (12 mètres), et des dimensions des outils utilisés, nous nous sommes limités à la puissance d'un cheval et à la vitesse de sortie du moteur égale à 200 tours par minute.

#### Boite à vitesses

Les vitesses de translation ou de déplacement du chariot sur le canal sont obtenues à l'aide d'une boite de vitesses à quatre gammes avant et une gamme arrière.

### 9.3.3. Chaîne de mesures

La chaîne de mesures utilisée pendant nos essais est composée des parties suivantes.

#### Les capteurs d'efforts

Pour la détermination des efforts de résistance à la traction, des capteurs d'efforts ont été réalisés au laboratoire de résistance des matériaux. Le principe de fonctionnement de ces capteurs est celui des jauges de contraintes extensiométriques (fig.83).



*Fig. 83 : Capteur d'effort avec sa jauge*



*Fig. 84 : Capteur monté sur le corps de charrue*

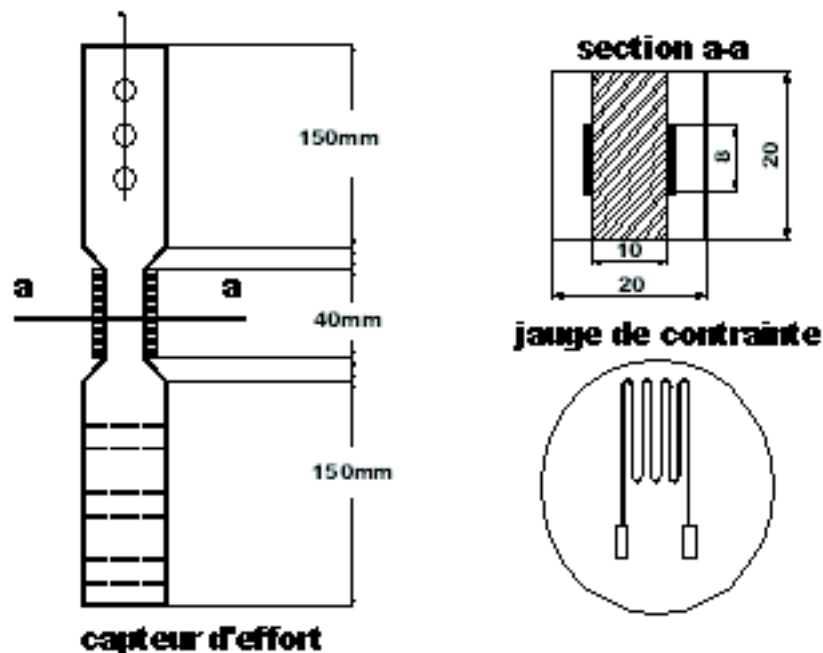


Fig. 85 : Schéma du capteur d'effort

**Les amplificateurs de signaux :**

Ces appareils (DMA 20) placés entre les capteurs et l'enregistreur ont deux fonctions ; la première est la transformation du signal physique d'entrée (déformation de la jauge de contrainte du capteur) en un signal électrique de sortie, la deuxième est l'amplification du signal d'entrée pour l'excitation de l'enregistreur.

**L'enregistreur :**

Les différentes variations des efforts de résistance à la traction sont données sur des graphes d'un enregistreur à six voies qui permet l'enregistrement simultané des deux efforts de résistance des outils montés sur le chariot porte-outils. La forme des courbes enregistrées est représentée sur la figure ci-dessous :

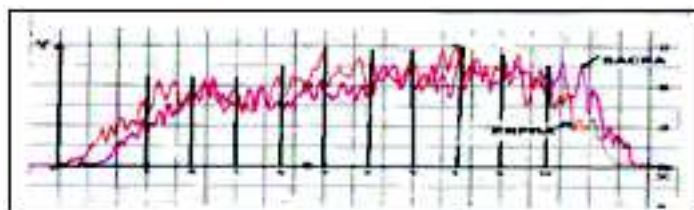


Fig. 86 : Enregistrement graphique des efforts de résistance à la traction sur une distance de 10 mètres.

## 9.4. Influence de l'état du sol sur l'effort de résistance à la traction

### 9.4.1. Influence du tassement du sol

Les résultats obtenus lors des essais sont reproduits dans les tableaux ci-dessous :

**Contribution à la modélisation interface outils aratoires sol Optimisation de la forme et de l'effort de résistance à la traction des corps de charrues à socs et des outils à dents**

**Tableau 35 : Effet du tassement (Tas), de la vitesse (Vit), de la forme (E ou S) et de l'échelle (Q=1/4, T=1/3, D=1/2) sur l'effort de résistance à la traction (Ft en daN).**

<b>Echelle 1 / 4</b>							
<b>TAS</b>	<b>VIT</b>	<b>FTSP1Q</b>	<b>FTEP1Q</b>	<b>FTSP2Q</b>	<b>FTEP2Q</b>	<b>FTSP3Q</b>	<b>FTEP3Q</b>
t1	v1	2,3	2,37	3,25	3,9	8,9	9,52
t1	v2	2,4	2,47	3,95	4,1	8,3	9,55
t1	v3	2,45	2,6	3,53	4,75	7,97	9,97
t1	v4	2,52	2,77	5,55	5,67	13,8	15,2
t2	v1	2,94	5,52	9,18	11,88	20,88	21,6
t2	v2	4,26	7,44	9,48	13,14	21,42	21,24
t2	v3	5,82	6,54	11,64	14,88	21,12	23,7
t2	v4	9,06	11,7	16,86	17,18	25,8	29,88
t3	v1	9,78	10,5	12,06	13,08	37,86	39,66
t3	v2	10,5	10,62	11,16	15,54	35,92	38,58
t3	v3	10,56	12,9	15,66	19,2	36,78	38,7
t3	v4	14,34	16,44	22,4	22,26	46,38	44,34

**Echelle 1/3**

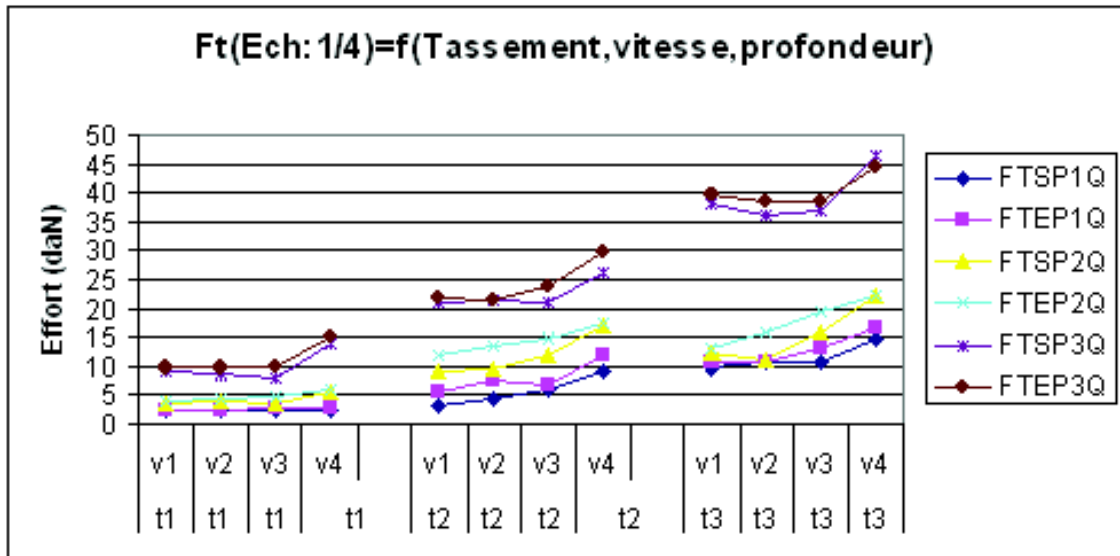
<b>TAS</b>	<b>VIT</b>	<b>FTSP1T</b>	<b>FTEP1T</b>	<b>FTSP2T</b>	<b>FTEP2T</b>	<b>FTSP3T</b>	<b>FTEP3T</b>
t1	v1	4,1	3,75	8	7,05	19,77	21,1
t1	v2	6,4	3,1	8,75	7,1	20,12	21,97
t1	v3	4,32	4	9,22	10,87	22,25	28,2
t1	v4	4,52	4,95	18,67	15,42	22,35	29,95
t2	v1	15,04	13,28	11,68	14,4	24,64	28,16
t2	v2	19,36	14,88	12,16	14,56	22,88	26,56
t2	v3	14,56	15,84	13,44	16,48	34,28	34,4
t2	v4	12,8	19,84	19,68	22,4	54,24	73,28
t3	v1	14,52	16,76	21,8	22,4	30,38	35,68
t3	v2	14,86	17,6	22,56	23,28	42,08	46,08
t3	v3	15,48	18,82	21,32	23,52	44,48	53,6
t3	v4	19,02	19,28	20,16	24,84	58,72	60,6

**Echelle 1 / 2**

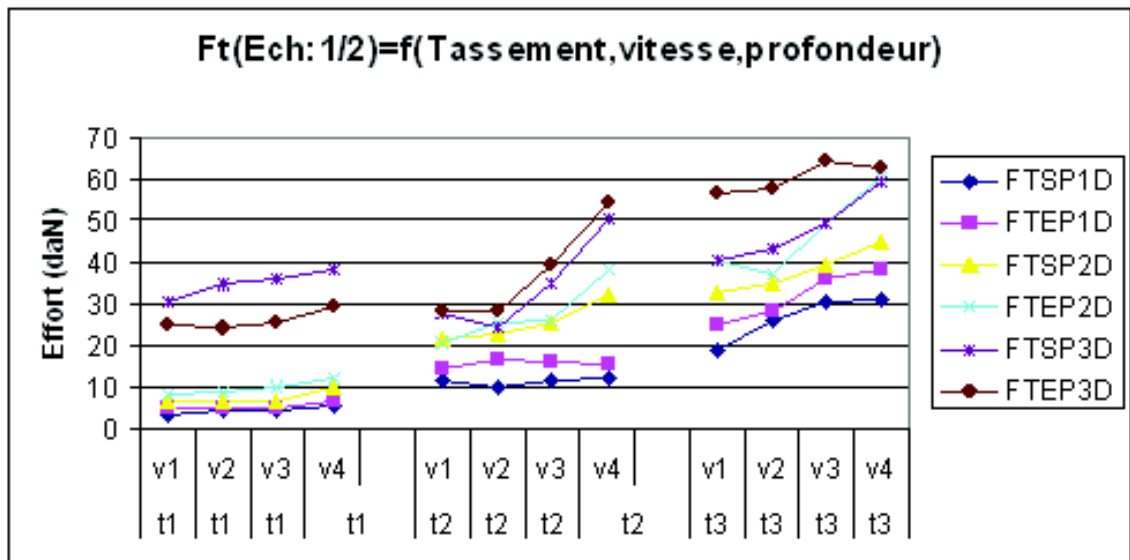
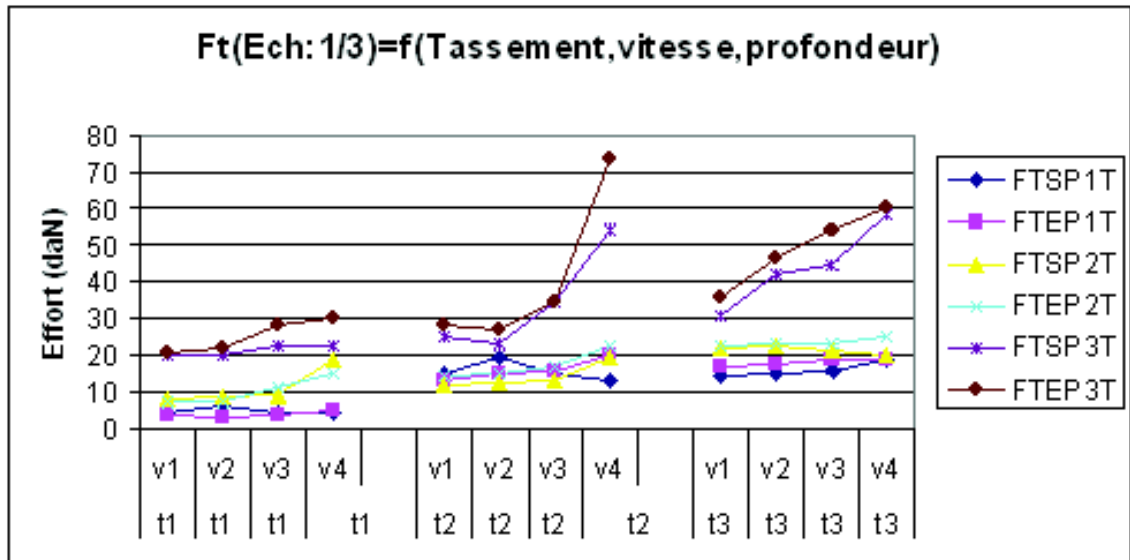


TAS	VIT	FTSP1D	FTEP1D	FTSP2D	FTEP2D	FTSP3D	FTEP3D
t1	v1	3,12	4,44	6,24	8,58	30,48	24,78
t1	v2	4,14	4,8	6,48	8,76	34,68	24,24
t1	v3	4,2	4,92	6,84	9,94	36	25,5
t1	v4	5,46	6,72	9,84	11,88	38,58	29,4
t2	v1	11,52	14,24	21,6	20,64	27,5	28,14
t2	v2	10,08	16,64	22,88	25,28	24,14	28,18
t2	v3	11,52	15,82	25,44	26,24	35,04	39,36
t2	v4	12,16	15,36	32	38,24	50,56	54,56
t3	v1	19,04	25	32,64	40,32	40,69	56,32
t3	v2	26,08	28,32	34,88	36,96	43,52	57,76
t3	v3	30,56	36	39,36	49,44	49,28	64,32
t3	v4	31,04	38,56	45,28	60,32	59,04	62,24

Afin de mettre en évidence, les variations de l'effort de résistance sous l'effet des différents facteurs tels que la vitesse et le tassement du sol, et ce pour les trois échelles des corps de charrues, 1 / 4 ; 1 / 3 et 1 / 2 pour les deux formes SACRA et ENPMA, les représentations graphiques suivantes ont été établies :



**Fig.87** : Représentation graphique de l'influence de la vitesse (v) et du tassement (t) du sol sur l'effort de résistance à la traction (Ft) pour les deux formes de corps de charrue et pour les trois échelles.



L'analyse de ces représentations graphiques, montre clairement que l'effort de résistance à la traction augmente avec la vitesse d'avancement, la profondeur de travail et le tassement du sol.

#### 9.4.2. Analyse de l'influence combinée de la forme, de la vitesse, de l'échelle, de la profondeur et du tassement du sol sur l'effort de résistance à la traction

Pour quantifier les effets combinés des différents paramètres sur l'effort de résistance à la traction, l'analyse statistique choisie est la régression multiple. Cette méthode permet de faire ressortir l'ordre d'importance des effets de chacun des facteurs sur l'effort de résistance à la traction. La relation recherchée est de la forme :

$$F_t = f(\text{Echelle, Densité apparente, Vitesse, Profondeur})$$

Les résultats de l'analyse statistique sont repris ci-dessous :

**Ft (Sacra) = f (Echelle, Densité apparente, Vitesse, Profondeur)**

**Ft (Sacra) = - 42,72 – 44,22 \* Echelle + 29,05 \* densité + 12,41 \* Vitesse + 494,22 \* Profondeur**

**Avec : R<sup>2</sup> = 0,86 avec p < 0,0001**

**Ft (Enpma) = f (Echelle, densité apparente, Vitesse, Profondeur)**

**Ft (Enpma) = - 53,95 – 41,07 \* Echelle + 36,61 \* densité + 14,31 \* Vitesse + 516,66 \* Profondeur**

**Avec : R<sup>2</sup> = 0,84 avec p < 0,0001**

Unités : densité en (g / cm<sup>3</sup>), vitesse en (m / s) et la profondeur en (m).

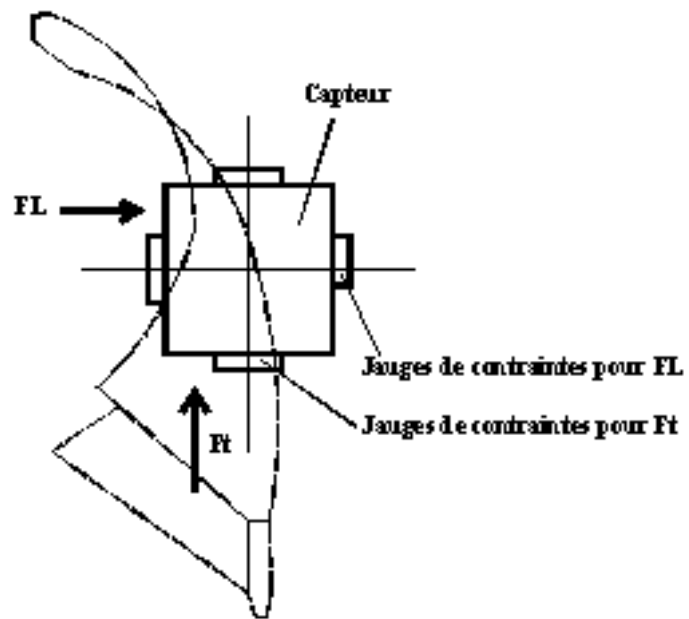
L'analyse de ces deux équations permet de tirer les conclusions : pour la même échelle, la même vitesse, la même densité apparente du sol et la même profondeur de travail, l'effort de résistance à la traction est légèrement plus grand pour la forme ENPMA.

Pour ce qui est de l'ordre d'importance des effets de ces différents paramètres, nous remarquons que l'effet de la profondeur est prédominant avec des coefficients respectifs de 494,22, pour la forme SACRA et 516,66, pour la forme ENPMA. En deuxième position, la densité apparente du sol avec des coefficients respectifs de 29,05 et 36,61 puis vient ensuite l'effet de la vitesse d'avancement avec des coefficients de 12,41 et 14,31. Pour ces trois paramètres, la profondeur, la densité apparente et la vitesse, les coefficients sont légèrement supérieurs pour la forme ENPMA.

#### **9.4.3. Influence de l'humidité du sol sur l'effort de résistance et sur la composante latérale.**

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 celui-ci, d'où son intérêt quant au choix du 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 (Ft).

Au niveau de cette analyse, la composante latérale (FL) de l'effort de résistance à la traction est introduite, vu son importance sur la stabilité de l'ensemble tracteur - charrue. Sa détermination a été réalisée avec un capteur à jauges extensiométriques représenté ci-dessous :



**Fig.88** : Capteur extensiométrique pour la détermination de Ft et FL

Les résultats obtenus lors des essais sont consignés dans les tableaux suivants :

**Tableau 36** : Effet combiné de la vitesse, de la forme, de l'échelle et de l'humidité sur l'effort (Ft) et latéral (FL) texture du sol : limono-sableuse (49% de sable, 24,5% de limon et 26,5% d'argile)

Echelle 1/2				
FL(daN)	Ft (daN)	Vitesse (m/s)	Forme	W humidité %
13,17	49,93	0,23	SACRA	3,69
14,13	55,31	0,29	SACRA	3,69
15,83	68,83	0,43	SACRA	3,69
25,53	79,84	0,87	SACRA	3,69
4,19	14,09	0,23	SACRA	13,76
4,80	16,17	0,29	SACRA	13,76
5,02	18,31	0,43	SACRA	13,76
5,50	20,55	0,87	SACRA	13,76
6,82	52,93	0,23	ENPMA	3,69
8,70	60,44	0,29	ENPMA	3,69
9,30	80,30	0,43	ENPMA	3,69
12,07	89,32	0,87	ENPMA	3,69
3,82	11,62	0,23	ENPMA	13,76
3,86	12,07	0,29	ENPMA	13,76
3,98	13,70	0,43	ENPMA	13,76
4,85	24,48	0,87	ENPMA	13,76

<b>Echelle 1/3</b>				
<b>FL</b>	<b>Ft</b>	<b>Vitesse (m/s)</b>	<b>Forme</b>	<b>W humidité %</b>
3,78	11,93	0,23	SACRA	3,69
4,32	12,32	0,29	SACRA	3,69
4,56	13,76	0,43	SACRA	3,69
5,46	15,23	0,87	SACRA	3,69
3,36	10,36	0,23	SACRA	13,76
4,02	11,2	0,29	SACRA	13,76
4,14	12,76	0,43	SACRA	13,76
4,62	20,54	0,87	SACRA	13,76
4,2	12,66	0,23	ENPMA	3,69
5,22	14,55	0,29	ENPMA	3,69
5,4	18,14	0,43	ENPMA	3,69
6,2	25,32	0,87	ENPMA	3,69
1,86	11,34	0,23	ENPMA	13,76
2,34	11,62	0,29	ENPMA	13,76
2,7	11,71	0,43	ENPMA	13,76
3,84	13,11	0,87	ENPMA	13,76

<b>Echelle :1/ 4</b>				
<b>FL</b>	<b>Ft</b>	<b>Vitesse (m/s)</b>	<b>Forme</b>	<b>W humidité %</b>
1,05	7,92	0,23	SACRA	3,69
1,26	8,5	0,29	SACRA	3,69
1,55	9,76	0,43	SACRA	3,69
1,97	11,52	0,87	SACRA	3,69
0,71	3,63	0,23	SACRA	13,76
0,75	3,72	0,29	SACRA	13,76
0,96	3,84	0,43	SACRA	13,76
1,09	4,83	0,87	SACRA	13,76
0,86	10,25	0,23	ENPMA	3,69
0,9	11,54	0,29	ENPMA	3,69
1,31	13,7	0,43	ENPMA	3,69
1,64	15,77	0,87	ENPMA	3,69
0,57	3,52	0,23	ENPMA	13,76
0,93	3,98	0,29	ENPMA	13,76
0,98	4,08	0,43	ENPMA	13,76
1,14	4,82	0,87	ENPMA	13,76

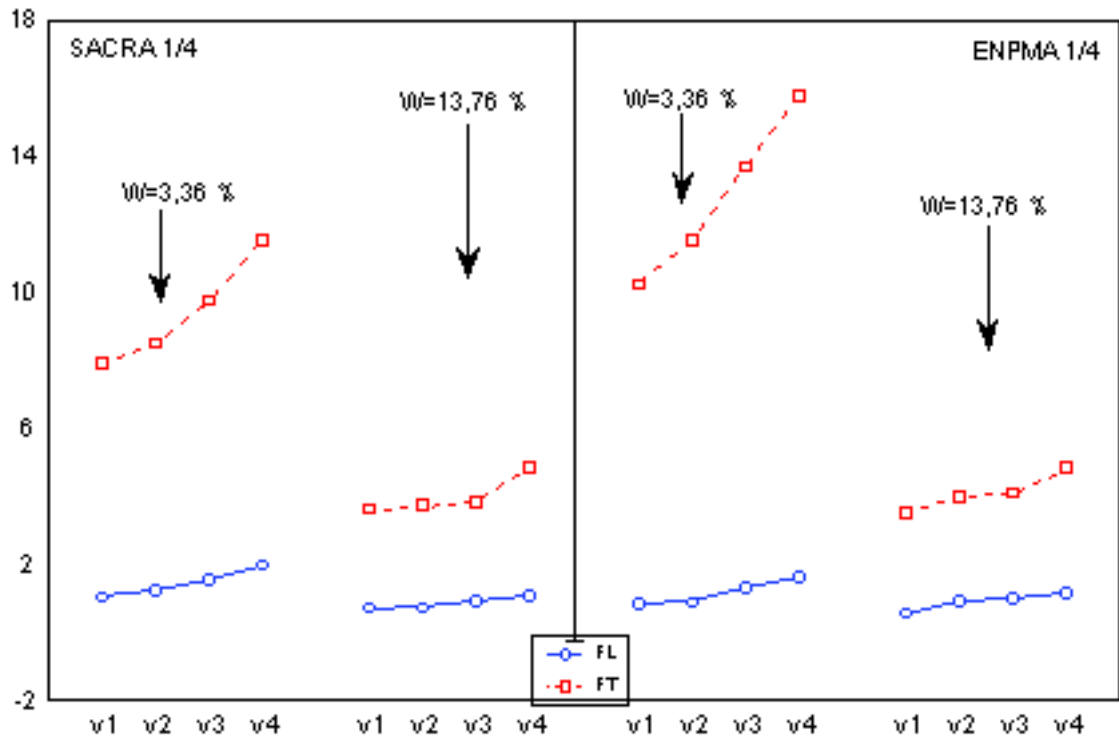
Les premières observations de ces résultats, illustrées par les représentations graphiques (figure 89 a,b et c ), nous renseignent sur l'effet de la forme, de la vitesse, de l'échelle et de l'humidité du sol sur l'effort de résistance à la traction Ft et de l'une de ses composantes FL (effort latéral).

Les valeurs de ces deux efforts sont plus importantes à l'humidité de 3,69 % et ce quelque soit l'échelle du modèle réduit. Les efforts augmentent aussi avec la vitesse d'avancement. L'augmentation de l'humidité du sol entraîne une diminution des valeurs des deux efforts.

Pour la même échelle et la même humidité du sol, les efforts Ft sont plus importants pour la forme ENPPMA, ce qui confirme les résultats précédents. Par contre les efforts latéraux sont légèrement supérieurs avec la forme SACRA. Cela s'explique par le fait que la surface active du versoir SACRA a un rayon de courbure plus petit que celui de la forme ENPMA, qui est plus plane.

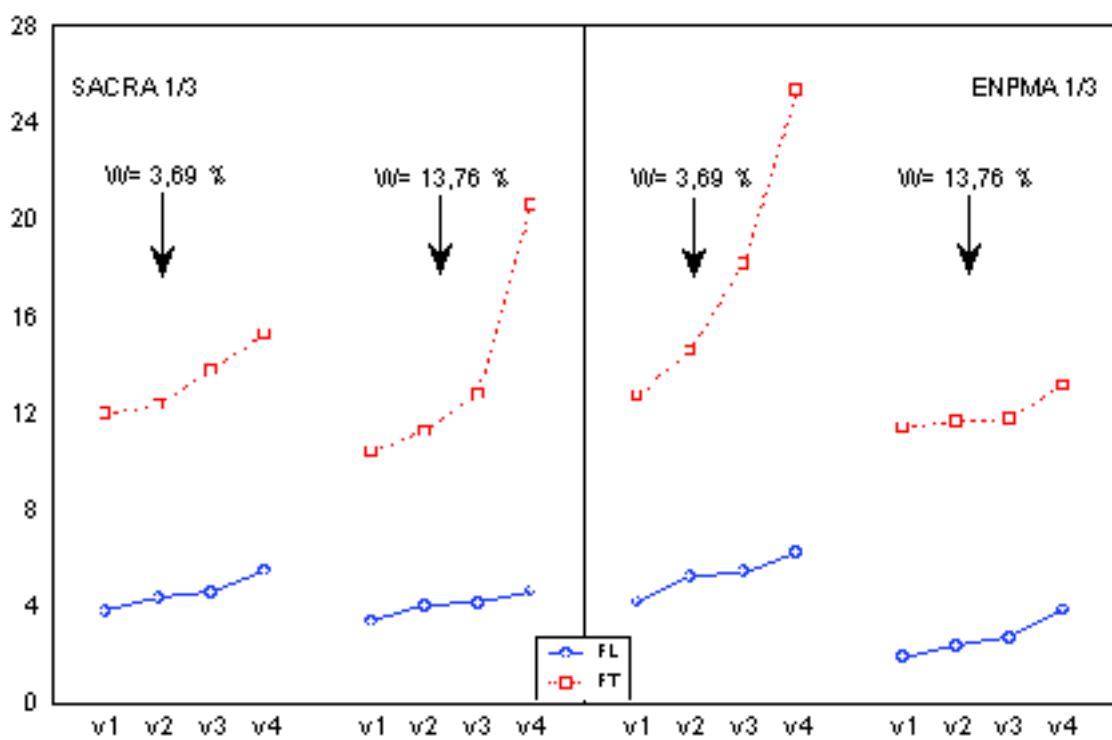
Les valeurs de l'effort latéral confirment l'importance de la forme du versoir sur l'effort de résistance à la traction. Cet effort latéral a également une importance sur la déformation de la bande de terre et plus particulièrement sur le retournement de celle-ci.

Ces remarques sont clairement illustrées par les graphes suivants :

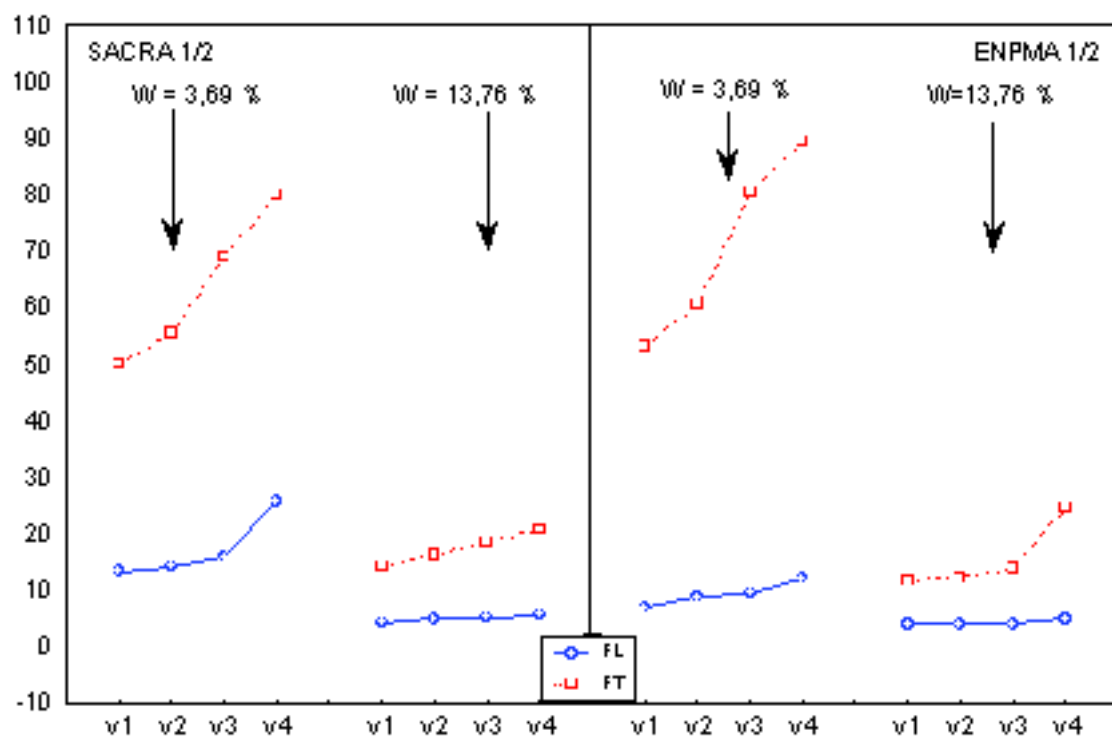


(a)

**Fig. 89** : Evolution de FL et Ft en relation avec la forme, la vitesse et l'humidité du sol (a) Echelle 1/2, (b) Echelle 1/3, (c) Echelle 1/4



(b)



(c)

#### 9.4.3.1. Analyse statistique de l'effet combiné de l'humidité du sol, de la vitesse d'avancement, de la forme sur l'effort de résistance à la traction et sa composante latérale.

Afin de pouvoir quantifier les effets de la vitesse de travail, de la forme des versoirs, de l'échelle des modèles réduits et de l'humidité du sol sur l'effort de résistance à la traction et sur sa composante latérale, une analyse statistique par la méthode des régressions multiples a été réalisée, les résultats sont repris ci-dessous :

**Pour la forme SACRA**

$$FL(\text{SACRA}) = f(v, E, W) = - 6,90 + 4,51 v + 39,45 E - 0,44 w R^2 = 0,68$$

$$Ft(\text{SACRA}) = f(v, E, W) = - 20,97 + 13,56 v + 138,31 E - 1,69 w R^2 = 0,69$$

$$Ft(\text{SACRA}) = f(FL) = 1,28 + 3,44 FL R^2 = 0,95$$

$$Ft(\text{SACRA}) = f(v, E, FL) = 1,00 - 1,85 v + 3,58 E + 3,41 FL R^2 = 0,95$$

**Pour la forme ENPMA**

$$FL(\text{ENPMA}) = f(v, E, W) = - 2,77 + 2,69 v + 21,49 E - 0,26 w R^2 = 0,81$$

$$Ft(\text{ENPMA}) = f(v, E, W) = - 17,16 + 17,49 v + 142,96 E - 2,30 w R^2 = 0,70$$

$$Ft(\text{ENPMA}) = f(FL) = - 5,45 + 7,07 FL R^2 = 0,82$$

$$Ft(\text{ENPMA}) = f(v, E, FL) = 2,23 - 3,50 v - 24,73 E + 7,80 FL R^2 = 0,83$$

Afin de pouvoir comparer les effets de la vitesse, de l'humidité, de l'échelle sur l'effort de résistance à la traction et de quantifier la valeur de cette force avec sa composante latérale, nous reproduisons ci-dessous les valeurs des coefficients de régression.



<b>Effort Ft en relation avec la vitesse, l'échelle et l'humidité</b>					
	<b>Cste</b>	<b>Vitesse</b>	<b>Echelle</b>	<b>Humidité</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>SACRA</b>	<b>-20,97</b>	<b>13,56</b>	<b>138,31</b>	<b>-1,69</b>	<b>0,69</b>
<b>ENPMA</b>	<b>-17,16</b>	<b>17,49</b>	<b>142,96</b>	<b>-2,30</b>	<b>0,70</b>

<b>Effort FL en relation avec la vitesse, l'échelle et l'humidité</b>					
	<b>Cste</b>	<b>Vitesse</b>	<b>Echelle</b>	<b>Humidité</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>SACRA</b>	<b>-6,90</b>	<b>4,51</b>	<b>39,45</b>	<b>-0,44</b>	<b>0,68</b>
<b>ENPMA</b>	<b>-2,77</b>	<b>2,69</b>	<b>21,49</b>	<b>-0,26</b>	<b>0,81</b>

<b>Effort Ft en relation avec la vitesse, l'échelle et FL</b>					
	<b>Cste</b>	<b>Vitesse</b>	<b>Echelle</b>	<b>FL</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>SACRA</b>	<b>1,00</b>	<b>-1,85</b>	<b>3,58</b>	<b>3,41</b>	<b>0,95</b>
<b>ENPMA</b>	<b>2,23</b>	<b>-3,50</b>	<b>-24,73</b>	<b>7,80</b>	<b>0,83</b>

<b>Relation Ft = f (FL)</b>			
	<b>cste</b>	<b>FL</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>SACRA</b>	<b>1,28</b>	<b>3,44</b>	<b>0,95</b>
<b>ENPMA</b>	<b>-5,45</b>	<b>7,07</b>	<b>0,82</b>

**Tableau 37** : Valeurs des coefficients des équations de régression de l'effet des conditions de travail sur l'effort de résistance à la traction et sa composante latérale.

L'analyse de ces coefficients permet de tirer les conclusions suivantes :

L'effort de résistance à la traction augmente avec la vitesse d'avancement, ce qui confirme les travaux réalisés pour l'établissement des modèles de l'effort de résistance à la traction cités précédemment.

Les coefficients affectés à l'humidité du sol sont négatifs, ce qui montre que l'augmentation de l'humidité entraîne une diminution de l'effort de résistance à la traction dans les limites de nos essais.

Les valeurs de ces coefficients montrent clairement l'effet de la forme, de la vitesse, de l'échelle et de l'humidité du sol sur la composante latérale. L'effet de la vitesse avec un coefficient de (4,51) est plus important pour la forme SACRA. L'effort latéral est aussi plus important pour cette forme, mais en valeur négative (- 0,44).

## Chapitre 10. Analyse dimensionnelle de l'effort de résistance à la traction et évaluation des efforts de résistance à la traction Ft

### 10.1. Introduction et objectifs

Si la réalisation ou la conception des prototypes à l'échelle réelle à partir des modèles réduits est technologiquement simple car, il s'agit dans ce cas de proportionnalité géométrique, l'extrapolation des résultats de l'effort de résistance à la traction obtenus à partir des modèles réduits pour les modèles de dimensions réelles est souvent difficile à réaliser car il s'agit beaucoup plus de relations dynamiques.

Pour cela l'établissement de facteurs de correction ou de rapports de proportionnalité sont nécessaires pour l'évaluation de l'effort de résistance à la traction du modèle réel à partir des efforts déterminés pour les modèles réduits.

## **10.2. Détermination des rapports des efforts de résistance à la traction**

---

Dans ce chapitre, l'analyse porte sur la recherche de la relation entre la valeur de l'effort de résistance à la traction et la taille des modèles réduits de corps de charrue à socs, afin de prédire la valeur de l'effort de résistance nécessaire pour le prototype de dimensions réelles.

Mathématiquement, cette relation pourrait s'écrire comme suit :

$$F_{1/n} = f(F_{1/n-1})$$

Où :  $F$  = Effort de résistance à la traction Ft.

$1/n-1$  = Echelle supérieure à la précédente

A cet effet, le coefficient de correction ou le rapport des efforts, noté  $R$  est à déterminer, il est égal à :

$$R = \frac{F_{1/n}}{F_{1/n-1}}$$

Pour ce qui est de notre travail, trois échelles ont été analysées, elles sont respectivement de  $1/4$ ,  $1/3$  et  $1/2$ .

Pour une raison pratique, les valeurs de l'effort, considérées dans ce qui suit, correspondent à celles obtenues avec les profondeurs maximales utilisées pour les modèles réduits. Celles –ci correspondent par analogie à celles des conditions réelles de travail. Ces valeurs sont respectivement pour les trois échelles : pour  $1/4$  0,07 m ; pour  $1/3$  0,09 m et pour  $1/2$  0,12 m. En multipliant ces valeurs par l'échelle, ces valeurs correspondent respectivement à 0,28 m ; 0,27 m et 0,24 m qui représentent les valeurs moyennes de la profondeur de travail des charrues à socs de dimensions réelles. En combinant les valeurs obtenues expérimentalement deux à deux, nous avons :

$$R_1 = \frac{F_{1/2}}{F_{1/3}} \quad R_2 = \frac{F_{1/2}}{F_{1/4}} \quad R_3 = \frac{F_{1/3}}{F_{1/4}}$$

Les résultats sont repris sur les tableaux ci-dessous :

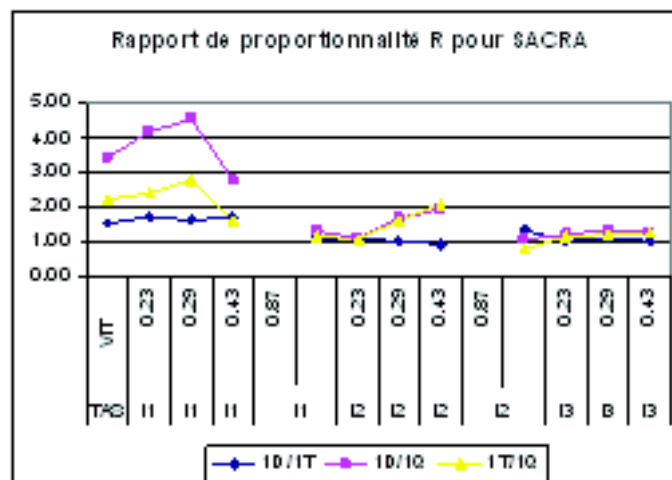
**Tableau 38: Valeurs des rapports de proportionnalité R pour SACRA**

SACRA	TAS	VIT	Effort Ft			Rapport R	
			1Q	1T	1D	1D/1T	1D/1Q
t1	0,23	8,9	19,77	30,48	1,54	3,42	2,22
t1	0,29	8,3	20,12	34,68	1,72	4,18	2,42
t1	0,43	7,97	22,25	36	1,62	4,52	2,79
t1	0,87	13,8	22,35	38,58	1,73	2,80	1,62
t2	0,23	20,88	24,64	27,5	1,12	1,32	1,18
t2	0,29	21,42	22,88	24,14	1,06	1,13	1,07
t2	0,43	21,12	34,28	35,04	1,02	1,66	1,62
t2	0,87	25,8	54,24	50,56	0,93	1,96	2,10
t3	0,23	37,86	30,38	40,69	1,34	1,07	0,80
t3	0,29	35,92	42,08	43,52	1,03	1,21	1,17
t3	0,43	36,78	44,48	49,28	1,11	1,34	1,21
t3	0,87	46,38	58,72	59,04	1,01	1,27	1,27

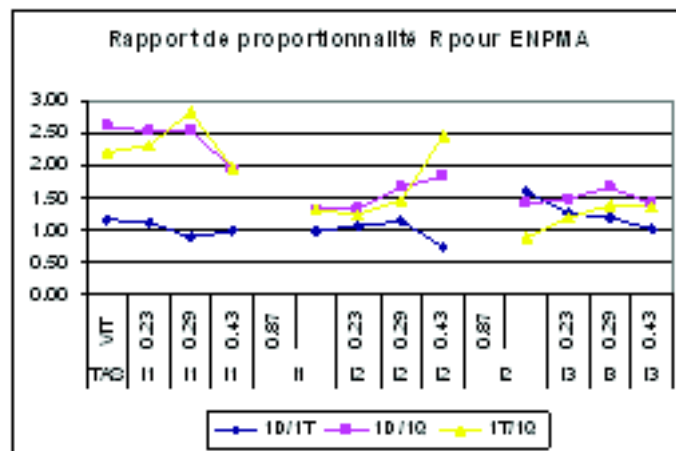
Tableau 39: Valeurs des rapports de proportionnalité R pour ENPMA

ENPMA	TAS	VIT	Effort Ft			Rapport R	
			1Q	1T	1D	1D/1T	1D/1Q
t1	0,23	9,52	21,1	24,78	1,17	2,60	2,22
t1	0,29	9,55	21,97	24,24	1,10	2,54	2,30
t1	0,43	9,97	28,2	25,5	0,90	2,56	2,83
t1	0,87	15,2	29,95	29,4	0,98	1,93	1,97
t2	0,23	21,6	28,16	28,14	1,00	1,30	1,30
t2	0,29	21,24	26,56	28,18	1,06	1,33	1,25
t2	0,43	23,7	34,4	39,36	1,14	1,66	1,45
t2	0,87	29,88	73,28	54,56	0,74	1,83	2,45
t3	0,23	39,66	35,68	56,32	1,58	1,42	0,90
t3	0,29	38,58	46,08	57,76	1,25	1,50	1,19
t3	0,43	38,7	53,6	64,32	1,20	1,66	1,39
t3	0,87	44,34	60,6	62,24	1,03	1,40	1,37

Ces résultats sont illustrés par les graphes ci-dessous :



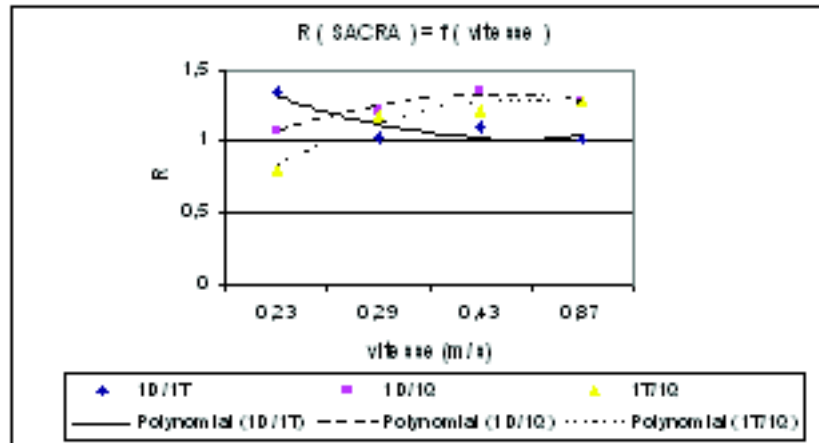
**Fig.90:** Variation des rapports de proportionnalité des efforts en relation avec la vitesse et le tassement du sol pour la forme SACRA.



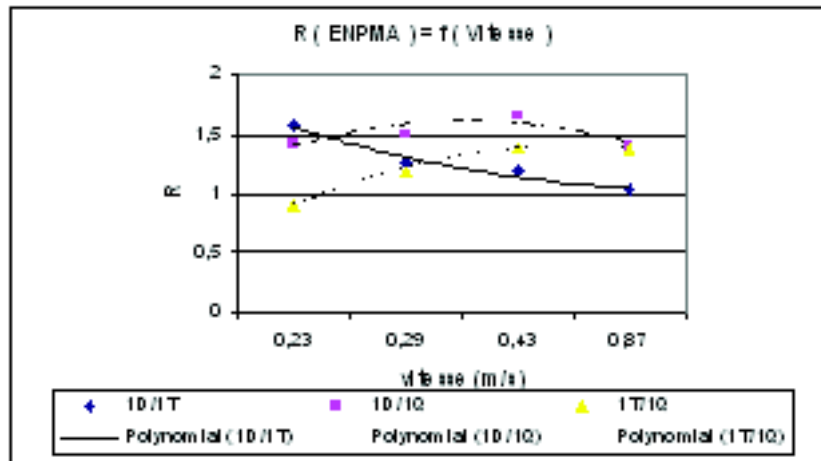
**Fig.91:** Variation des rapports de proportionnalité des efforts en relation avec la vitesse et le tassement du sol pour la forme ENPMA.

### 10.2.1. Analyse des rapports R

Afin d'approcher les conditions réelles de travail relatives à l'état du sol au moment de la réalisation des labours, seules les valeurs du rapport de proportionnalité obtenues avec le troisième tassement caractérisé par la densité apparente ( $d_a = 1,63 \text{ g / cm}^3$ ) ont été considérées.



**Fig. 92:** Rapport de proportionnalité en relation avec la vitesse pour la forme SACRA



**Fig. 93:** Rapport de proportionnalité en relation avec la vitesse pour la forme ENPMA

Les équations de régressions du rapport de proportionnalité en relation avec la vitesse pour le troisième tassement sont respectivement :

Pour SACRA

$$Rs1 (1D/1T) = 0,05 v^2 + 0,35 v + 1,61 \text{ avec } R^2 = 0,76$$

$$Rs2 (1D/1Q) = - 0,05 v^2 + 0,33 v + 0,77 \text{ avec } R^2 = 0,95$$

$$Rs3 (1T/1Q) = - 0,07 v^2 + 0,53 v + 0,36 \text{ avec } R^2 = 0,95$$

Pour ENPMA

$$Re1 (1D/1T) = 0,04 v^2 - 0,35 v + 1,89 \text{ avec } R^2 = 0,95$$

$$Re2 (1D/1Q) = - 0,08 v^2 + 0,43 v + 1,04 \text{ avec } R^2 = 0,70$$

$$Re3 (1T/1Q) = - 0,07 v^2 + 0,54 v + 0,42 \text{ avec } R^2 = 0,99$$

L'évaluation des Rapports de proportionnalité en relation avec la densité du sol et de la vitesse de travail, par la méthode des régressions multiples a donné les résultats suivants :

**Pour SACRA**

$$Rs1 = 2,52 - 0,89 d - 0,13 v \quad R^2 = 0,60$$

$$Rs2 = 7,78 - 4,18 d - 0,09 v \quad R^2 = 0,76$$

$$Rs3 = 4,02 - 1,89 d + 0,28 v \quad R^2 = 0,64$$

**Pour ENPMA**

$$Re1 = 0,82 + 0,35 d - 0,46 v \quad R^2 = 0,54$$

$$Re2 = 3,90 - 1,53 d - 0,11 v \quad R^2 = 0,65$$

$$Re3 = 3,88 - 1,84 d + 0,64 v \quad R^2 = 0,70$$

L'observation des premières relations du rapport en relation avec la vitesse, montre que le rapport de proportionnalité est relativement le même pour les deux formes et est compris entre 0,8 et 1,67.

Les équations mettant en relation les rapports avec la densité et la vitesse, montrent que l'effet de la densité du sol est plus marqué que celui de la vitesse, notamment pour la forme SACRA. Le choix du rapport de proportionnalité pour l'évaluation de l'effort de résistance sera donc déterminé en relation avec l'état du sol avant son travail. Cette deuxième série d'équations est à privilégier, car la vitesse d'avancement, lors des labours, est conditionnée par l'état du sol. En effet plus le sol est tassé moins la vitesse d'avancement est rapide.

A partir de ces relations, il est donc possible de déterminer facilement, l'effort de résistance à la traction d'un des modèles réduits connaissant la valeur de l'effort pour un modèle d'échelle différente.

$$\text{En prenant les relations : } R_1 = \frac{F_{1/2}}{F_{1/3}} \quad ; \quad R_2 = \frac{F_{1/2}}{F_{1/4}}$$

nous aurons donc :

$$\text{Pour SACRA : } \frac{F_{1/2}}{F_{1/3}} = 0,05 v^2 + 0,35 v + 1,61$$

$$\frac{F_{1/2}}{F_{1/4}} = - 0,05 v^2 + 0,33 v + 0,77$$

$$\frac{F_{1/3}}{F_{1/4}} = - 0,07 v^2 + 0,53 v + 0,36$$

$$\text{Pour ENPMA : } \frac{F_{1/2}}{F_{1/3}} = 0,04 v^2 - 0,35 v + 1,89$$

$$\frac{F_{1/2}}{F_{1/4}} = - 0,08 v^2 + 0,43 v + 1,04$$

$$\frac{F_{1/3}}{F_{1/4}} = - 0,07 v^2 + 0,54 v + 0,42$$

Dans le cas où la densité apparente du sol, avant le passage des corps de charrues, est connue, les relations suivantes seront utilisées :

$$\text{Pour SACRA : } \frac{F_{1/2}}{F_{1/3}} = 2,52 - 0,89 d - 0,13 v$$

$$\frac{F_{1/2}}{F_{1/4}} = 7,78 - 4,18 d - 0,09 v$$

$$\frac{F_{1/3}}{F_{1/4}} = 4,02 - 1,89 d + 0,28 v$$

$$\text{Pour ENPMA : } \frac{F_{1/2}}{F_{1/3}} = 0,82 + 0,35 d - 0,46 v$$

$$\frac{F_{1/2}}{F_{1/4}} = 3,90 - 1,53 d - 0,11 v$$

$$\frac{F_{1/3}}{F_{1/4}} = 3,88 - 1,84 d + 0,64 v$$

Il apparaît donc clairement à travers ces résultats qu'il n'existe pas de proportionnalité entre la taille du corps de charrue et l'effort de résistance à la traction et ce même s'il y a proportionnalité géométrique.

### 10.3. Méthodologie de recherche des rapports $R$ pour d'autres échelles, notamment pour l'échelle 1/1

---

#### 10.3.1. Analyse des combinaisons de proportionnalité géométrique.

Pour l'établissement des modèles mathématiques des efforts de résistance à la traction en relation avec les différents paramètres, les échelles ont été quantifiées respectivement par 0,25 pour l'échelle 1/4, 0,33 pour l'échelle 1/3 et 0,5 pour l'échelle 1/2.

Les combinaisons géométriques que nous avons sur les modèles réduits utilisés dans notre cas sont respectivement:

##### Combinaison 1 :

- le corps de taille 1/2 représente 2 fois le corps de taille 1/4, (multiplication). (1/2 et 1/4)
- le corps de taille 1/4 représente la moitié du corps de taille 1/2 (division).

##### Combinaison 2 :

- le corps d'échelle 1/2 représente 1.5 fois le corps de taille 1/3, (multiplication). (1/2 et 1/3)
- le corps de taille 1/3 représente 2/3 du corps de taille 1/2 (division).

##### Combinaison 3 :

- le corps de taille 1/3 représente 4/3 fois le corps de taille 1/4, (multiplication). (1/3 et 1/4)
- le corps de taille 1/4 représente 3/4 du corps de taille 1/3 (division).

**Combinaison 4 :**

- le corps de taille 1/1 représente 2 fois le corps de taille 1/2, (multiplication). (1/1 et 1/2)
- le corps de taille 1/2 représente la moitié du corps de taille 1/1. (division).

Il est à remarquer que la première et la quatrième combinaison sont équivalentes, il est donc possible, en respectant ces combinaisons, de déterminer la valeur de l'effort réel à partir de celle du modèle réduit 1 / 2 en utilisant la quatrième combinaison.

**10.3.2. Analyse de la similitude géométrique entre les modèles réduits et les prototypes**

Soit  $R_0$ , le rapport de proportionnalité de l'effort entre l'échelle 1 / 2 et l'échelle 1 / 1, sa valeur sera de :

$$R_0 = \frac{F_{1/1}}{F_{1/2}} \quad ; \quad \text{De cette relation nous pouvons écrire } F_{1/1} = R_0 \cdot F_{1/2}$$

Le problème revient donc à calculer la valeur de  $R_0$ . Pour cela l'utilisation des principes de similitude et d'analyse dimensionnelle sont nécessaires. Ces principes stipulent que : Pour tout système mécanique, les résultats des mesures expérimentales sur les modèles réduits, ne sont transposables au prototype (échelle réelle) que si les données définissant les problèmes posés ; dans notre cas, il s'agit de l'évaluation de l'effort de résistance à la traction exigée par le corps de charrue de dimensions réelles à partir des valeurs de cet effort obtenues sur des modèles réduits ; satisfont à un certain nombre de relations que nous rappelons ci-dessous :

**10.3.2.1. Rappels sur la notion de similitude**

Afin de pouvoir effectuer des extrapolations de relations mécaniques à partir de modèles réduits au prototype d'une machine, l'utilisation de la théorie de la similitude est indispensable car elle permet de déterminer les rapports de proportionnalité ou les coefficients à introduire dans la relation établie pour le modèle réduit pour obtenir celle appliquée au prototype de dimensions réelles.

**Similitude géométrique :** Il y a similitude géométrique, si les rapports de toutes les longueurs correspondantes du modèle et du prototype sont égaux.

$$\frac{L_{\text{modèle}}}{L_{\text{prototype}}} = L_r = \text{Constante} \quad \text{avec } L \text{ longueur considérée}$$

**Similitude cinématique :** si la similitude géométrique est vérifiée, les trajectoires des particules sont géométriquement semblables et les rapports des vitesses et des accélérations correspondantes du modèle et du prototype sont égaux.



$$\frac{V_{\text{modèle}}}{V_{\text{prototype}}} = \frac{\frac{L_m}{T_m}}{\frac{L_p}{T_p}} = a_v = \text{Constante} \quad \text{avec } V \text{ vitesse}$$

$$\frac{a_{\text{modèle}}}{a_{\text{prototype}}} = \frac{\frac{L_m}{T_m^2}}{\frac{L_p}{T_p^2}} = a_a = \text{Constante} \quad \text{avec } a \text{ accélération}$$

**Similitude dynamique** : dans ce cas, les forces correspondantes s'exerçant sur le modèle et sur le prototype sont équivalentes. Les forces peuvent être de plusieurs types : forces d'inertie, forces de pression ainsi que les forces de pesanteur.

$$\frac{F_{\text{modèle}}}{F_{\text{prototype}}} = \frac{M_m \cdot a_m}{M_p \cdot a_p} = \frac{\rho_m \cdot L_m^3 \cdot \frac{L_m}{T_m^2}}{\rho_p \cdot L_p^3 \cdot \frac{L_p}{T_p^2}} = \frac{\rho_m \cdot L_m^2 \cdot V_m^2}{\rho_p \cdot L_p^2 \cdot V_p^2}$$

avec  $F$  : effort ;  $M$  : masse de la matière (sol) ;  $a$  : accélération ,  $V$  : vitesse ;  $\rho$  : la densité de la matière (sol) et  $L$  : la longueur considérée.

### 10.3.2.2. Application à notre problème

Dans notre cas, il y a similitude géométrique si les rapports de toutes les longueurs correspondantes du modèle réduit et du prototype sont égaux.

Les longueurs considérées sont respectivement : la hauteur totale du corps de charrue ( $h$ ), la longueur totale entre la pointe du soc et l'extrémité du versoir ( $l$ ), la largeur de travail du corps de charrue ( $b$ ), la longueur affûtée du soc ( $L_{\text{soc}}$ ) et la longueur de l'arc de la première courbure (1<sup>ere</sup>C) comprise entre la pointe du soc et le point de hauteur minimale ( $h$ ) du corps de charrue.

Tableau 40 : Dimensions principales des modèles réduits et des prototypes (mm).

Forme	Echelle	h	l	b	Lsoc	1ereC
	Prototype	425	740	310	430	380
	1Q	63	230	90	124	105
SACRA	1T	95	355	130	203	170
	1D	139	460	154	255	220
	Prototype	440	940	350	460	425
	1Q	95	244	77	124	124
ENMA	1T	135	390	116	205	235
	1D	170	485	150	245	294

	h	l	b	Lsoc	1ereC	Moyenne	Ecart Tye
1Q/Réel	0,14	0,31	0,29	0,28	0,27	0,258	0,030
1T/Réel	0,22	0,47	0,41	0,47	0,44	0,402	0,046
1D/Réel	0,32	0,62	0,49	0,59	0,57	0,518	0,053
1Q/Réel	0,21	0,25	0,22	0,26	0,29	0,246	0,014
1T/Réel	0,30	0,41	0,33	0,44	0,55	0,406	0,044
1D/Réel	0,38	0,51	0,42	0,53	0,69	0,506	0,053

**Tableau 41** : Valeurs des rapports de similitude géométrique.

L'analyse du coefficient de variabilité (CV) donne les valeurs suivantes :

**Tableau 42** : Coefficient de variabilité du rapport de similitude

Forme	Rapport	CV %
	1Q/Réel	11,717
SACRA	1T/Réel	11,652
	1D/Réel	10,421
	1Q/Réel	5,833
ENPMA	1T/Réel	10,865
	1D/Réel	10,617

L'analyse statistique des valeurs de ces rapports de similitude montre que l'écart type est très faible et que les valeurs du coefficient de variabilité, qui représente le rapport entre l'écart type et la moyenne des valeurs, étant nettement inférieures à 20 % , cela signifie que les valeurs moyennes des rapports de similitudes sont très proches des valeurs calculées, ce qui permet donc d'accepter la similitude géométrique des différents modèles réduits avec le prototype. Les rapports de similitude sont donc respectivement :

**Tableau 43** : Rapports moyens de similitude géométrique

Forme	Rapport	Rapport de similitude
	1Q/Réel	0,258
SACRA	1T/Réel	0,402
	1D/Réel	0,518
	1Q/Réel	0,246
ENPMA	1T/Réel	0,406
	1D/Réel	0,506

L'analyse de ces valeurs montre que géométriquement, il y a similitude entre les modèles réduits et le prototype. Il est donc possible d'affirmer qu'il y a similitude cinématique et dynamique. Ce qui permet d'écrire :

$$\frac{F_{1/4}}{F_{1\lambda}} = 0,258 \quad \text{et} \quad \frac{F_{1/2}}{F_{1\lambda}} = 0,518 \quad \text{pour la forme SACRA}$$

$$\frac{F_{1/4}}{F_{1\lambda}} = 0,246 \quad \text{et} \quad \frac{F_{1/2}}{F_{1\lambda}} = 0,506 \quad \text{pour la forme ENPMA}$$

Ce qui donne :  $F_{tr\acute{e}el} = \frac{F_{t1/4}}{0.258}$  ou  $F_{tr\acute{e}el} = \frac{F_{t1/2}}{0.518}$  pour la forme SACRA

$$F_{tr\acute{e}el} = \frac{F_{t1/4}}{0.246} \quad \text{ou} \quad F_{tr\acute{e}el} = \frac{F_{t1/2}}{0.506} \quad \text{pour la forme ENPMA}$$

Les valeurs du coefficient de proportionnalité  $R_0$  sont donc respectivement :

$$R_{0S1/4} = 3,876 \quad R_{0E1/4} = 4,065$$

$$R_{0S1/2} = 1,931 \quad R_{0E1/2} = 1,976$$

Ou :  $F_{tr\acute{e}el} = 3,876 F_{t1/4}$  pour SACRA et  $F_{tr\acute{e}el} = 4,065 F_{t1/4}$  pour ENPMA

$F_{tr\acute{e}el} = 1,931 F_{t1/2}$  pour SACRA et  $F_{tr\acute{e}el} = 1,976 F_{t1/2}$  pour ENPMA

#### 10.4. Evaluation des efforts de résistance à la traction pour l'échelle réelle

L'utilisation de ces rapports de proportionnalité a donné les valeurs des efforts de résistance à la traction (en daN), pour les corps de charrue à socs de dimensions réelles, suivantes :

<b>Echelle 1/4</b>					
Tassement	Vitesse	FtSP3Q	FtEP3Q	FtSRéel	FtERéel
t3	v1	37,86	39,66	146,75	161,22
t3	v2	35,92	38,58	139,23	156,83
t3	v3	36,78	38,7	142,56	157,32
t3	v4	46,38	44,34	179,77	180,24

<b>Echelle 1/2</b>					
Tassement	Vitesse	FtSP3Q	FtEP3Q	FtSRéel	FtERéel
t3	v1	40,69	56,32	78,57	111,29
t3	v2	43,52	57,76	84,04	114,13
t3	v3	49,28	64,32	95,16	127,10
t3	v4	59,04	62,24	114,01	122,99

**Tableau 44** : Valeurs des efforts de résistance à la traction pour les corps de dimensions réelles et d'échelles 1 / 4 et 1 / 2

Il apparaît, à partir de ces résultats, que la forme SACRA consomme moins d'énergie que la forme ENPMA, ce qui est conforme aux résultats trouvés précédemment.

Il est à signaler que ces valeurs, sont celles mesurées au niveau de la surface active du corps de charrue. Nous pourrions qualifier ces efforts, d'efforts effectifs. Les forces parasites dues aux frottements des pièces de soutien comme le contre-sep et le talon ne sont pas prises en compte car les modèles réduits utilisés en sont dépourvus.

## **10.5. Conclusion**

---

Au niveau de cette partie, nous avons voulu proposer, une méthode d'analyse de l'effort de résistance à la traction en relation avec les conditions de travail et surtout de montrer l'intérêt de l'utilisation des modèles réduits et de l'évaluation des besoins en énergie des corps de charrue à socs de dimensions réelles à partir d'essais, sur des modèles réduits, au laboratoire, pour cela l'utilisation des principes de la similitude a été détaillée.

# **Chapitre 11. Modélisation de l'effort de résistance à la traction**

## **11.1. Introduction**

---

L'objectif de ce chapitre est l'établissement d'un modèle mathématique de l'effort de résistance à la traction en tenant compte de la forme des surfaces actives des corps de charrue à socs. Les modèles proposés par les chercheurs Gorjatchkin et Gee Clough, modèles les plus utilisés, tiennent principalement compte comme il a été mentionné précédemment, des caractéristiques physico - mécaniques du sol illustrées, soit par sa résistance spécifique (Gorjatchkin) ou par sa densité apparente (Gee Clough), la vitesse d'avancement, la profondeur et la largeur de travail. Cependant les caractéristiques géométriques du corps de charrue et particulièrement la forme du versoir, ont souvent été ignorées.

A cet effet, il nous a semblé nécessaire de proposer un modèle mathématique de l'effort de résistance à la traction en relation avec les principales caractéristiques géométriques de la surface active des corps de charrues, notamment ceux fabriqués en Algérie.

Les caractéristiques géométriques choisies, pour la modélisation sont respectivement :

L'angle d'entrure :  $\alpha_0$

L'angle d'attaque :  $\gamma_0$

L'angle d'inclinaison ou de courbure de la surface active :  $\theta_0$

Le rapport  $k = a / b$

Le rapport  $k_1 = L_1 / h$

Le rapport  $k_2 = d_1 / d_3$

Les rapports  $k_1$  et  $k_2$  ont été choisis afin de différencier les deux formes des surfaces actives des deux corps de charrues.

Outre ces paramètres, la vitesse d'avancement, la densité apparente du sol et l'échelle du corps de charrue ont été prises en considération vu leurs effets certains sur l'effort de résistance à la traction.

## 11.2. Méthodologie de la modélisation

---

Les principales étapes de l'établissement d'un modèle mathématique sont respectivement :

- Etablissement de l'équation générale
- Définition et caractérisation de tous les paramètres de l'équation.
- Analyse de la corrélation entre le paramètre dépendant et ceux indépendants et établissement de l'équation obtenue par régression linéaire multiple.
- Détermination des paramètres adimensionnels ( $\pi$ - termes).
- Etablissement de l'équation sans dimensions, théorème de Buckingham.
- Application du principe de Kuszewski. (Equation produit des puissances).

### 11.2.1. Etablissement de l'équation

Cette étape permet de faire ressortir tous les paramètres à mettre en relation dans le modèle à établir. C'est l'hypothèse principale du problème. Dans notre cas cette relation est de la forme :

$$F_t = f(E, d, v, \alpha_0, \gamma_0, \theta_0, k, k_1, k_2, g)$$

### 11.2.2. Définition et caractérisation des paramètres de l'équation

Cette étape est fondamentale pour l'analyse dimensionnelle, elle met en évidence les unités et surtout les dimensions des paramètres introduits dans la relation prédéfinie.

Grandeurs	symboles	unités	dimensions
<b>- Paramètre dépendant :</b>			
Effort de résistance à la traction .....	Ft	daN	[M.L.T <sup>-2</sup> ]
<b>- Paramètres indépendants :</b>			
Vitesse d'avancement .....	v	m / s	[L.T <sup>-1</sup> ]
Densité apparente .....	d	g / cm <sup>3</sup>	[M.L <sup>-3</sup> ]
Echelle .....	E	-	-
<b>- Angles constructifs :</b>			
Angle d'enture.....	$\alpha_0$	radians	-
Angle d'attaque .....	$\gamma_0$	radians	-
Angle d'inclinaison .....	$\theta_0$	radians	-
<b>- Rapport des longueurs :</b>			
Profondeur / largeur de travail .....	k	-	-
Longueur maximale du corps / hauteur maximale.....	k1	-	-
Largeur arrière du versoir / largeur au point de Courbure maximale du versoir.....	k2	-	-
accélération terrestre .....	g	m / s <sup>2</sup>	[M.T <sup>-2</sup> ]

### 11.2.3. Analyse de la corrélation entre l'effort de résistance à la traction, les conditions de travail et les caractéristiques géométriques des surfaces actives.

#### 11.2.3.1. Etablissement de la relation : Ft = f(E, da, v, alpha, teta, k, k1, k2)

Cette analyse est nécessaire pour faire ressortir l'ordre d'importance des effets des différents paramètres étudiés sur l'effort de résistance à la traction. Pour cela, l'analyse statistique par la méthode de la régression linéaire multiple est celle choisie. Les paramètres introduits dans l'analyse statistique pour la modélisation mathématique de l'effort de résistance à la traction sont respectivement :

- L'échelle des modèles réduits (E)
- La vitesse de travail (v)
- La densité du sol (da)
- L'angle d'enture alpha ( $\alpha_0$ )
- L'angle de courbure teta ( $\theta_0$ )
- Le rapport k = a (profondeur de travail) / b (largeur de travail)
- Le rapport k1 = L1/h
- Le rapport k2 = d1/d3

Etablissement de la relation : Ft = f(E, da, v, alpha, teta, k, k1, k2 )

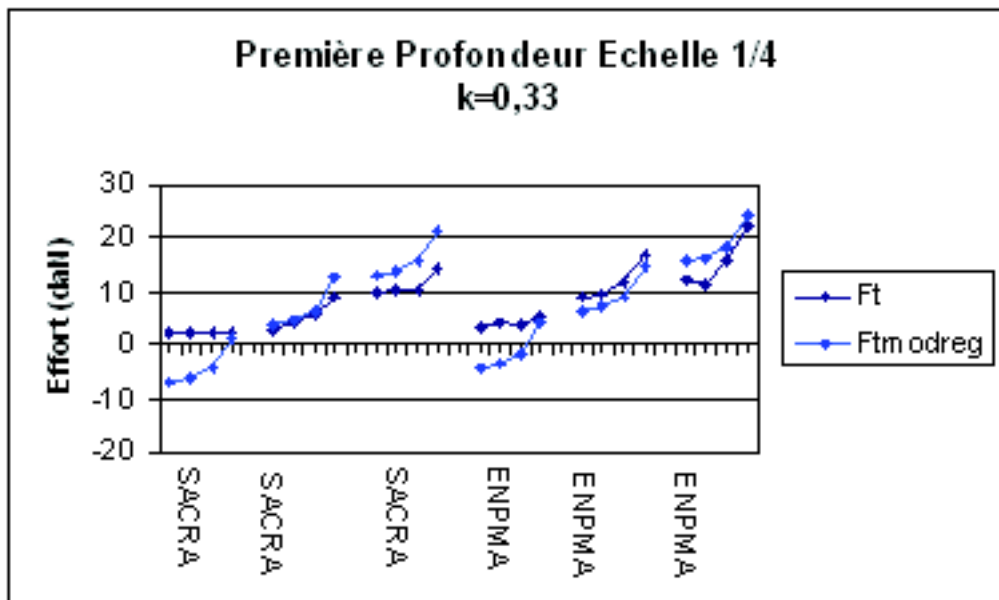
L'équation obtenue est donc:

$$F_t = -39,71 + 54,86 E + 32,83 da + 13,36 v + 84,33 \alpha_0 - 222,45 \theta_0 + 30,75 k + 21,84 k_1 + 13,95 k_2$$

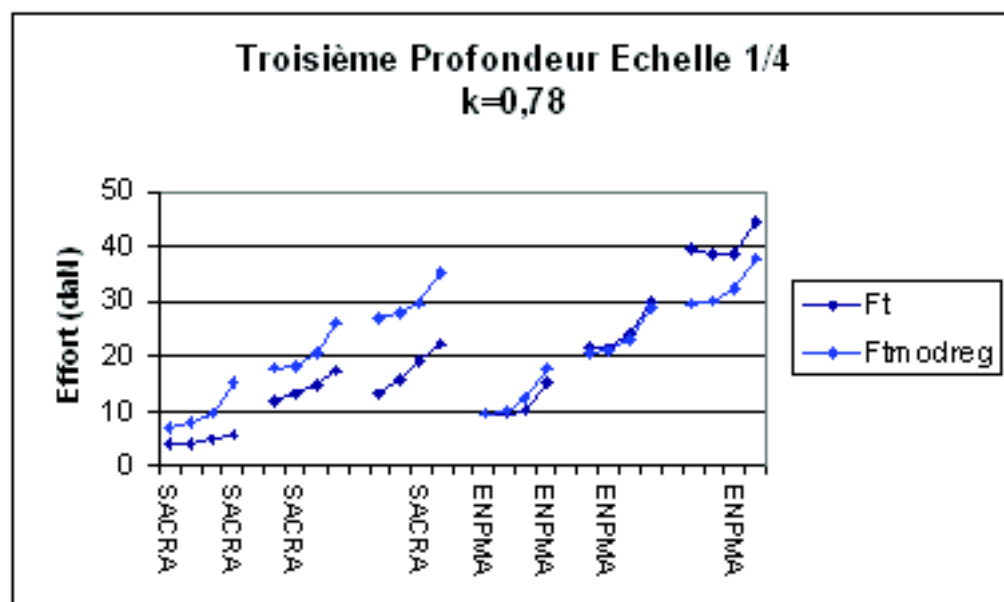
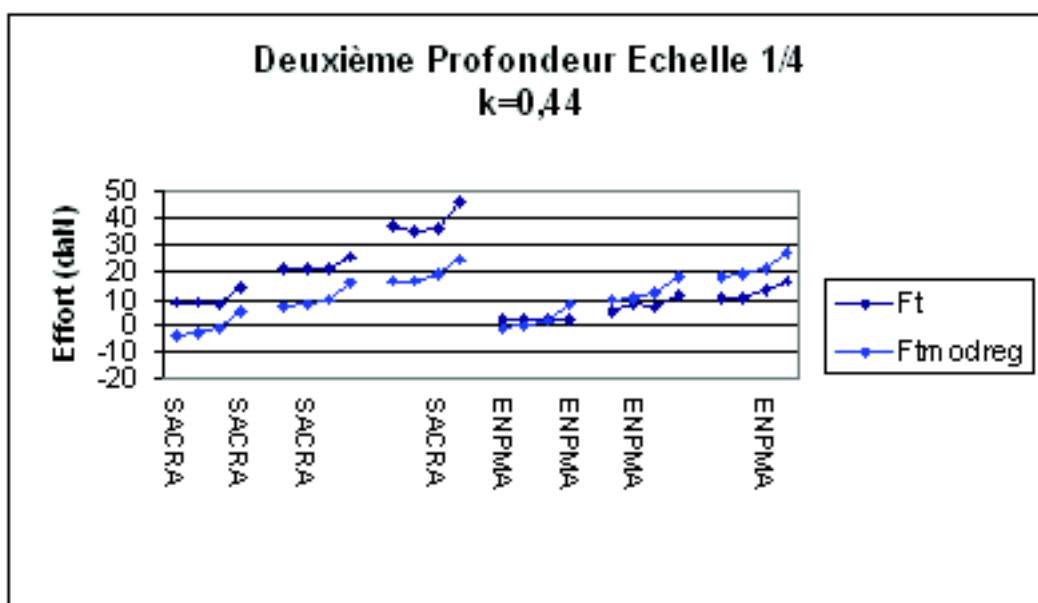
L'analyse de cette relation permet de classer dans l'ordre d'importance de l'effet de chacun des paramètres étudiés sur l'effort de résistance à la traction. Nous remarquerons que le coefficient de l'angle d'inclinaison a la plus grande valeur absolue (222,45), ceci montre l'importance de l'effet de la forme de la surface active sur l'effort de résistance à la traction  $F_t$ .

### 11.2.3.2. Analyse comparative des valeurs mesurées de $F_t$ et celles calculées à partir de la relation obtenue par régression multiple.

Afin de vérifier la validité de cette relation, une analyse comparative entre les valeurs de l'effort de résistance à la traction obtenues sur canal ( $F_{tmesuré}$ ) et celles calculées ( $F_{tmodreg}$ ) à l'aide du modèle de régression a été réalisée. Les résultats (annexe 3) sont illustrés par les représentations graphiques dans les pages suivantes :



**Fig.94** : Comparaison valeurs mesurées et valeurs calculées de l'effort de résistance à la traction pour l'échelle 1 / 4





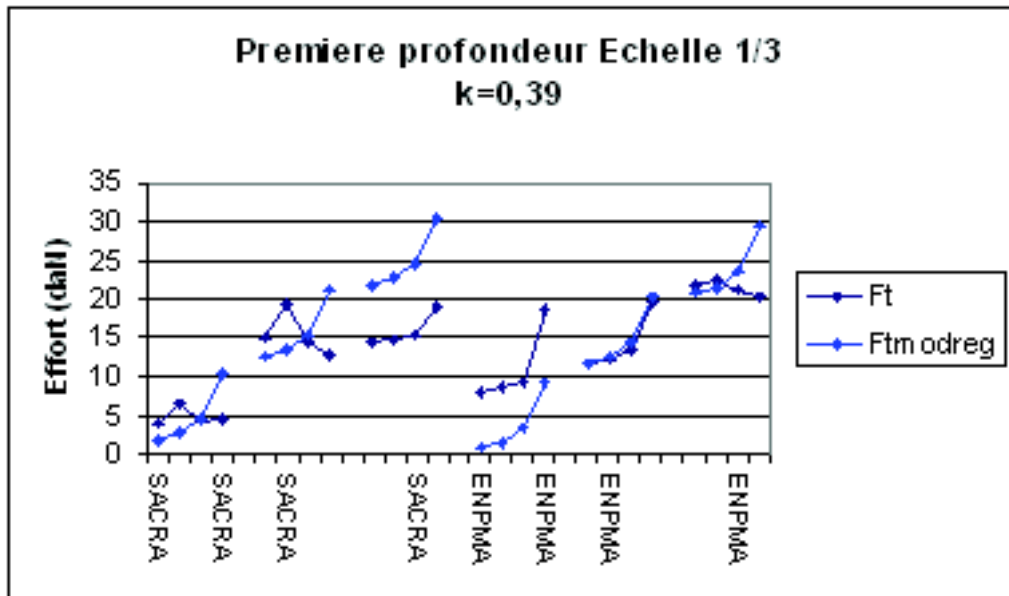
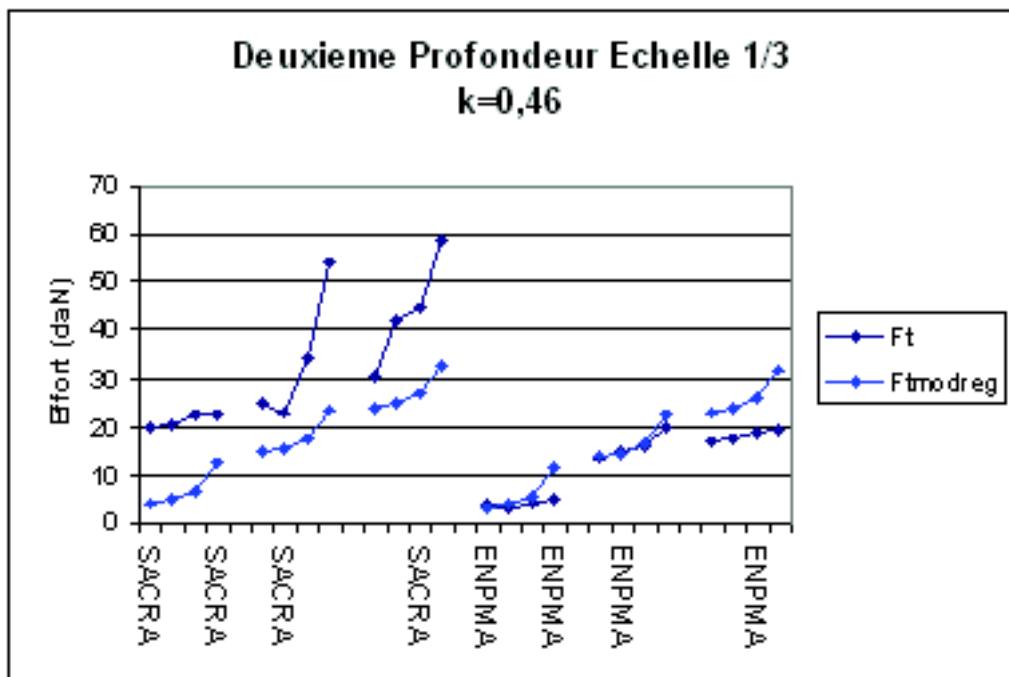
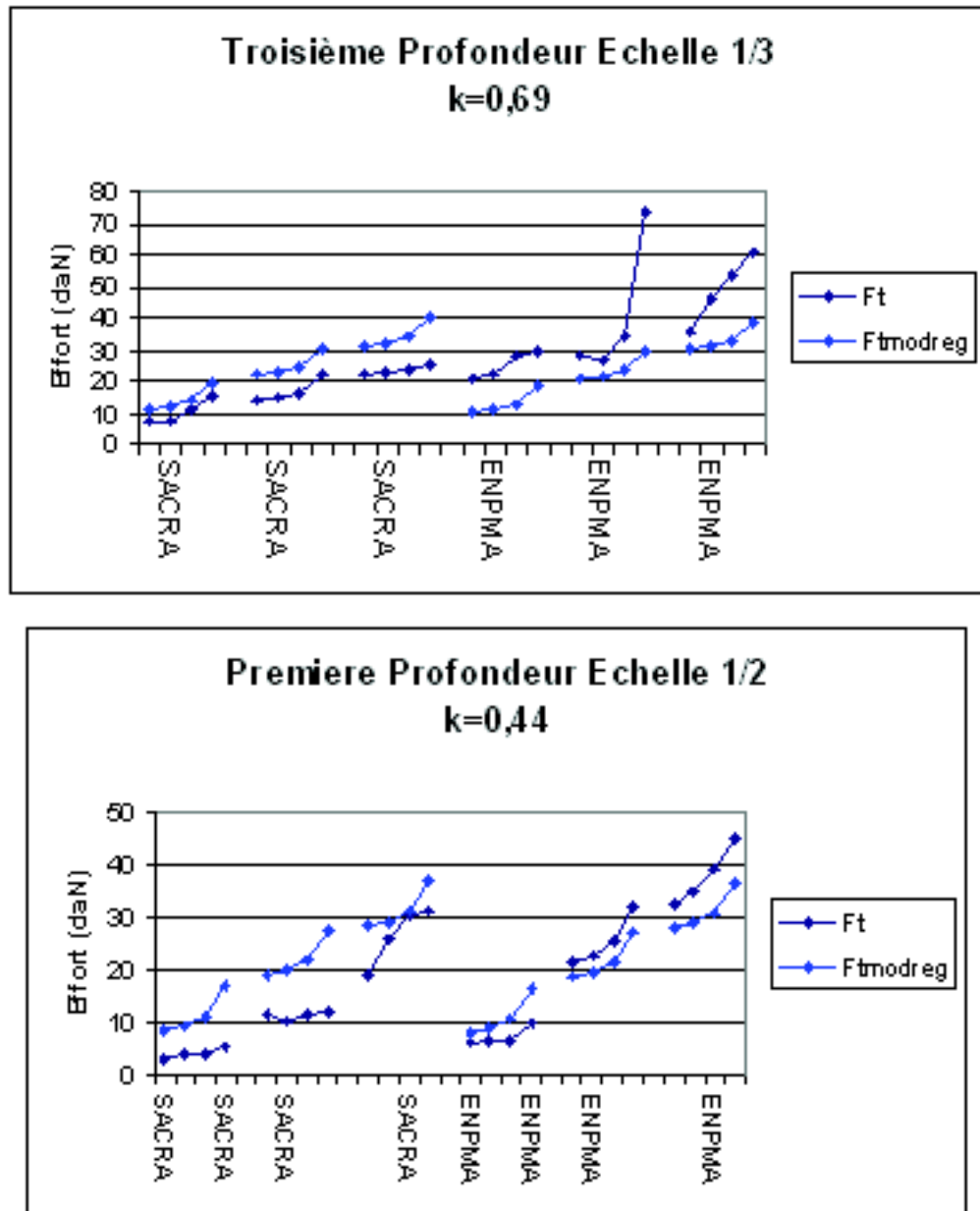
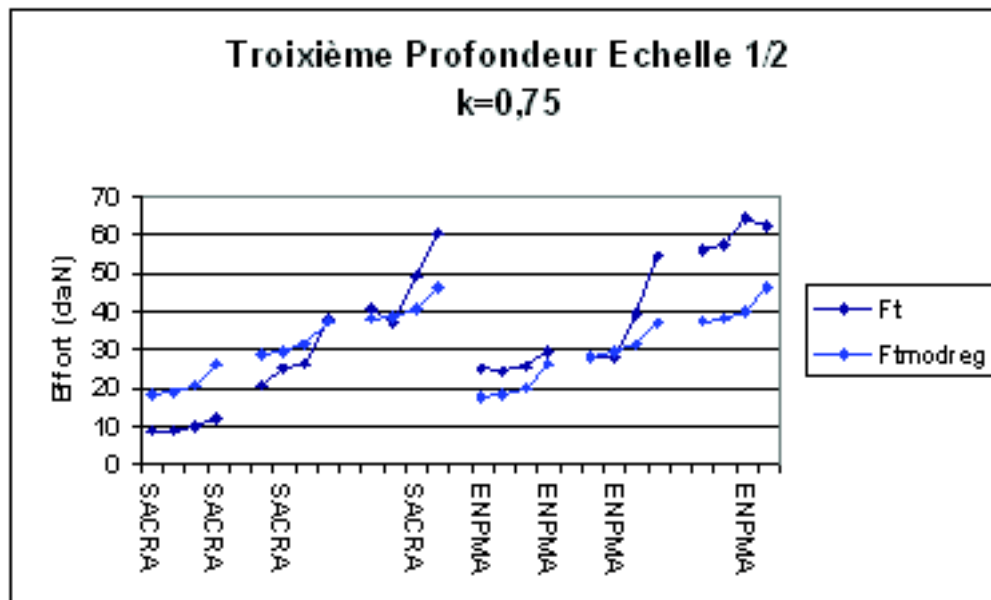
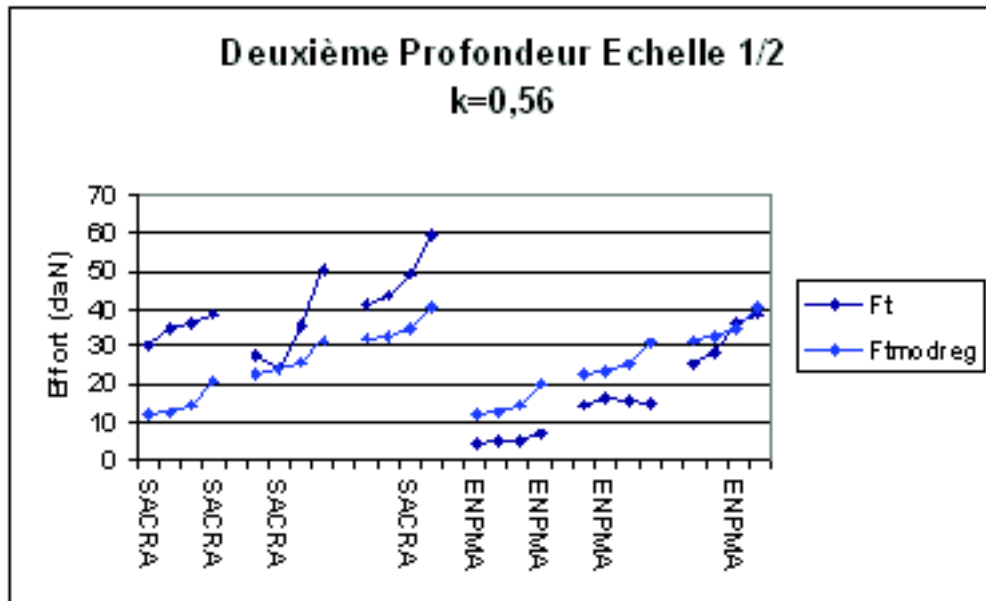


Fig. 95 : Comparaison valeurs mesurées et valeurs calculées de l'effort de résistance à la traction pour l'échelle 1/3





**Fig.96:** Comparaison valeurs mesurées et valeurs calculées de l'effort de résistance à la traction pour l'échelle 1 / 2



Ces représentations graphiques montrent que les résultats de l'effort de résistance calculés avec l'équation de régression multiple ont la même allure que les résultats mesurés sur canal. Les courbes obtenues montrent aussi l'effet positif de la densité apparente du sol et de la vitesse de travail sur l'effort de résistance à la traction.

Nous noterons cependant que la relation obtenue par régression linéaire multiple n'est dimensionnellement pas homogène. Cette relation ne reste valable que dans les conditions où se sont déroulées nos essais.

Pour cette raison, l'établissement d'un modèle mathématique dimensionnellement homogène de l'effort de résistance à la traction en relation avec les caractéristiques géométriques de la surface active et des conditions de travail comme la densité apparente du sol et de la vitesse de travail, est nécessaire.

### 11.2.4. Détermination des paramètres adimensionnels (- termes)

Selon le théorème de Vachy – Buckingham (Langhaar H. L. 1954), la relation qui donne le nombre de paramètres adimensionnels est :

$n - r =$  nombre de paramètres adimensionnés (Pi).

Où :

$n =$  nombre de grandeurs physiques ( $F_t, d_a, v, E, k, k_1, k_2, \alpha_0, \theta_0, g$ ) = 10

$r =$  nombre de dimensions fondamentales (M, L et T) = 3

donc :

$$n - r = 10 - 3 = 7 \text{ est le nombre de } \pi \text{ à déterminer.}$$

Les autres paramètres:  $E, k, k_1, k_2, \alpha_0, \theta_0$  sont des nombres adimensionnés, l'accélération de gravité  $g$  est une constante universelle.

La méthode des indices permet donc, d'écrire de façon générale, la relation produit de puissances qui est de la forme :

$$\pi = F_t^a \cdot v^b \cdot b^c$$

Les paramètres ( $E, k, k_1, k_2, \alpha_0, \theta_0$ ) ne sont pas mis en évidence car ils sont adimensionnés.

Ce qui donne l'équation aux dimensions suivante :

$$\pi = [F]^a \cdot [L T^{-1}]^b \cdot [L]^c$$

$$\pi = [F]^a \cdot [L]^{b+c} \cdot [T]^{-b}$$

Pour que  $\pi$  soit un nombre adimensionnel, il faut que les exposants des paramètres indépendants soient égaux à "zéro".

La dimension  $[F]$  est celle de l'effort de résistance à la traction, paramètre **dépendant**, est égale à  $[M.L.T^{-2}]$ . Ce paramètre étant celui étudié (dépendant), nous lui attribuons un exposant  $a = 1$

Ce qui donne :

$$b + c = 0$$

$$c = 0 \text{ d'où } b = 0$$

Les paramètres adimensionnés sont donc respectivement :

$$\pi_1 = \frac{F_t}{d \cdot g \cdot b^3} ; \pi_2 = \frac{v^2}{g b} ; \pi_3 = k ; \pi_4 = k_1, \pi_5 = k_2$$

$$\pi_6 = \alpha_0 ; \pi_7 = \theta_0$$

Avec:

$$\pi_1 = \frac{M.L.T^{-2}}{M.L^{-3}.L.T^{-2}.L^3} \quad \text{ou : } \frac{F}{F.L^{-3}.L^3} = 1$$

$$\pi_2 = \frac{v^2}{gb} = \frac{(L.T^{-1})^2}{L.T^{-2}.L} = 1$$

$$\pi_3 = k = \frac{L}{L} = 1 \quad \pi_4 = k_1 = \frac{L}{L} = 1 \quad \pi_5 = k_2 = \frac{L}{L} = 1$$

### 11.2.5. Etablissement de l'équation sans dimensions, théorème de Buckingham.

Une fois ces termes définis, la relation de Buckingham sera de la forme :

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7)$$

en remplaçant les  $\pi$  termes par leurs expressions définies ci-dessus, on obtient :

$$\frac{Ft}{da.g.b^3} = f\left(\frac{v^2}{gb}, k, k_1, k_2, \alpha_0, \theta_0\right)$$

D'après Kuszewski, (1982) cette équation s'écrit aussi sous la forme d'un produit de puissances :

$$\frac{Ft}{da.g.b^3} = \left(\frac{v^2}{gb}\right)^a . (k)^b . (k_1)^c . (k_2)^d . (\alpha_0)^e . (\theta_0)^i . e^{Cste}$$

Le problème revient donc à déterminer les valeurs des exposants: a, b, c, d, e, f et la constante, pour cela l'utilisation des propriétés des logarithmes est nécessaire:

Posons :

$$x = \frac{Ft}{da.g.b^3}, \quad y = \frac{v^2}{gb}, \quad z = k, \quad s = k_1, \quad t = k_2, \quad u = \alpha_0, \quad w = \theta_0$$

Avec :

$$X = \ln x, \quad Y = \ln y, \quad Z = \ln k, \quad S = \ln k_1, \quad T = \ln k_2, \quad U = \ln \alpha_0, \quad W = \ln \theta_0$$

Le modèle à étudier prendra la forme de :

$$X = Cste + a.Y + b.Z + c.S + d.T + e.U + f.W$$

Cette équation est obtenue par régression linéaire multiple. Après suppression des logarithmes, par intégration, nous obtiendrons le modèle mathématique de l'effort de résistance à la traction  $F_t$  qui sera de la forme :

$$x = e^{Cste} \cdot y^a \cdot z^b \cdot s^c \cdot t^d \cdot u^e \cdot W^f$$

ce qui donne :

$$\frac{F_t}{d_a \cdot g \cdot b^3} = e^{Cste} \cdot \left(\frac{v^2}{g \cdot b}\right)^a \cdot (k)^b \cdot (k_1)^c \cdot (k_2)^d \cdot (\alpha_0)^e \cdot (\theta_0)^f$$

Le modèle mathématique de l'effort de résistance à la traction  $F_t$  sera donc de la forme:

$$F_t = e^{Cste} \cdot \left(\frac{v^2}{g \cdot b}\right)^a \cdot (k)^b \cdot (k_1)^c \cdot (k_2)^d \cdot (\alpha_0)^e \cdot (\theta_0)^f \cdot d_a \cdot g \cdot b^3$$

Le problème revient donc à déterminer la valeur de tous ces exposants. Pour cela l'utilisation des propriétés des logarithmes s'impose.

### 11.2.6. Analyse de la corrélation entre les paramètres adimensionnés

Cette analyse a pour objet, la détermination des puissances des paramètres adimensionnés, pour cela l'utilisation des propriétés des logarithmes est nécessaire.

$$\ln(F_t/d_a \cdot g \cdot b^3) = f(\ln(v^2/g \cdot b), \ln(E), \ln(\alpha_0), \ln(\theta_0), \ln(k), \ln(k_1), \ln(k_2))$$

L'équation de régression multiple obtenue est :

$$\ln(F_t/d_a \cdot g \cdot b^3) = -14,54 + 0,15 \ln(v^2/g \cdot b) + 4,13 \ln(E) + 5,94 \ln(\alpha_0) - 16,01 \ln(\theta_0) + 0,98 \ln(k) + 12,98 \ln(k_1) + 2,74 \ln(k_2)$$

Le modèle obtenu est donc:

$$F_t = e^{-14,54} \cdot \left(\frac{v^2}{g \cdot b}\right)^{0,15} \cdot E^{4,13} \cdot \alpha_0^{5,94} \cdot \theta_0^{-16,01} \cdot k^{0,98} \cdot (k_1)^{12,98} \cdot (k_2)^{2,74} \cdot g \cdot d \cdot b^3$$

Pour l'extrapolation de ce modèle aux corps de charrue de dimensions réelles, cette relation sera affectée des coefficients de proportionnalité établis précédemment.

## 11.3. Application du modèle aux dimensions réelles du corps de charrue.

La relation ci-dessus est déterminée à partir des modèles réduits, afin de prévoir la valeur de l'effort pour la taille réelle, cette relation sera affectée du rapport  $R_0$  défini dans le chapitre précédent.

Le modèle final est donc:

$$F_t = R_0 \cdot e^{-14.54} \cdot \left( \frac{v^2}{g \cdot b} \right)^{0.15} \cdot E^{4.13} \cdot \alpha^{5.94} \cdot \theta^{-16.01} \cdot k^{0.98} \cdot (k_1)^{12.98} \cdot (k_2)^{2.74} \cdot g \cdot d \cdot b^3$$

Les valeurs de  $R_0$  sont celles définies précédemment, et que nous rappelons ci-dessous :

Si le modèle réduit utilisé est d'échelle 1 / 4,  $R_0 = 3,876$  pour la forme SACRA, il est de 4,065 pour la forme ENPMA. Si par contre le modèle utilisé est d'échelle 1 / 2, les valeurs de  $R_0$  seront respectivement de  $R_0 = 1,931$  pour la forme SACRA et de 1,976 pour la forme ENPMA.

Les différents paramètres de ce modèle sont facilement déterminés. Nous constaterons aussi que les valeurs des exposants des différents paramètres confirment l'ordre de l'importance de leurs effets sur l'effort de résistance à la traction.

Deux cas sont à considérer pour l'analyse de ce modèle :

Si ce modèle est utilisé par un agronome, pour l'évaluation de l'effort nécessaire pour la réalisation du labour, certains des paramètres de la relation sont constants (paramètres constructifs) tels que les angles, le paramètre  $k$  (profondeur / largeur), les paramètres  $k_1$  et  $k_2$ .

L'agronome s'intéressera au choix de la vitesse de travail, la densité du sol afin de choisir correctement les meilleures conditions de travail pour réduire les besoins en énergie lors de la réalisation des labours.

Si par contre, cette relation est utilisée par un concepteur d'outils aratoires, ce dernier s'intéressera plus particulièrement aux paramètres constructifs pour concevoir, évidemment en tenant compte des conditions de travail et des exigences agro techniques des labours, des charrues adaptées à ces conditions tout en recherchant la forme la plus adéquate pour répondre aux besoins de l'agriculteur. L'objectif de l'ingénieur concepteur sera donc de minimiser cette équation en recherchant les paramètres constructifs optimaux.

Partant de ces remarques, le modèle proposé peut être décomposé en deux parties : la première relative aux conditions de travail (vitesse de travail et densité apparente du sol) et notée  $C_T$  qui a pour valeur :

$$e^{-14.54} \cdot \left( \frac{v^2}{g \cdot b} \right)^{0.15} \cdot g \cdot d_a = C_T$$

la deuxième relative aux caractéristiques géométriques de la surface active, notée  $C_G$  qui a pour valeur :

$$\alpha^{5.94} \cdot \theta^{-16.01} \cdot \left( \frac{a}{b} \right)^{0.98} \cdot (k_1)^{12.98} \cdot (k_2)^{2.74} \cdot b^3 = C_G$$

La relation finale sera donc :

$$F_t = R_0 \cdot C_T \cdot C_G$$

**Contribution à la modélisation interface outils aratoires sol Optimisation de la forme et de l'effort de résistance à la traction des corps de charrues à socs et des outils à dents**

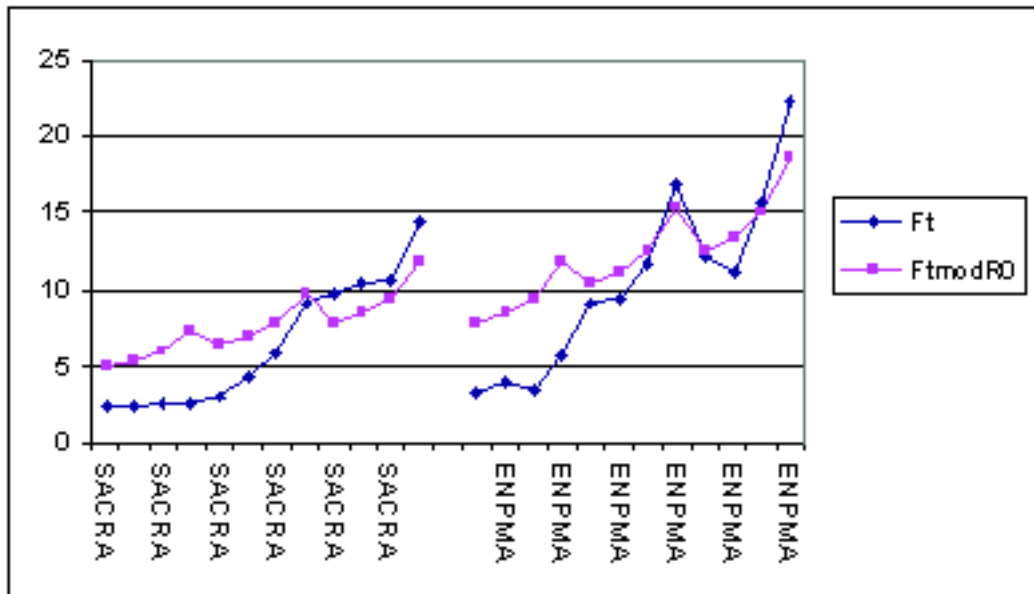
---

Afin de vérifier la fiabilité du modèle une analyse comparative des valeurs de l'effort de résistance à la traction mesurées sur canal avec celles calculées à partir du modèle a été réalisé, les résultats sont repris ci-dessous : les résultats numériques sont suivis par une représentation graphique correspondante.

**Tableau 45 : Valeurs comparées des efforts mesurés (F<sub>mes</sub>) et calculés (F<sub>mod</sub>) pour la première profondeur de travail, en relation avec la densité apparente (d<sub>a</sub>) et la vitesse (v) - Echelle 1 / 4**

<b>Forme</b>	<b>d<sub>a</sub></b>	<b>v</b>	<b>F<sub>mes</sub></b>	<b>F<sub>mod</sub></b>
SACRA	1,02	0,23	2,3	4,91
SACRA	1,02	0,29	2,4	5,26
SACRA	1,02	0,43	2,45	5,92
SACRA	1,02	0,87	2,52	7,32
SACRA	1,35	0,23	2,94	6,50
SACRA	1,35	0,29	4,26	6,97
SACRA	1,35	0,43	5,82	7,84
SACRA	1,35	0,87	9,06	9,69
SACRA	1,63	0,23	9,78	7,85
SACRA	1,63	0,29	10,5	8,41
SACRA	1,63	0,43	10,56	9,47
SACRA	1,63	0,87	14,34	11,70
ENPMA	1,02	0,23	3,25	7,84
ENPMA	1,02	0,29	3,95	8,41
ENPMA	1,02	0,43	3,53	9,46
ENPMA	1,02	0,87	5,55	11,69
ENPMA	1,35	0,23	9,18	10,38
ENPMA	1,35	0,29	9,48	11,13
ENPMA	1,35	0,43	11,64	12,53
ENPMA	1,35	0,87	16,86	15,48
ENPMA	1,63	0,23	12,06	12,54
ENPMA	1,63	0,29	11,16	13,44
ENPMA	1,63	0,43	15,66	15,12
ENPMA	1,63	0,87	22,4	18,69



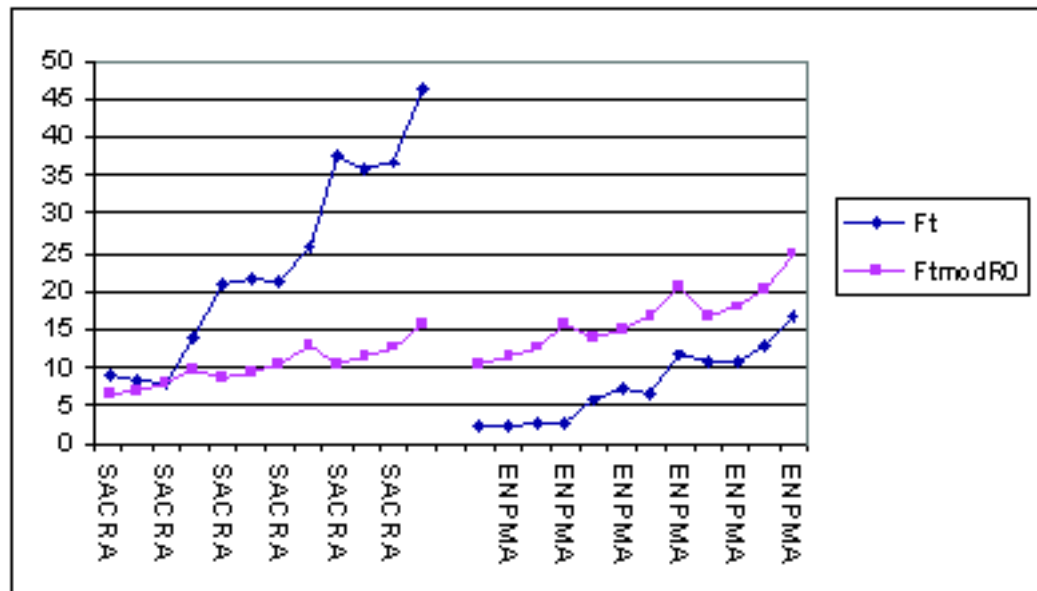


**Fig.97** : Evolution comparées des efforts mesurés ( $F_{tmes}$ ) et calculés ( $F_{tmod}$ ) pour la première profondeur de travail, en relation avec la densité apparente ( $d_a$ ) et la vitesse ( $v$ ). (Echelle 1 / 4)

**Tableau 46** : Valeurs comparées des efforts mesurés ( $F_{tmes}$ ) et calculés ( $F_{tmod}$ ) pour la deuxième profondeur de travail, en relation avec la densité apparente ( $d_a$ ) et la vitesse ( $v$ ) - Echelle 1 / 4

**Contribution à la modélisation interface outils aratoires sol Optimisation de la forme et de l'effort de résistance à la traction des corps de charrues à socs et des outils à dents**

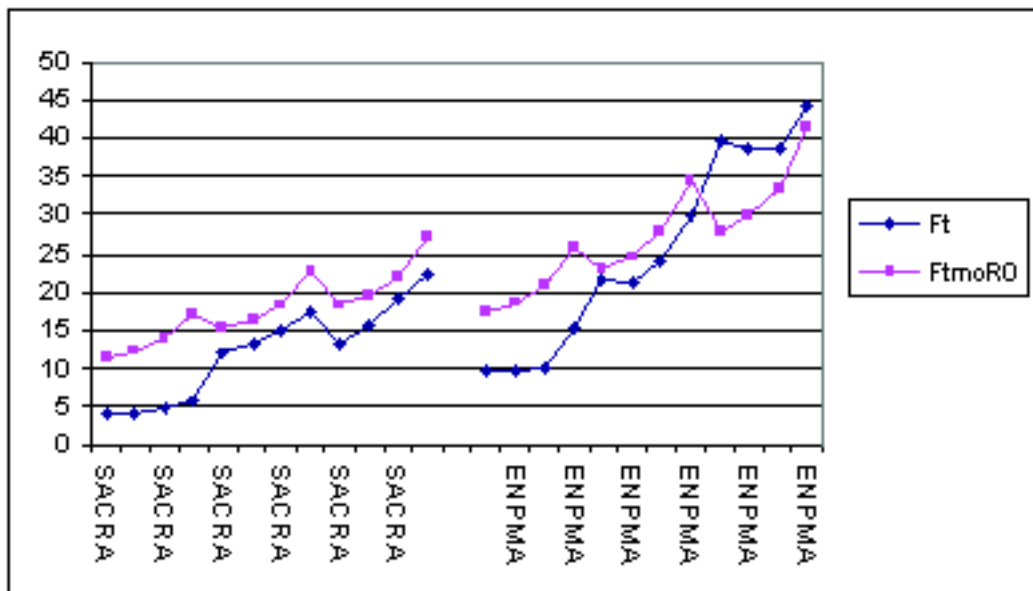
Forme	$d_a$	$v$	Ftmes	Ftmod
SACRA	1,02	0,23	8,9	6,51
SACRA	1,02	0,29	8,3	6,98
SACRA	1,02	0,43	7,97	7,85
SACRA	1,02	0,87	13,8	9,70
SACRA	1,35	0,23	20,88	8,62
SACRA	1,35	0,29	21,42	9,24
SACRA	1,35	0,43	21,12	10,39
SACRA	1,35	0,87	25,8	12,84
SACRA	1,63	0,23	37,86	10,40
SACRA	1,63	0,29	35,92	11,15
SACRA	1,63	0,43	36,78	12,55
SACRA	1,63	0,87	46,38	15,50
ENPMA	1,02	0,23	2,37	10,40
ENPMA	1,02	0,29	2,47	11,15
ENPMA	1,02	0,43	2,6	12,55
ENPMA	1,02	0,87	2,77	15,50
ENPMA	1,35	0,23	5,52	13,76
ENPMA	1,35	0,29	7,44	14,76
ENPMA	1,35	0,43	6,54	16,61
ENPMA	1,35	0,87	11,7	20,52
ENPMA	1,63	0,23	10,5	16,62
ENPMA	1,63	0,29	10,62	17,82
ENPMA	1,63	0,43	12,9	20,05
ENPMA	1,63	0,87	16,44	24,77



**Fig.98** : Evolution comparées des efforts mesurés (Ftmes) et calculés (Ftmod) pour la deuxième profondeur de travail, en relation avec la densité apparente ( $d_a$ ) et la vitesse ( $v$ ). (Echelle 1 / 4)

Tableau 47: Valeurs comparées des efforts mesurés (Ftmes) et calculés (Ftmod) pour la troisième profondeur de travail, en relation avec la densité apparente ( $d_a$ ) et la vitesse (v) - Echelle 1 / 4

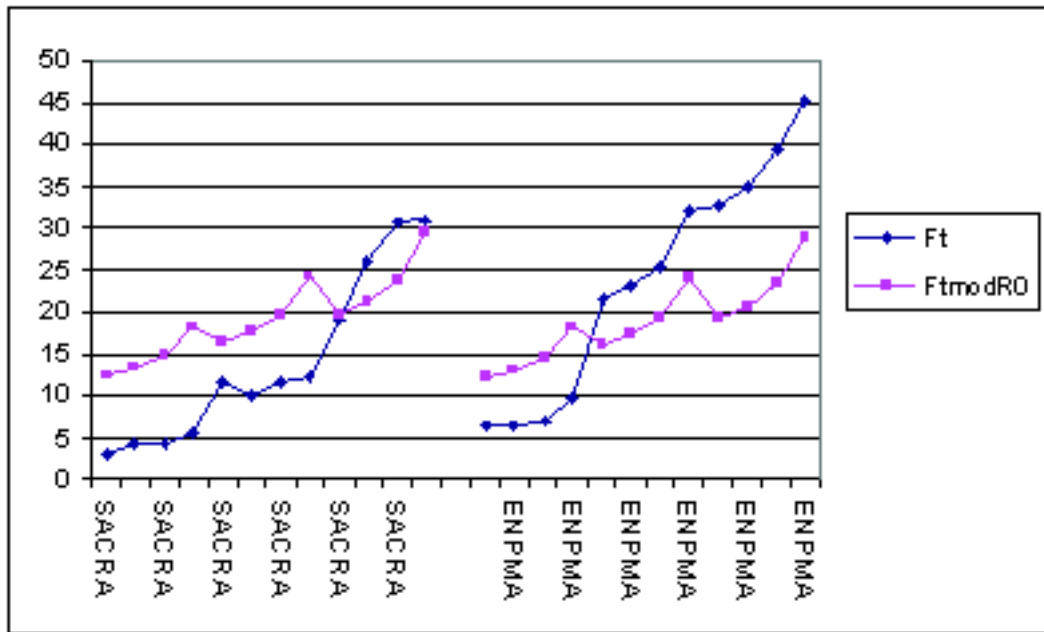
Forme	$d_a$	v	Ftmes	Ftmod
SACRA	1,02	0,23	3,9	11,41
SACRA	1,02	0,29	4,1	12,23
SACRA	1,02	0,43	4,75	13,76
SACRA	1,02	0,87	5,67	17,00
SACRA	1,35	0,23	11,88	15,10
SACRA	1,35	0,29	13,14	16,19
SACRA	1,35	0,43	14,88	18,22
SACRA	1,35	0,87	17,18	22,50
SACRA	1,63	0,23	13,08	18,23
SACRA	1,63	0,29	15,54	19,54
SACRA	1,63	0,43	19,2	21,99
SACRA	1,63	0,87	22,26	27,17
ENPMA	1,02	0,23	9,52	17,38
ENPMA	1,02	0,29	9,55	18,63
ENPMA	1,02	0,43	9,97	20,97
ENPMA	1,02	0,87	15,2	25,90
ENPMA	1,35	0,23	21,6	23,00
ENPMA	1,35	0,29	21,24	24,66
ENPMA	1,35	0,43	23,7	27,75
ENPMA	1,35	0,87	29,88	34,28
ENPMA	1,63	0,23	39,66	27,77
ENPMA	1,63	0,29	38,58	29,77
ENPMA	1,63	0,43	38,7	33,51
ENPMA	1,63	0,87	44,34	41,39



**Fig.99** : Evolution comparées des efforts mesurés ( $F_{tmes}$ ) et calculés ( $F_{tmod}$ ) pour la troisième profondeur de travail, en relation avec la densité apparente ( $d_a$ ) et la vitesse ( $v$ ) (Echelle 1 / 4)

**Tableau 48**: Valeurs comparées des efforts mesurés ( $F_{tmes}$ ) et calculés ( $F_{tmod}$ ) pour la première profondeur de travail, en relation avec la densité apparente ( $d_a$ ) et la vitesse ( $v$ ) - Echelle 1 / 2

Forme	$d_a$	$v$	$F_{tmes}$	$F_{tmod}$
SACRA	1,02	0,23	3,12	12,30
SACRA	1,02	0,29	4,14	13,18
SACRA	1,02	0,43	4,2	14,84
SACRA	1,02	0,87	5,46	18,33
SACRA	1,35	0,23	11,52	16,28
SACRA	1,35	0,29	10,08	17,45
SACRA	1,35	0,43	11,52	19,64
SACRA	1,35	0,87	12,16	24,26
SACRA	1,63	0,23	19,04	19,65
SACRA	1,63	0,29	26,08	21,07
SACRA	1,63	0,43	30,56	23,71
SACRA	1,63	0,87	31,04	29,29
ENPMA	1,02	0,23	6,24	12,11
ENPMA	1,02	0,29	6,48	12,99
ENPMA	1,02	0,43	6,84	14,62
ENPMA	1,02	0,87	9,84	18,06
ENPMA	1,35	0,23	21,6	16,03
ENPMA	1,35	0,29	22,88	17,19
ENPMA	1,35	0,43	25,44	19,34
ENPMA	1,35	0,87	32	23,90
ENPMA	1,63	0,23	32,64	19,36
ENPMA	1,63	0,29	34,88	20,75
ENPMA	1,63	0,43	39,36	23,36
ENPMA	1,63	0,87	45,28	28,85

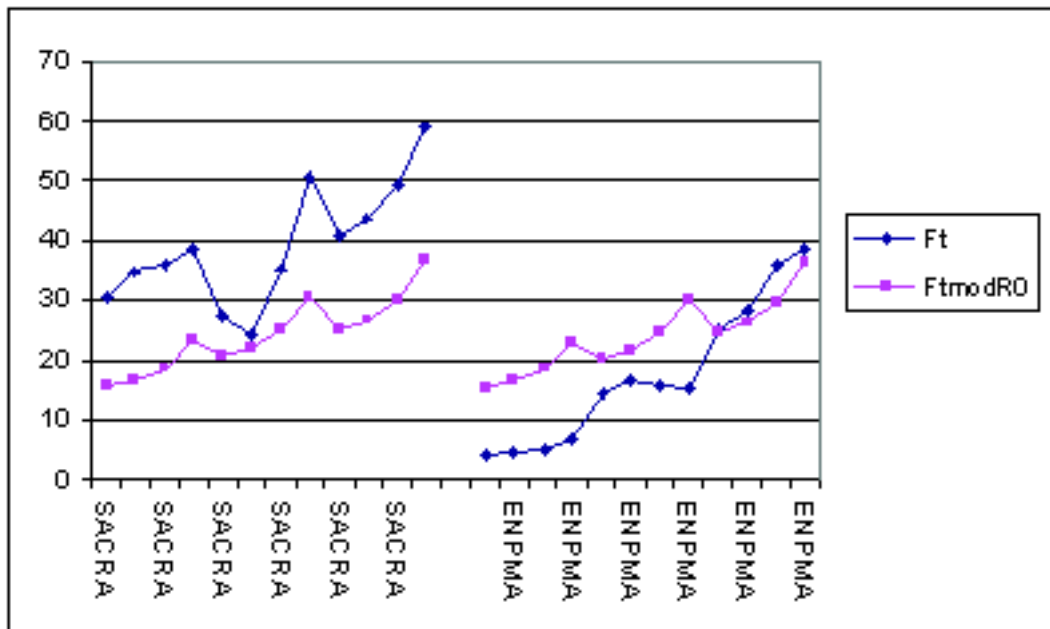


**Fig.100** : Evolutions comparées des efforts mesurés ( $F_{tmes}$ ) et calculés ( $F_{tmod}$ ) pour la première profondeur de travail, en relation avec la densité apparente ( $d_a$ ) et la vitesse ( $v$ ). (Echelle 1 / 2)

**Tableau 49** : Valeurs comparées des efforts mesurés ( $F_{tmes}$ ) et calculés ( $F_{tmod}$ ) pour la deuxième profondeur de travail, en relation avec la densité apparente ( $d_a$ ) et la vitesse ( $v$ ) - Echelle 1 / 2

**Contribution à la modélisation interface outils aratoires sol Optimisation de la forme et de l'effort de résistance à la traction des corps de charrues à socs et des outils à dents**

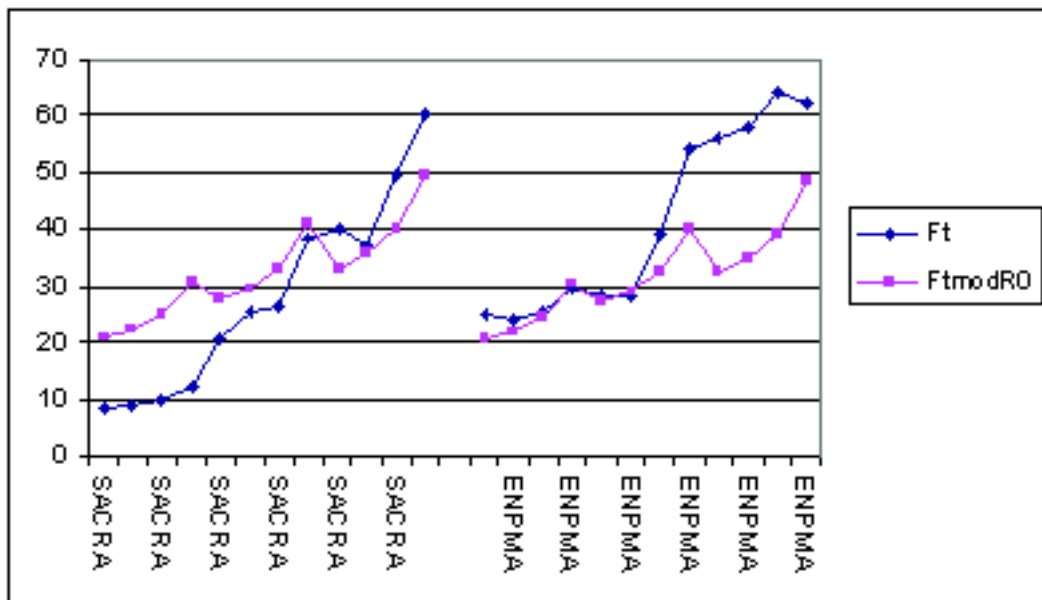
Forme	$d_a$	$v$	Ftmes	Ftmod
SACRA	1,02	0,23	30,48	15,58
SACRA	1,02	0,29	34,68	16,70
SACRA	1,02	0,43	36	18,79
SACRA	1,02	0,87	38,58	23,22
SACRA	1,35	0,23	27,5	20,62
SACRA	1,35	0,29	24,14	22,10
SACRA	1,35	0,43	35,04	24,87
SACRA	1,35	0,87	50,56	30,73
SACRA	1,63	0,23	40,69	24,89
SACRA	1,63	0,29	43,52	26,68
SACRA	1,63	0,43	49,28	30,03
SACRA	1,63	0,87	59,04	37,10
ENPMA	1,02	0,23	4,44	15,34
ENPMA	1,02	0,29	4,8	16,45
ENPMA	1,02	0,43	4,92	18,51
ENPMA	1,02	0,87	6,72	22,87
ENPMA	1,35	0,23	14,24	20,31
ENPMA	1,35	0,29	16,64	21,77
ENPMA	1,35	0,43	15,82	24,50
ENPMA	1,35	0,87	15,36	30,27
ENPMA	1,63	0,23	25	24,52
ENPMA	1,63	0,29	28,32	26,29
ENPMA	1,63	0,43	36	29,58
ENPMA	1,63	0,87	38,56	36,55



**Fig. 101** : Evolutions comparées des efforts mesurés (Ftmes) et calculés (Ftmod) pour la deuxième profondeur de travail, en relation avec la densité apparente ( $d_a$ ) et la vitesse ( $v$ ). (Echelle 1 / 2)

Tableau 50: Valeurs comparées des efforts mesurés (Ftmes) et calculés (Ftmod) pour la troisième profondeur de travail, en relation avec la densité apparente ( $d_a$ ) et la vitesse ( $v$ ) - Echelle 1 / 2

Forme	$d_a$	$v$	Ftmes	Ftmod
SACRA	1,02	0,23	8,58	20,74
SACRA	1,02	0,29	8,76	22,23
SACRA	1,02	0,43	9,94	25,02
SACRA	1,02	0,87	11,88	30,91
SACRA	1,35	0,23	20,64	27,45
SACRA	1,35	0,29	25,28	29,43
SACRA	1,35	0,43	26,24	33,12
SACRA	1,35	0,87	38,24	40,91
SACRA	1,63	0,23	40,32	33,14
SACRA	1,63	0,29	36,96	35,53
SACRA	1,63	0,43	49,44	39,99
SACRA	1,63	0,87	60,32	49,40
ENPMA	1,02	0,23	24,78	20,43
ENPMA	1,02	0,29	24,24	21,90
ENPMA	1,02	0,43	25,5	24,65
ENPMA	1,02	0,87	29,4	30,45
ENPMA	1,35	0,23	28,14	27,04
ENPMA	1,35	0,29	28,18	28,99
ENPMA	1,35	0,43	39,36	32,62
ENPMA	1,35	0,87	54,56	40,30
ENPMA	1,63	0,23	56,32	32,65
ENPMA	1,63	0,29	57,76	35,00
ENPMA	1,63	0,43	64,32	39,39
ENPMA	1,63	0,87	62,24	48,66



**Fig.102** : Evolutions comparées des efforts mesurés ( $F_{tmes}$ ) et calculés ( $F_{tmod}$ ) pour la troisième profondeur de travail, en relation avec la densité apparente ( $d_a$ ) et la vitesse ( $v$ ). (Echelle 1 / 2)

L'analyse de ces résultats illustrés par les représentations graphiques ci-dessus montre que l'évolution des efforts calculés à partir du modèle est similaire à celle des valeurs mesurées sur canal et ce quelque soit la densité apparente du sol, la vitesse de travail et la forme de la surface active du corps de charrue.

## 11.4. Application, vérification et correction du modèle

---

### 11.4.1. Application du modèle établi pour des corps de charrue de dimensions réelles et dans des conditions réelles de travail

#### 11.4.1.1. Conditions réelles de travail

- Vitesse moyenne de labour :  $v = 1,5 \text{ m / s}$  (5,4 km / h)
- Densité apparente au moment du labour  $d = 1.29 \text{ g / cm}^3$  soit :  $1290 \text{ kg / m}^3$  ou  $12,9 \text{ kN/m}^3$ , cette dernière transformation est nécessaire pour l'application des modèles de Gorjatchkin et Gee Clough.
- Largeur de travail :  $b = 0,31 \text{ m}$  pour SACRA et  $b = 0.35 \text{ m}$  pour ENPMA
- Profondeur moyenne de labour :  $a = 0.25 \text{ mètres}$
- Rapport  $k = a / b$  :  $k = 0,806$  pour la forme sacra, et  $k = 0.714$  pour enpma

#### 11.4.1.2. Caractéristiques géométriques des surfaces actives

$E = 1$

Le rapport  $k_1 = L_1 / h$  :  $k_1 = 1,714$  pour SACRA et  $k_1 = 2,136$  pour ENPMA

Le rapport  $k_2 = d_1 / d_3$  :  $k_2 = 1,290$  pour sacra et  $k_2 = 1,464$  pour ENPMA

Les angles :

#### Pour la Forme SACRA

$$\alpha_0 = 17 \text{ degrés} = 0,297 \text{ rad}$$

$$\gamma_0 = 39 \text{ degrés} = 0,681 \text{ rad}$$

$$\theta_0 = 33 \text{ degrés} = 0,576 \text{ rad}$$

#### Pour la forme ENPMA

$$\alpha_0 = 29 \text{ degrés} = 0,506 \text{ rad}$$

$$\gamma_0 = 38 \text{ degrés} = 0,663 \text{ rad}$$

$$\theta_0 = 35 \text{ degrés} = 0,611 \text{ rad}$$



### 11.4.1.3. Évaluation des efforts à partir du modèle.

Les valeurs de l'effort de résistance à la traction en appliquant le modèle proposé sont respectivement représentées sur le tableau suivant (Tableau 51) et ce pour les différentes vitesses utilisées et pour chacune des deux formes de surfaces actives:

Tableau 51 : Effort Ft calculé à partir du modèle proposé pour les corps réels.

Vitesses (m / s)	0,23	0,29	0,43	0,87	1,5
SACRA Ft (daN)	104,50	112,03	126,08	155,76	183,42
ENPMA Ft (daN)	304,38	326,30	367,23	453,69	534,23

Ces valeurs ont été corrigées par des coefficients de correction dimensionnels qui sont respectivement égaux à 1000 pour la forme SACRA et 10 pour la forme ENPMA. Ceci a été imposé par les unités considérées lors des essais. En effet la densité apparente du sol considérée initialement en  $g / cm^3$  a été transformée en  $kg / m^3$ , les longueurs (b : largeur de travail) en mètre. L'équation dimensionnelle reste cependant toujours vérifiée.

$$F_t = z R_0 \cdot e^{-14.54 \cdot \left(\frac{v^2}{g \cdot b}\right)^{0.15}} \cdot E^{4.13} \cdot \alpha^{5.94} \cdot \theta^{-16.01} \cdot k^{0.98} \cdot (k_1)^{12.98} \cdot (k_2)^{2.74} \cdot g \cdot d \cdot b^3$$

Avec :  $z = 1000$  pour la forme SACRA

$z = 10$  pour la forme ENFMA

Les deux valeurs attribuées à ce coefficient de correction  $z$  montrent que la forme de la surface active, caractérisée par ses dimensions et ses angles, a un effet important sur l'effort de résistance à la traction.

Les unités des différents paramètres de ce modèle sont :

Vitesse :  $v$  en m / s

Angles :  $\alpha$  et  $\theta$  en radians

Densité apparente :  $d_a$  en kg / m<sup>3</sup>

Accélération terrestre :  $g$  en m / s<sup>2</sup>

Largeur de travail :  $b$  en m

Caractéristiques de forme :  $k, k_1$  et  $k_2$  sans unité

Le modèle établi devient donc :

$$F_t = z \cdot R_0 \cdot C_V \cdot C_G$$

L'introduction de l'angle d'attaque dans le modèle est possible en remplaçant la largeur de travail  $b$  par sa valeur en relation avec l'angle  $\gamma$ , c'est à dire  $b = l \cdot \sin(\gamma)$  avec  $l$  la longueur de la partie affûtée du soc. Ce qui donne :

$$F_t = z R_0 \cdot e^{-14.54 \cdot \left(\frac{v^2}{g \cdot l \cdot \sin(\gamma)}\right)^{0.15}} \cdot E^{4.13} \cdot \alpha^{5.94} \cdot \theta^{-16.01} \cdot k^{0.98} \cdot (k_1)^{12.98} \cdot (k_2)^{2.74} \cdot g \cdot d \cdot (l \cdot \sin(\gamma))^3$$

## 11.5. Comparaison du modèle obtenu avec les modèles fréquemment utilisés Gorjatchkin et Gee Clough.

Afin de vérifier la fiabilité du modèle établi, une analyse comparative avec les modèles fréquemment utilisés à savoir les modèles de Gorjatchkin et Gee Clough a été réalisée. Pour cela certains paramètres utilisés dans ces deux derniers modèles sont à définir. Les relations de l'effort de résistance à la traction de ces deux chercheurs sont respectivement :

**Gorjatchkin :**

$$F_t = f \cdot G + k \cdot a \cdot b + \varepsilon \cdot a \cdot b \cdot v^2$$

Pour les outils portés  $f \cdot G = 0$

**Gee Clough :**

$$F_t = a.b. \left\{ 13.30.\gamma.a + 3.06.\gamma.\frac{v^2}{g} \right\}$$

Pour ce qui est des valeurs de K (résistance spécifique du sol) et e (coefficient de forme des versoirs) utilisés dans la relation de Gorjatchkin sont respectivement pour les deux formes :

**Tableau 52 : Valeurs moyennes de K et e**

Forme du versoir	K (daN/m <sup>2</sup> )	e (daN.s <sup>2</sup> / m <sup>4</sup> )
SACRA	3500	200
ENPMA	3500	150

Les essais étant réalisés sur le même type de sol (sol léger texture sablo - limoneuse avec faible teneur en argile), la valeur de K est la même ; elle est de 3500 daN/m<sup>2</sup>, cette valeur est la limite supérieure pour les sols légers et la limite inférieure pour les sols dits moyens.

Ces valeurs seront appliquées aux modèles de Gorjatchkin. Les valeurs choisies, pour le coefficient de forme e sont respectivement de 200 daN.s<sup>2</sup> / m<sup>4</sup> pour la forme SACRA qui est une forme qui s'approche beaucoup plus d'une forme cylindrique et de 150 daN.s<sup>2</sup> / m<sup>4</sup> pour la forme ENPMA qui s'approche plutôt d'une forme mixte à arrière plat.

Le choix de ce paramètre est souvent très délicat à déterminer, le nombre de formes de surfaces actives étant très important. Les valeurs choisies correspondent à celles données par Gorjatchkin pour des vitesses comprises entre 1 et 2,4 m / s.

Les valeurs de l'effort obtenues avec ces modèles, pour les mêmes conditions de vitesse et de sol sont :

**Tableau 53 : Effort Ft calculé à partir modèle Gorjatchkin**

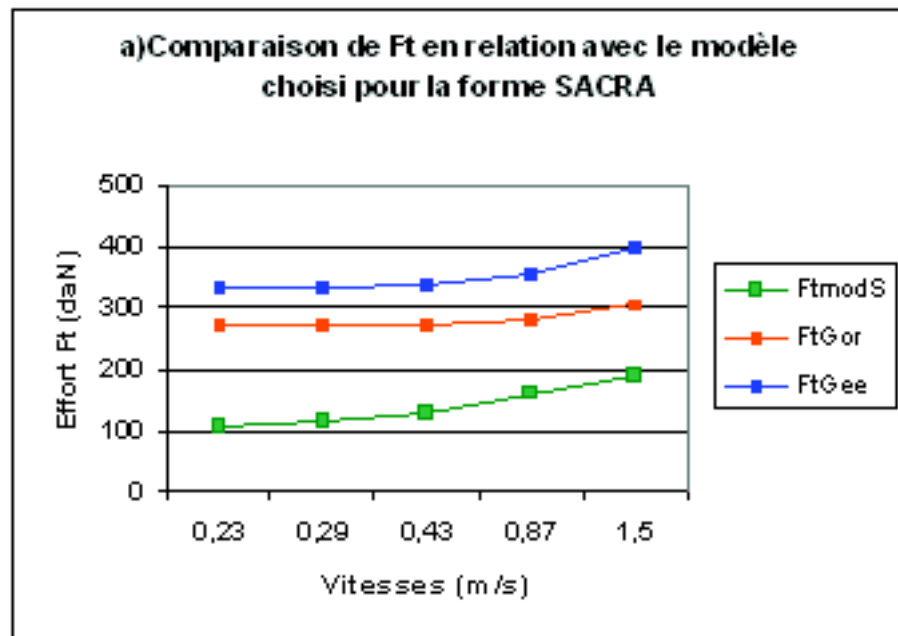
Vitesses (m / s)	0,23	0,29	0,43	0,87	1,5
SACRA Ft (daN)	272,07	272,55	274,11	282,98	306,12
ENPMA Ft (daN)	306,94	307,35	308,67	316,18	335,78

**Tableau 54 : Effort Ft calculé à partir du modèle Gee Clough.**

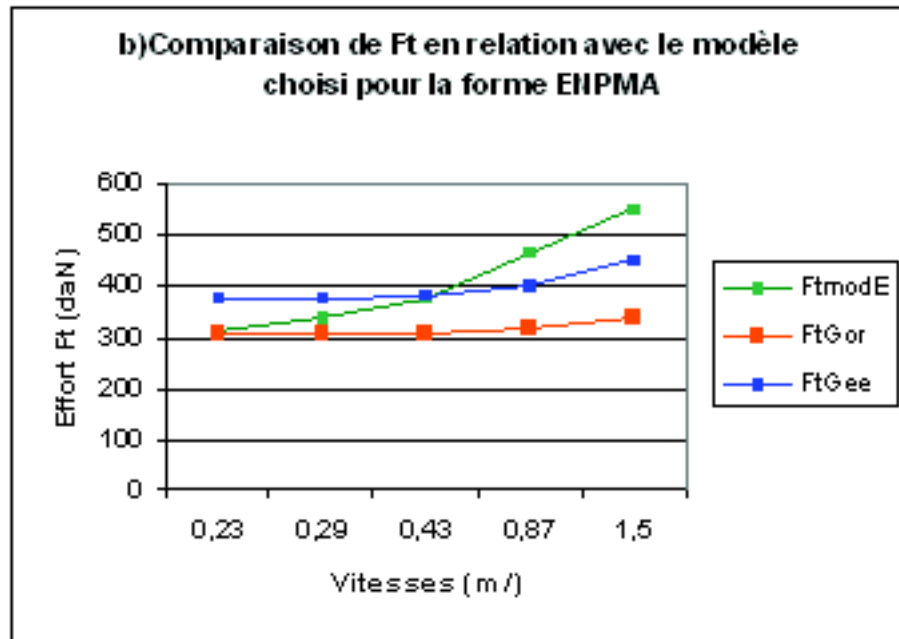
<b>Vitesses (m / s)</b>	0,23	0,29	0,43	0,87	1,50
<b>SACRA Ft (daN)</b>	334,03	334,99	338,07	355,57	401,25
<b>ENPMA Ft (daN)</b>	377,13	378,21	381,69	401,45	453,02

L'application de ces deux modèles pour la détermination de l'effort de résistance à la traction, confirme les résultats de nos travaux, à savoir que la forme ENPMA est plus exigeante en énergie pour la réalisation du labour, ceci est plus accentué au niveau des résultats obtenus avec le modèle établi. L'effort augmente également avec la vitesse de travail. Cela met donc en évidence l'importance des caractéristiques géométriques de la surface active du corps de charrue introduites au niveau du modèle que nous avons établi, ces résultats sont illustrés sur les graphes suivants (Fig. 103).

La simplification du modèle de Gorjatchkin, sous la forme  $F_t = K.a.b$ , c'est à dire sans tenir compte de la vitesse et de la forme des surfaces actives, donnerai la même valeur pour  $F_t$  quelque soit la forme des surfaces actives des corps de charrue.



**Fig. 103:** Analyse comparative des efforts  $F_t$  en fonction de la vitesse d'avancement pour chaque modèle et pour chaque forme a) Sacra et b) ENPMA



## 11.6. Analyse de la fiabilité des modèles de Gorjatchkin et de Gee Clough

### 11.6.1. Introduction

L'évaluation de l'effort de résistance à la traction qu'oppose le sol, avec ses propriétés physico – mécaniques, à l'avancement d'un corps de charrue à soc fait l'objet, de plusieurs travaux de recherche dont les résultats aboutissent à la présentation de plusieurs modèles mathématiques cités précédemment. Ces modèles introduisent souvent les propriétés du sol, notamment sa résistance spécifique et sa masse volumique. L'analyse de ces modèles montre que les caractéristiques géométriques des surfaces actives ne sont cependant pas prises en considération. L'objectif de cet article est de montrer que le choix du modèle à utiliser pour une évaluation de l'effort de résistance à la traction a une importance quand la précision de calcul est recherchée. Pour cela deux modèles ont été choisis le premier est celui proposé par Gorjatschkin, le second celui proposé par Gee Clough.

L'une des préoccupations des agriculteurs est l'évaluation de la consommation en énergie pour la mise en place d'une culture donnée. Pour cela plusieurs méthodes sont proposées, parmi elles nous retiendrons celle du réservoir plein qui est une méthode directe mais peu précise et celle de l'évaluation de l'effort de résistance à la traction.

Pour leurs simplicités, les modèles les plus utilisés pour calculer les efforts de résistance à la traction sont respectivement celui de Gorjatschkin et celui de Gee Clough.

$$F_t = f \cdot G + k \cdot a \cdot b + \varepsilon \cdot a \cdot b \cdot v^2 \quad (\text{Gorjatchkin})$$

Pour les charrues actuelles qui sont portées, la première partie ( $f \cdot G$ ) du modèle de Gorjatschkin, sera négligée, nous retiendrons donc pour nos calculs :  $F_t = k \cdot a \cdot b + \varepsilon \cdot a \cdot b \cdot v^2$

$$F_t = a \cdot b \cdot \left\{ 13 \cdot 30 \cdot d \cdot a + 3 \cdot 06 \cdot d \cdot \frac{v^2}{g} \right\} \quad (\text{Gee Clough})$$

Ces deux modèles introduisent la profondeur (a) et la largeur (b) de travail du labour, la vitesse d'avancement et les caractéristiques du sol ; pour Gorjatschkin c'est la résistance spécifique du sol (k) par contre Gee Clough introduit la densité apparente du sol ( $\gamma$ ). Gorjatschkin introduit un paramètre de forme  $\varepsilon$ , des surfaces actives, qui est souvent très difficile à déterminer, ses valeurs étant comprises entre 1500 et 2000 daN.s<sup>2</sup>/ m<sup>4</sup>. Pour notre essai, les efforts de résistance à la traction seront respectivement notés :

FtSacra : effort de résistance mesuré sur canal pour la forme SACRA (daN)

FtEnpma : effort de résistance mesuré sur canal pour la forme ENPMA (daN)

FtGor : effort de résistance calculé avec le modèle de Gorjatschkin (daN)

FtGee : effort de résistance calculé avec le modèle de Gee Clough (daN)

SACRA : Société Algérienne de Construction pour la Réforme Agraire.

ENPMA : Entreprise Nationale de Production de Matériels Aratoires.

### 11.6.2. Matériels et Méthodes

Afin de mettre en évidence l'effet de la forme des surfaces actives sur l'effort de résistance à la traction, Les essais se sont déroulés sur un canal de traction avec des modèles réduits d'échelle un demi, de deux corps de charrue à socs fabriqués en Algérie, la forme SACRA et la forme ENPMA. Les raisons de ce choix sont la recherche de la maîtrise des caractéristiques physico – mécanique du sol pour éviter toute interaction de ces effets sur l'effort de résistance à la traction. Les efforts sur canal ont été déterminés avec précision à l'aide de capteurs d'effort extensiométriques.

**Tableau 55 : Caractéristiques géométriques des deux modèles réduits de corps de charrue**

<b>Corps de charrue</b>	<b>ENPMA</b>	<b>SACRA</b>
Forme du soc	Trapézoïdal	Trapézoïdal
Hauteur du corps h (mm)	220	218
Longueur projetée l (mm)	470	460
Largeur b (mm)	150	150
Angle d'entrure $\alpha$ (°)	29	17
Angle d'attaque $\gamma$ (°)	38	39
Angle d'inclinaison $\theta$ (°)	35	33
Angle de montée de la bande de terre $\beta$ (°)	40	48

### 11.6.3. Conditions de travail :

Densité apparente du sol :  $da = 150 \text{ kN} / \text{m}^3$

Résistance spécifique du sol :  $k = 18000 \text{ N} / \text{m}^2$

Largeur de travail des corps de charrue est la même et est de :  $b = 0,15 \text{ m}$

Trois profondeurs de travail ont été choisies, elles sont de  $a = 0,07, 0,09$  et  $0,12 \text{ m}$ .

Pour le calcul de l'effort de résistance à la traction avec le modèle de Gorjatschkin, nous avons pris deux valeurs de  $\epsilon$ . La première de  $1500 \text{ Ns}^2 / \text{m}^4$  pour le versoir SACRA qui est de forme cylindrique et  $1750 \text{ Ns}^2 / \text{m}^4$  pour le versoir ENPMA qui a une tendance culturale. La variation du coefficient de forme n'est pas très significative sur la valeur de l'effort calculé avec le modèle de Gorjatschkin, en effet dans les conditions de nos essais, si nous considérons l'effort calculé à la profondeur de  $0,12$  mètres et à la vitesse de  $0,15 \text{ m} / \text{s}$  et que la variation de  $\epsilon$  passe de  $1000 \text{ Ns}^2 / \text{m}^4$  à  $2000 \text{ Ns}^2 / \text{m}^4$  la variation de l'effort sera de  $32,44 \text{ daN}$  à  $32,48 \text{ daN}$ . Cette variation est la même pour les deux formes de surfaces actives. Le choix de la valeur de ce coefficient n'aura donc pas une très grande influence sur l'analyse.

#### 11.6.4. Résultats des efforts de résistance à la traction

Les résultats des valeurs des efforts de résistance à la traction mesurés sur canal et calculés à l'aide des modèles de Gorjatschkin et de Gee Clough sont repris dans les tableaux suivants : (tableaux 56 et 57 ).

Tableau 56 : valeurs comparées des efforts mesurés sur canal et calculés avec Gorjatschkin et Gee Clough pour la forme SACRA

Ft(daN)	a(m)	v(m/s)	$\epsilon$ (Ns <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> )	FtGOR (daN)	FtGEE (daN)
11,85	0,07	0,04	1500	18,90	14,67
13,2	0,07	0,05	1500	18,90	14,68
12	0,07	0,07	1500	18,91	14,69
12,5	0,07	0,15	1500	18,94	14,77
22,44	0,09	0,04	1500	24,30	24,25
21,52	0,09	0,05	1500	24,31	24,25
22,2	0,09	0,07	1500	24,31	24,27
24,12	0,09	0,15	1500	24,35	24,38
41,11	0,12	0,04	1500	32,40	43,11
40,79	0,12	0,05	1500	32,41	43,11
38	0,12	0,07	1500	32,41	43,13
35,98	0,12	0,15	1500	32,46	43,28

Tableau 57 : valeurs comparées des efforts mesurés sur canal et calculés avec Gorjatschkin et Gee Clough pour la forme ENPMA

Ft (daN)	a(m)	v(m/s)	$\epsilon$ (Ns <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> )	FtGOR (daN)	FtGEE (daN)
13,55	0,07	0,04	1750	18,90	14,67
11,8	0,07	0,05	1750	18,90	14,68
12,1	0,07	0,07	1750	18,91	14,69
29,3	0,07	0,15	1750	18,94	14,77
33,28	0,09	0,04	1750	24,30	24,25
27,5	0,09	0,05	1750	24,31	24,25
26,26	0,09	0,07	1750	24,31	24,27
30,49	0,09	0,15	1750	24,35	24,38
54,6	0,12	0,04	1750	32,40	43,11
55	0,12	0,05	1750	32,41	43,11
55,4	0,12	0,07	1750	32,41	43,13
59	0,12	0,15	1750	32,46	43,28

### 11.6.5. Discussion des résultats

#### 11.6.5.1. Analyse comparative des valeurs mesurées et calculées de l'effort

Les premières observations montrent que les efforts calculés sont de même valeurs pour chacun des modèles, celles-ci sont supérieures pour le modèle de Gee Clough. Les valeurs mesurées sur canal de traction sont différentes de celles calculées et plus importantes pour la forme ENPMA. Il apparaît donc que le choix du modèle pour l'évaluation de l'effort de résistance à la traction doit se faire en relation avec la forme de la surface active.

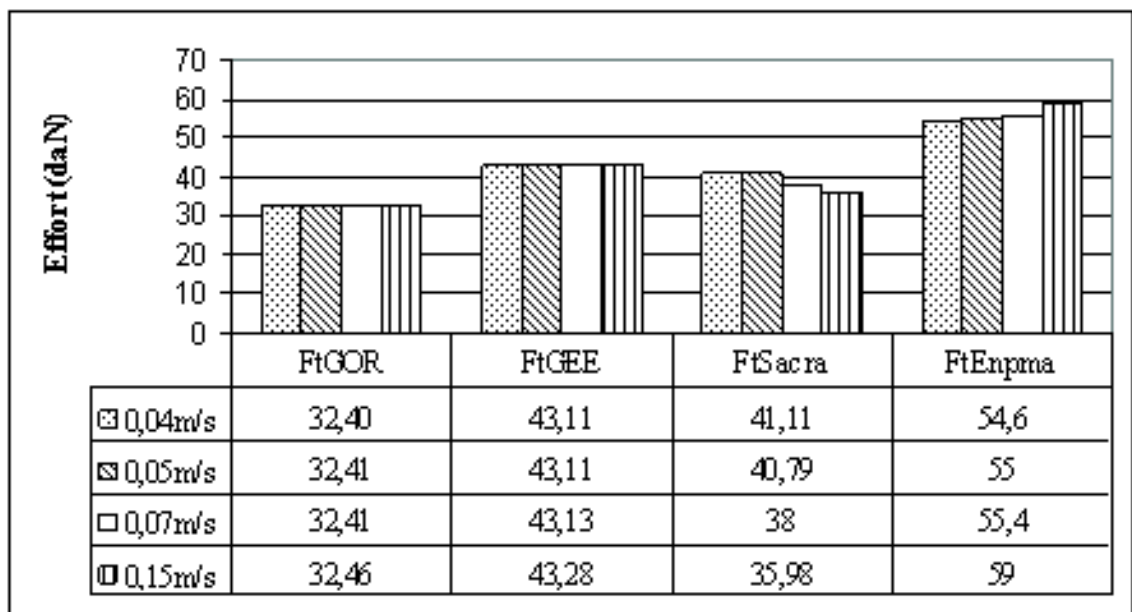
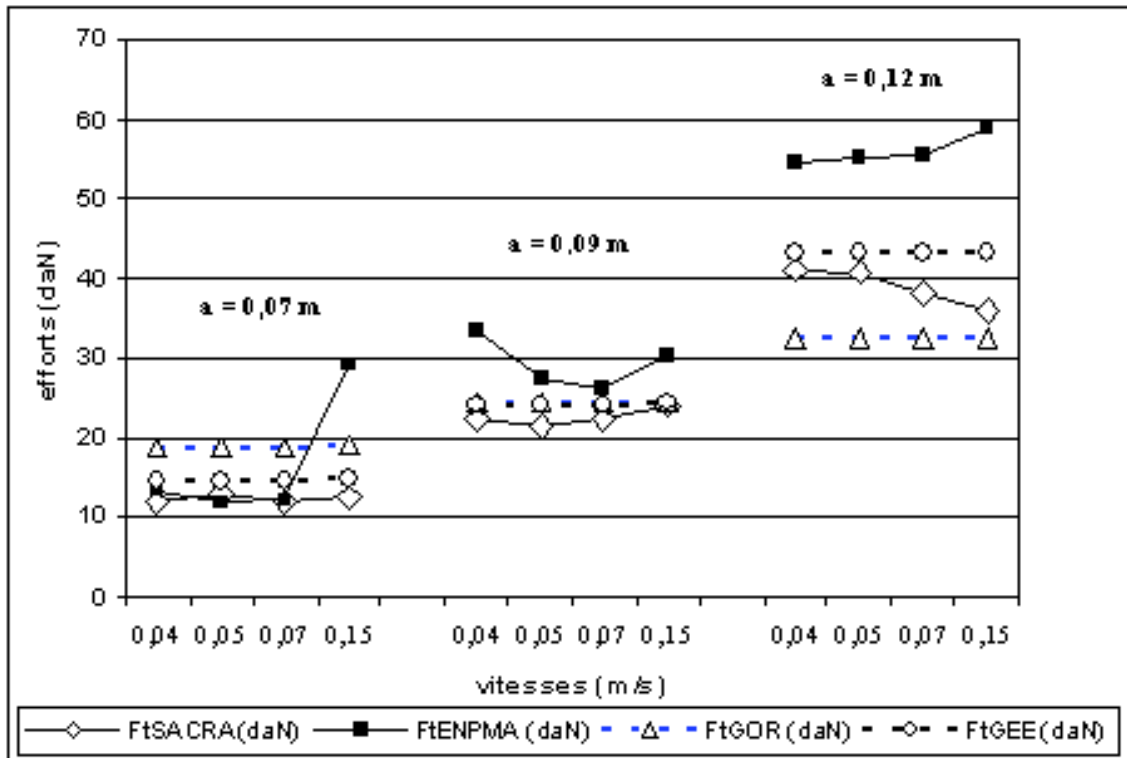


Fig. 104 : Comparaison des efforts mesurés et calculés pour la profondeur de 0,12 m





**Fig.105** : variation des efforts mesurés et calculés en relation avec la vitesse d'avancement et la profondeur de travail

L'analyse de ces courbes montre que pour la première profondeur de travail, les efforts mesurés sur canal sont inférieures à celles calculées à l'aide des modèles. Pour la deuxième profondeur les efforts calculés sont de mêmes valeurs avec des valeurs mesurées pour la forme ENPMA supérieures à celles calculées et à celles mesurées de la forme SACRA. Pour la troisième profondeur, il est à remarquer que les valeurs mesurées pour la forme ENPMA sont plus importantes et que celles mesurées pour SACRA sont supérieures aux valeurs calculées à l'aide du modèle de Gorjatschkin.

Afin de choisir correctement le modèle approprié pour l'évaluation correcte de l'effort de résistance à la traction, une analyse statistique des résultats est réalisée.

### 11.6.5.2. Résultats de l'analyse des corrélations

Les valeurs des coefficients R de corrélation entre les efforts mesurés sur canal et ceux calculés à l'aide des modèles de Gorjatschkin et Gee Clough sont représentés dans le tableau suivant (tableau 58) :

Tableau 58 : matrice de corrélation entre les différentes valeurs des efforts.

	FtEnpma	FtGee	FtGor	FtSacra
FtEnpma	-			
FtGee	0,9631	-		
FtGor	0,9594	0,9974	-	
FtSacra	0,9493	0,9907	0,9919	-

L'analyse de ce tableau montre, une très bonne corrélation entre les différentes valeurs des efforts de résistance à la traction.

### 11.6.5.3. Analyse par régression multiple

Afin d'analyser l'ordre d'importance des liaisons entre les valeurs mesurées et celles calculées avec les modèles, nous avons choisi la méthode des régressions multiples pour chacun des efforts mesurés pour les deux formes de surfaces actives. Les tableaux 59 et 60 représentent les résultats de l'analyse pour la forme ENPMA, les tableaux 61 et 62, ceux de la forme SACRA.

**Tableau 59 : Analyse de régression multiple pour FtEnpma = f (FtGor, FtGee).**

<b>Variable à expliquer: FtEnpma</b>			
Paramètre	Estimation	Erreur Type	Probabilité
CONSTANTE	5,049	47,838	0,9183
FtGee	1,726	1,807	0,3643
FtGor	- 0,725	3,848	0,8546

**R<sup>2</sup> = 92,7785 %**

**R<sup>2</sup> ajusté = 91,1738%.**

**Tableau 60 : Analyse de variance FtEnpma = f (FtGor, FtGee)**

Source	Somme des carrés	Ddl	Carré moyen	F	Probabilité
Modèle	3225,03	2	1612,51	57,81	0,0000
Résidu	251,022	9	27,89		
Total (Corr.)	3476,05	11			

Le tableau 59 montre les résultats de l'ajustement d'un modèle de régression linéaire multiple pour décrire la relation entre FtEnpma et les deux variables explicatives FtGor et FtGee. L'équation du modèle ajusté est :

$$\mathbf{FtEnpma = 5,049 + 1,726 * FtGee - 0,725 * FtGor}$$

Comme la valeur de la probabilité dans le tableau 60 est inférieure à 0.01, il y a une relation statistiquement significative entre les variables au niveau de confiance de 99%.

Pour déterminer si le modèle peut être simplifié, noter que la plus grande valeur de probabilité pour les variables explicatives est de 0,8546, et est associée à FtGor. Comme la valeur de la probabilité est supérieure ou égale à 0.10, l'effort calculé avec le modèle de Gorjatschkin, n'est pas statistiquement significatif au niveau de confiance de 90% ou plus. Ainsi, nous pouvons envisager de supprimer FtGor du modèle. Ce qui signifie que pour le corps de charrue ENPMA, le modèle de Gee Clough sera donc choisi pour avoir des valeurs de l'effort plus proche de la réalité.

**Tableau 61 : Analyse de régression multiple pour FtSakra = f (FtGor, FtGee)**

Variable à expliquer: FtSacra			
Paramètre	Estimation	Erreur Type	Probabilité
CONSTANTE	-18,793	14,491	0,2269
FtGee	0,240	0,547	0,6709
FtGor	1,461	1,165	0,2415

$R^2 = 98,424 \%$

$R^2 \text{ ajusté} = 98,0738 \%$

Tableau 62 : Analyse de variance FtSacra = f (FtGor, FtGee).

Source	Somme des carrés	Ddl	Carré moyen	F	Probabilité
Modèle	1438,54	2	719,27	281,04	0,0000
Résidu	23,03	9	2,56		
Total (Corr.)	1461,57	11			

Le tableau 61 montre les résultats de l'ajustement d'un modèle de régression linéaire multiple pour décrire la relation entre FtEsacra et les deux variables explicatives FtGor et FtGee. L'équation du modèle obtenu est :

$$\text{FtSacra} = -18,793 + 0,240 \cdot \text{FtGee} + 1,461 \cdot \text{FtGor}$$

Comme le cas précédent, la valeur de la probabilité dans le tableau 62 est inférieure à 0.01, il y a une relation statistiquement significative entre les variables au niveau de confiance de 99%. D'autre part, les valeurs de probabilité du tableau 61, montrent que le modèle de Gorjatschkin sera utilisé pour l'évaluation de l'effort de résistance à la traction exigé par la forme SACRA.

## 11.7. Conclusion

Au travers de ces résultats, il apparaît que :

- Les valeurs mesurées sont différentes des valeurs calculées avec les modèles de Gorjatschkin et de Gee Clough.
- Les valeurs des efforts de résistance à la traction obtenues avec le modèle de Gorjatschkin sont plus grandes pour la première profondeur (0,07 m) que celles obtenues avec le modèle de Gee Clough.
- A la deuxième profondeur (0,09 m), les valeurs des efforts de résistance à la traction sont pratiquement les mêmes pour les deux modèles.
- A la troisième profondeur (0,12 m), les efforts sont plus importants quand ils sont calculés avec le modèle Gee Clough.

D'autre part, quand la précision de la consommation en énergie est recherchée, le choix du modèle à utiliser pour calculer l'effort de résistance à la traction doit faire l'objet d'une attention particulière. Dans notre cas, pour les corps de charrue fabriqués en Algérie, nous préconisons le modèle de Gorjatschkin pour la forme SACRA et Gee Clough pour la forme ENPMA ou d'une façon générale pour les versoirs à tendance cylindrique nous utiliserons le modèle de Gorjatschkin et pour le versoir à tendance culturale nous proposerons le modèle de modèle Gee Clough.

Enfin pour une évaluation précise de la consommation en énergie des opérations de travail du sol, il serait intéressant d'établir des modèles mathématiques de l'effort de résistance à la traction en tenant compte, en plus des propriétés physico - mécaniques du sol, et surtout des caractéristiques géométriques des pièces travaillantes, notamment les caractéristiques angulaires.

## **Chapitre 12. Optimisation de la surface active et de l'effort de résistance à la traction.**

### **12.1. Introduction**

---

Les résultats des efforts de résistance à la traction obtenus à partir des modèles de Gorjatschkin et Gee Clough et consignés dans les tableaux précédents, nous renseignent sur l'importance du choix du modèle à utiliser pour l'évaluation des besoins en énergie pour la réalisation des labours. En effet l'utilisation du modèle proposé par Gee Clough donnerait des valeurs supérieures à celles que nous obtiendrions à partir du modèle de Gorjatschkin.

Nous ferons aussi remarquer que pour la même forme du corps de charrue, l'effort est différent d'un modèle à l'autre et ce dans de mêmes conditions de travail. D'où l'intérêt d'introduire dans le modèle des paramètres caractérisant la forme géométrique de la surface active des corps de charrues à socs.

Afin de réduire l'effort de résistance à la traction, deux possibilités se présentent :

La première relative à l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques du sol par des amendements appropriés permettant de détruire ou tout au moins diminuer l'intensité des forces de cohésion du sol, ce qui pourrait se faire par exemple par le choix de la teneur en eau du sol à laquelle il faudrait intervenir avec les outils aratoires. Cette première possibilité dépend de plusieurs conditions relatives au climat (pluviométrie) et aux caractéristiques anisotropies des sols agricoles.

La deuxième possibilité, celle qui nous concerne est la conception d'une nouvelle forme d'outil aratoire ou tout au moins l'amélioration des caractéristiques géométriques de la surface active des outils déjà existants. Cela ne peut se faire sans l'établissement d'un modèle mathématique de l'effort de résistance à la traction introduisant les principaux paramètres caractérisant la géométrie de l'outil.

### **12.2. Optimisation des surfaces actives**

---

L'analyse des surfaces actives obtenues avec les courbures de  $s$ , permet de délimiter et de mettre en évidence la surface de pression des versoirs sur le sol, la surface située à l'extérieur de cette courbe pourrait être réduite tout en gardant la forme générale du contour de la surface.

Pour optimiser les surfaces actives des deux corps de charrue à socs étudiés, nous proposons en complément, une méthode plus simple que celle étudiée pour la caractérisation des surfaces. Cette méthode consiste en une décomposition du contour de la surface en trois portions. La première partie est le contour supérieur, la deuxième est celle de la partie arrière du versoir et la troisième, la partie arrière latérale du versoir.

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 ajustement par régression linéaire polynomiale du second degré.

### 12.2.1. Analyse de la Forme SACRA

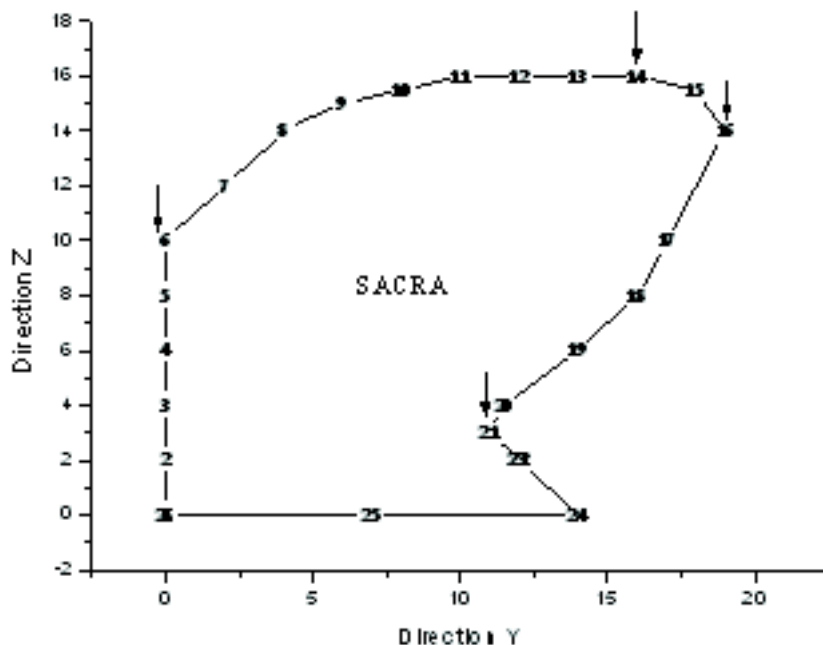


Fig. 106 : Contour réel de la surface active SACRA

Contour de la partie supérieure SACRA

$$z = 10,10 + 1,08 y - 0,05 y^2 \text{ Avec } R^2 = 0,99 \text{ p} < 0,0001$$

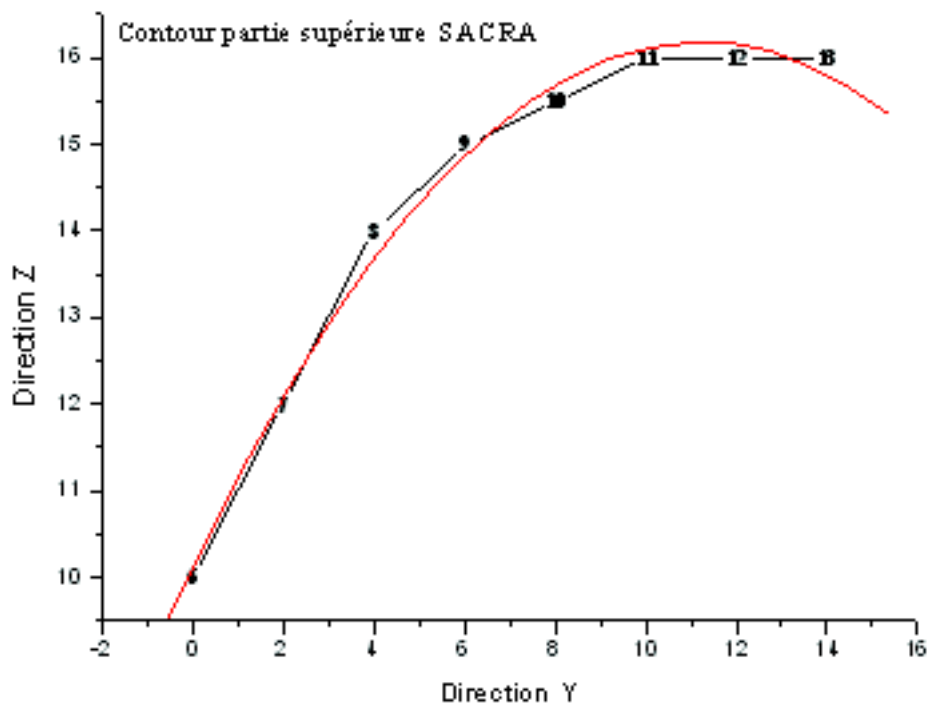


Fig. 107 : Ajustement du contour supérieur SACRA

Contour de la partie arrière du versoir SACRA

$z = -100 + 13,91 y - 0,41 y^2$  Avec  $R^2 = 1$   $p < 0,0001$

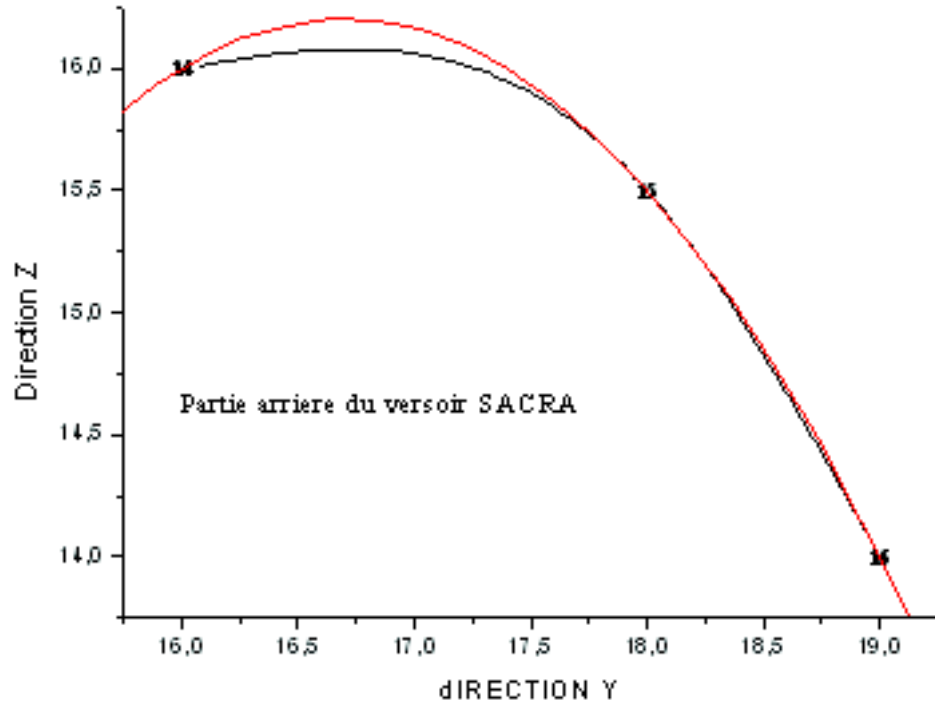
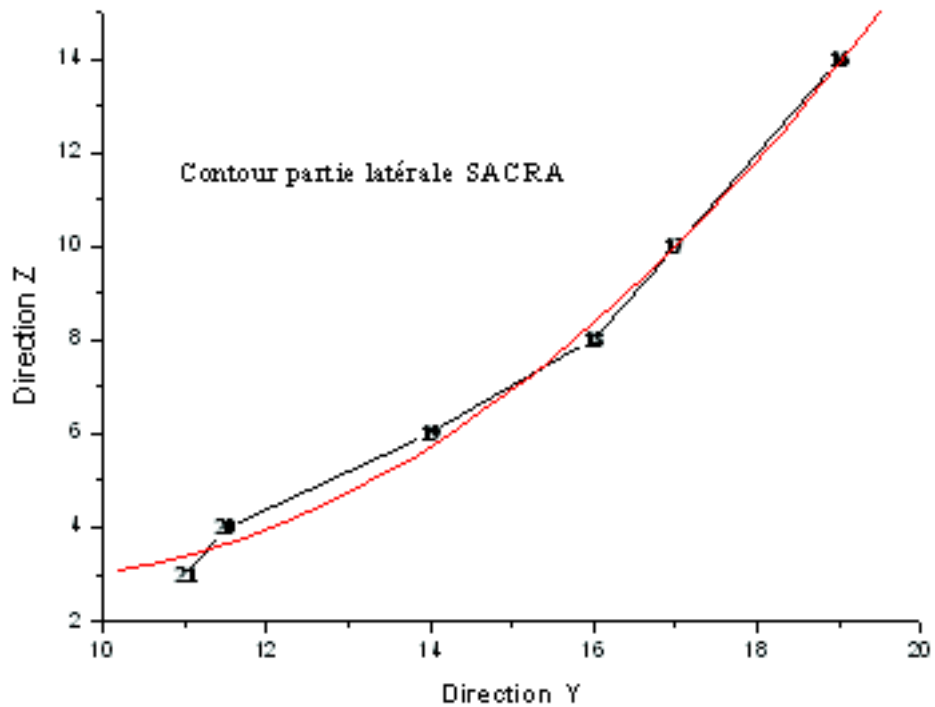


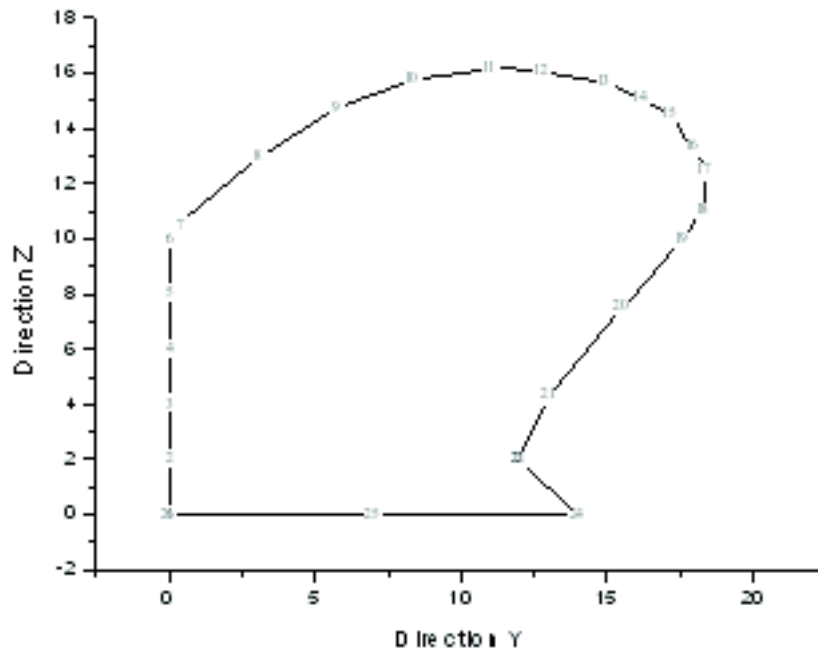
Fig.108 : Ajustement du contour de la partie arrière SACRA

Contour de la partie latérale

$z = 11,06 - 1,86 y + 0,10 y^2$  avec  $R^2 = 0,99$   $p < 0,0004$



**Fig. 109 :** Ajustement du contour de la partie latérale SACRA



**Fig. 110:** Contour corrigé de la surface active du corps SACRA

**Tableau 63 :** Nouvelles coordonnées du contour corrigé de la forme SACRA

x	0	2,5	8	10,5	12	13	15,5	16,8	18,5	19,5	20,5	21,5	22,5
y	0	0	0	0	0	0	0,36	3,02	5,67	8,32	11	12,7	14,9
z	0	2	4	6	8	10	10,5	12,9	14,7	15,8	16,2	16,1	15,7
x	23,5	25	25,5	24,5	23,5	21,5	19,5	17,5	15	14,5	14	7	0
y	16,2	17,2	17,9	18,4	18,3	17,6	15,5	13	12	12	14	7	0
z	15,1	14,5	13,3	12,5	11	10	7,51	4,31	2	2	0	0	0

### 12.2.2. Analyse de la Forme ENPMA

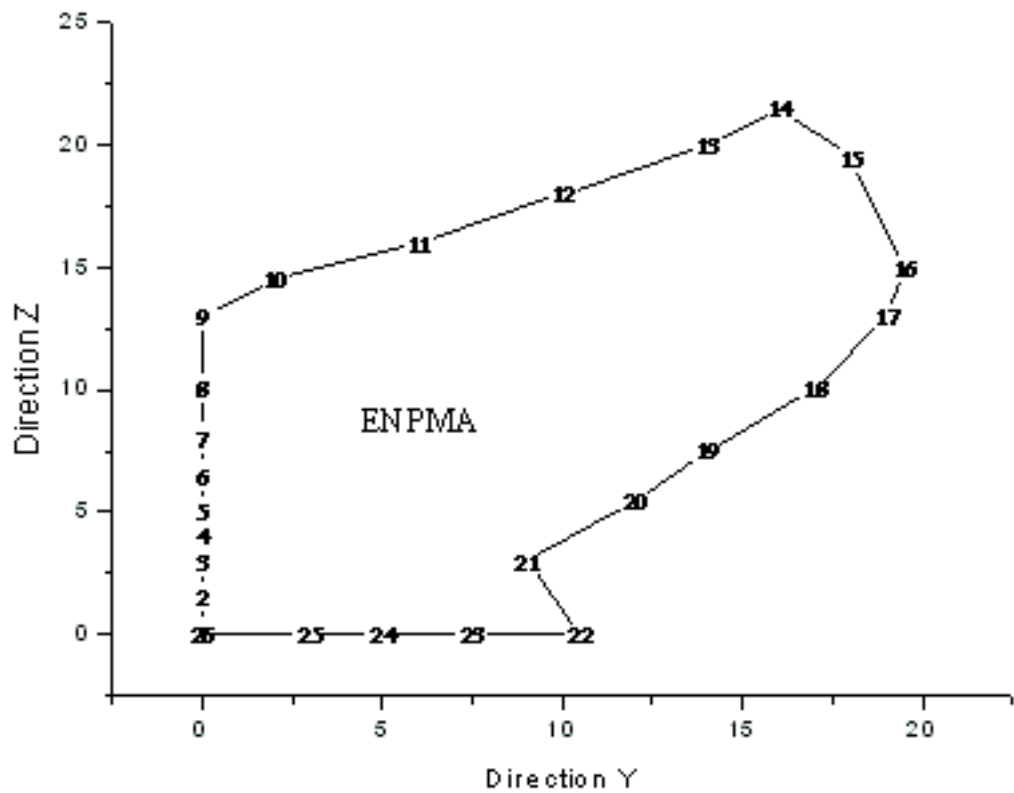


Fig. 111 : Contour réel de la surface active ENPMA

Contour de la partie supérieure ENPMA

$$z = 13,25 + 0,43 y + 0,004 y^2 \text{ avec } R^2 = 0,99 \text{ } p < 0,0003$$

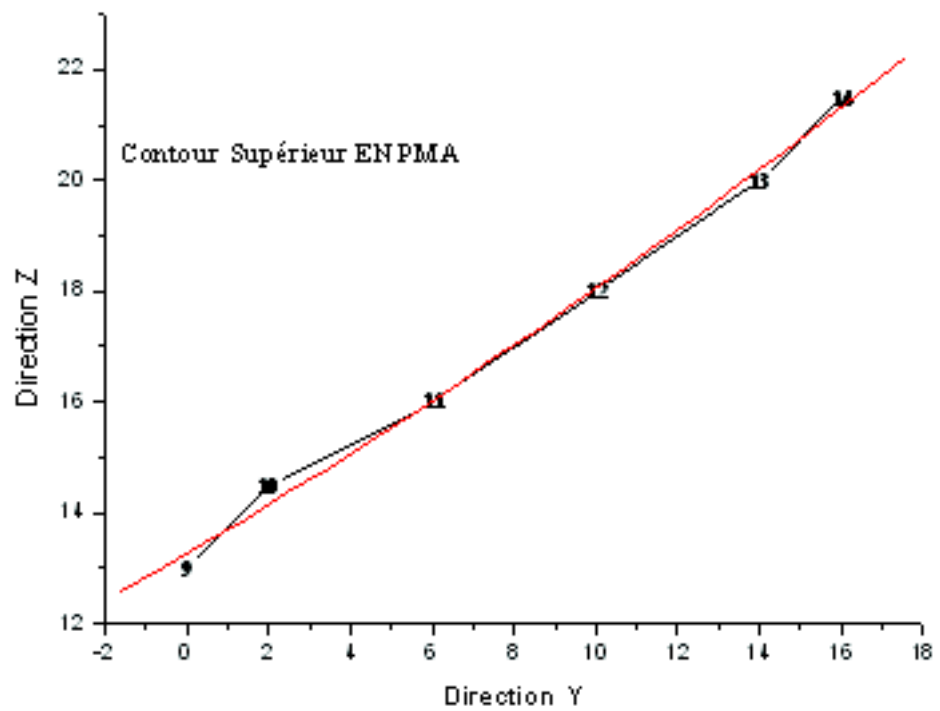


Fig. 112 : Ajustement du contour supérieur ENPMA

Contour de la partie arrière du versoir



$z = -12,07 + 178,42 y - 0,57 y^2$  avec  $R^2 = 1$   $p < 0,0001$

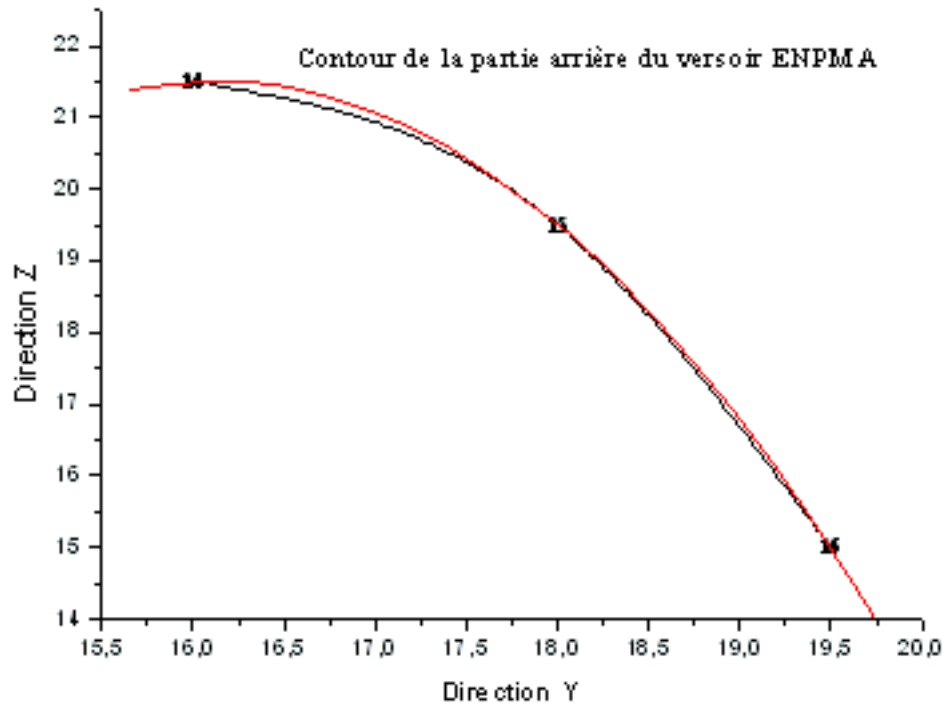


Fig. 113: Ajustement du contour de la partie arrière du versoir ENPMA

Contour de la partie latérale du versoir ENPMA

$z = 2,21 - 0,33 y + 0,04 y^2$  avec  $R^2 = 0,98$   $p < 0,0016$

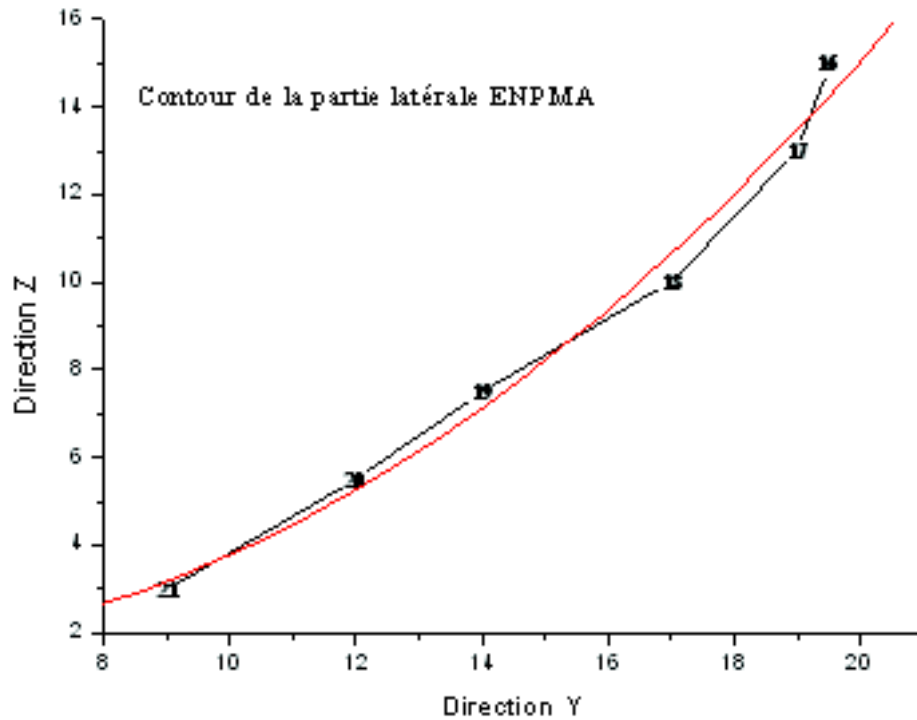


Fig. 114 : Ajustement du contour de la partie latérale du versoir ENPMA

Profil ENPMA corrigé

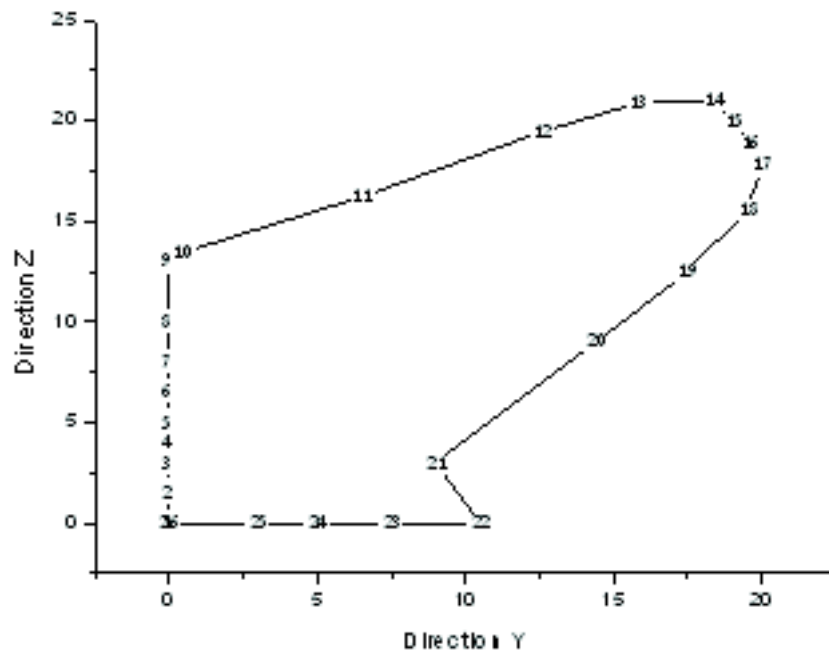


Fig. 115 : Contour corrigé de la surface active du corps ENPMA

Tableau 64 : Nouvelles coordonnées du contour corrigé de la forme ENPMA

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

L'utilisation des coordonnées, des contours corrigés des surfaces actives, obtenues à partir des équations des ajustements polynomiaux de second ordre, a permis par la méthode des courbes de Bezier d'affiner les contours avec plus de précision. Les résultats sont illustrés sur les figures ci-dessous :

### 12.2.3. Utilisation des courbes de BEZIER

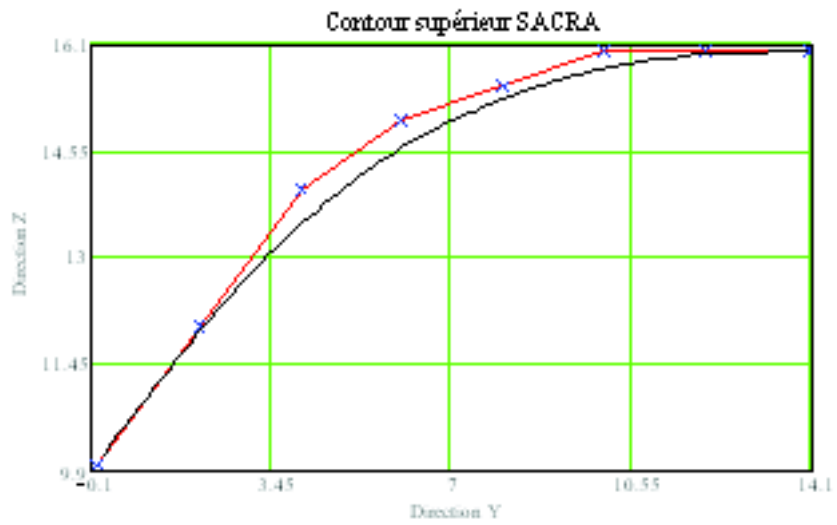
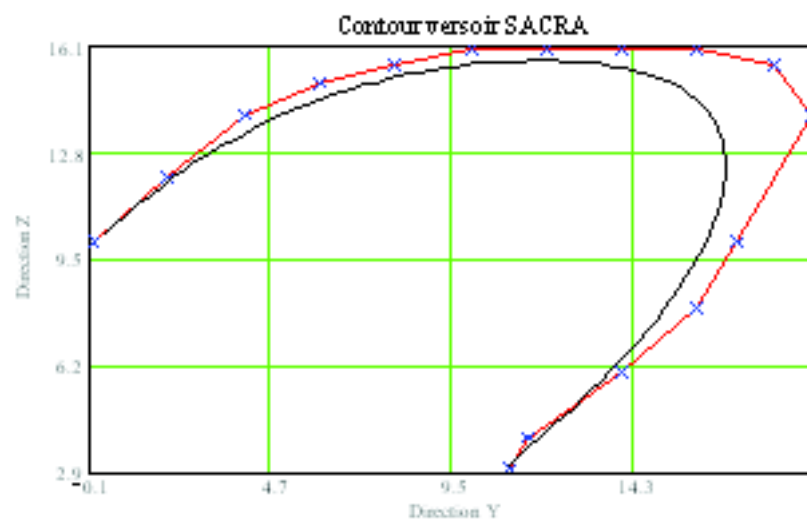
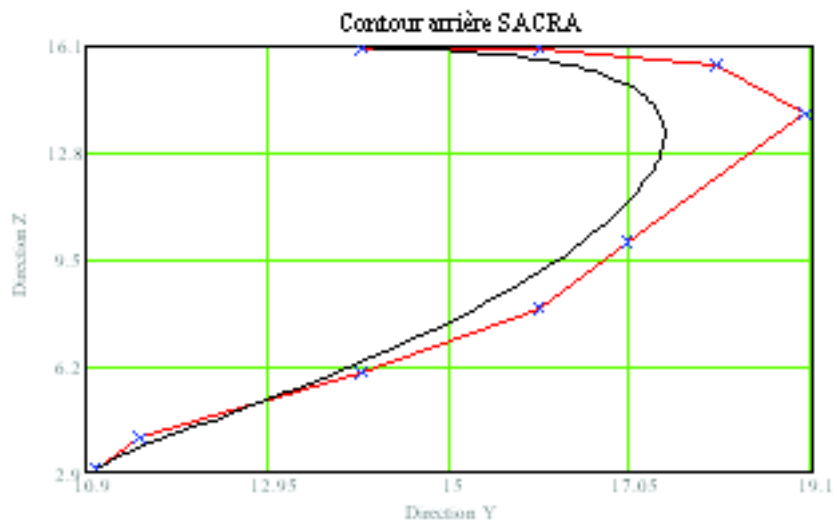


Fig.116 : Contours partiel de la forme SACRA (méthode de BEZIER)



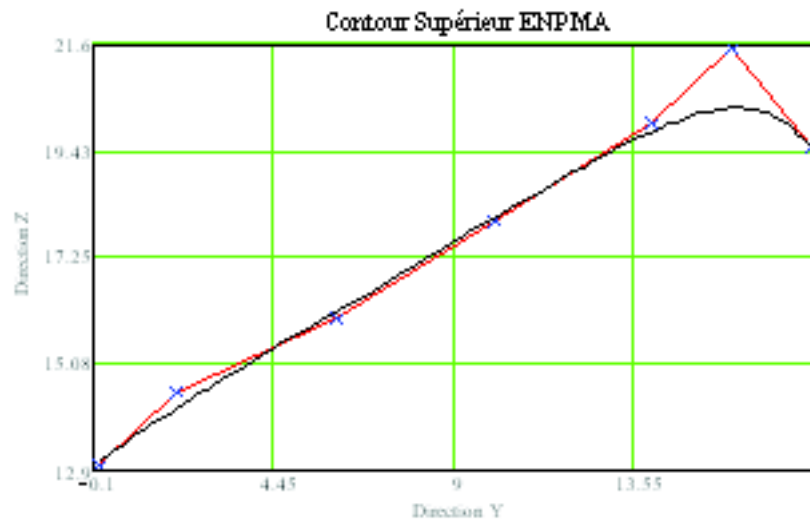
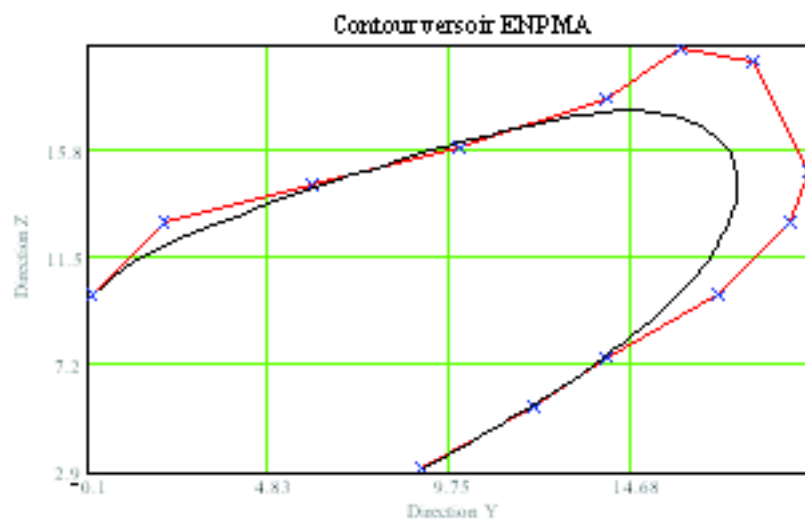
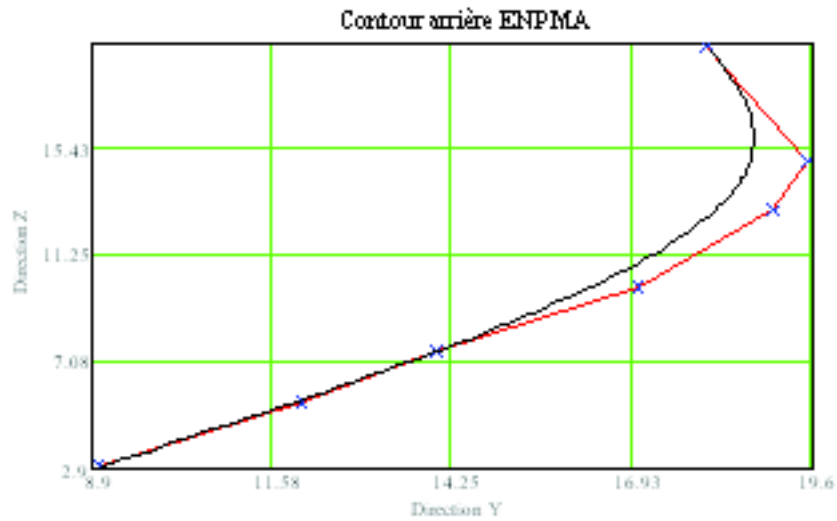


Fig.117 : Contours partiels de la forme ENPMA (méthode de BEZIER)



Les coordonnées finales des contours des deux formes, obtenues par la méthode de s sont représentées sur les tableaux 65 et 66.

Tableau 65 : Coordonnées du contour SACRA selon Bezier

X	0	2,7	8	10,5	12	12,63	14,58	16,8	18,22	19,56	20,95	22,06	23,4
Y	0	0	0	0	0	0	0,36	3,02	5,68	8,22	11	12,72	14,9
Z	0	1,39	4	6	8	10,34	11,4	12,9	14,03	14,91	15,34	15,66	15,78
X	23,95	24,5	24,93	24,94	24,24	22,6	20,03	16,81	15,15	14,5	14	7	0
Y	16,6	18,43	19,53	19,14	17,72	16,66	14,98	13	12	12	14	7	0
Z	15,54	14,78	13,92	12,284	10,84	9,58	7,51	4,77	3,08	2	0	0	0

Tableau 66 : Coordonnées du contour ENPMA selon

X	0	5	9	11	12	14	15	16	16,5	18,21	20,54	23,01	24,36
Y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,42	6,51	11,98	15,82
Z	0	1,5	3	4	5	6,5	8	10	13	14,23	16,26	18,82	19,95
X	25,07	25,77	26,14	26,67	26,63	24,11	21,19	17	16,5	11,64	8	5	0
Y	17,92	19,6	20,94	21,11	20,26	17,81	14	9	10,5	7,17	5	3	0
Z	19,79	19,54	18,82	17,61	15,68	12,5	9,01	3	0	0	0	0	0

#### 12.2.4. Conclusion sur l'optimisation de la forme des surfaces actives.

En conclusion nous pouvons donc attribuer les équations des différentes parties des contours des surfaces actives

**Contour de la partie supérieure du versoir SACRA**

$$z = 10,10 + 1,08 y - 0,05 y^2 \text{ Avec } R^2 = 0,99 \text{ p} < 0,0001$$

**Contour de la partie arrière du versoir SACRA**

$$z = -100 + 13,91 y - 0,41 y^2 \text{ Avec } R^2 = 1 \text{ p} < 0,0001$$

**Contour de la partie latérale du versoir SACRA**

$$z = 11,06 - 1,86 y + 0,10 y^2 \text{ avec } R^2 = 0,99 \text{ p} < 0,0004$$

**Contour de la partie supérieure du versoir ENPMA**

$$z = 13,25 + 0,43 y + 0,004 y^2 \text{ avec } R^2 = 0,99 \text{ p} < 0,0003$$

**Contour de la partie arrière du versoir ENPMA**

$$z = -127,07 + 18,42 y - 0,57 y^2 \text{ avec } R^2 = 1 \text{ p} < 0,0001$$

**Contour de la partie latérale du versoir ENPMA**

$$z = 2,21 - 0,33 y + 0,04 y^2 \text{ avec } R^2 = 0,98 \text{ p} < 0,0016$$

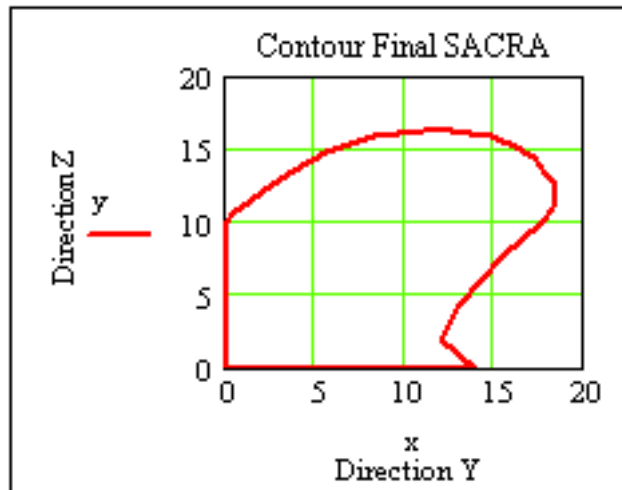


Fig. 118 : contour optimisé suivant le plan YOZ de la forme SACRA

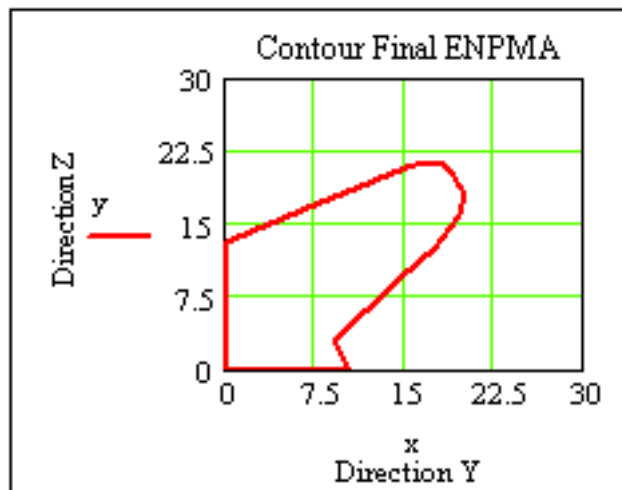


Fig. 119 : contour optimisé suivant le plan YOZ de la forme ENPMA

En conclusion, il est possible d'attribuer aux contours des surfaces actives des profils de forme polynomial de type :  $z = Cste + A.y + B.y^2$  avec des coefficients A et B propres à chacune des formes de versoirs. Dans notre cas, nous aurons :

Tableau 67 : Coefficients des équations de régressions des portions de contours

	Forme SACRA			Forme ENPMA		
	Constante	A	B	Constante	A	B
Contour supérieur	10,1	1,08	-0,05	13,25	0,43	0,004
Contour arrière	-100	13,91	-0,41	-127,07	18,42	-0,57
Contour latéral	11,06	-1,86	0,1	2,21	-0,33	0,04

#### 12.2.4.1. Détermination des centres de gravité des surfaces optimisées

Les contours étant définis, les nouveaux centres de gravité, des surfaces actives projetées sur le plan vertical transversal yOz, sont respectivement :

Tableau 68 : Nouvelles coordonnées du centre de gravité sur le plan yOz

Forme de la Surface	Coordonnées	Avant Optimisation	Après Optimisation
SACRA	Y	69,743	95,55
	Z	62,778	73,45
ENPMA	Y	167,621	99,62
	Z	140,242	67,84

Comparativement aux positions des centres de gravités (ou de pression) avant amélioration des surfaces, il est à constater que la position du centre de gravité des surfaces optimisées sur le plan yOz est plus haute pour la forme SACRA, par contre pour la forme ENPMA, la position du centre de gravité est nettement plus basse.

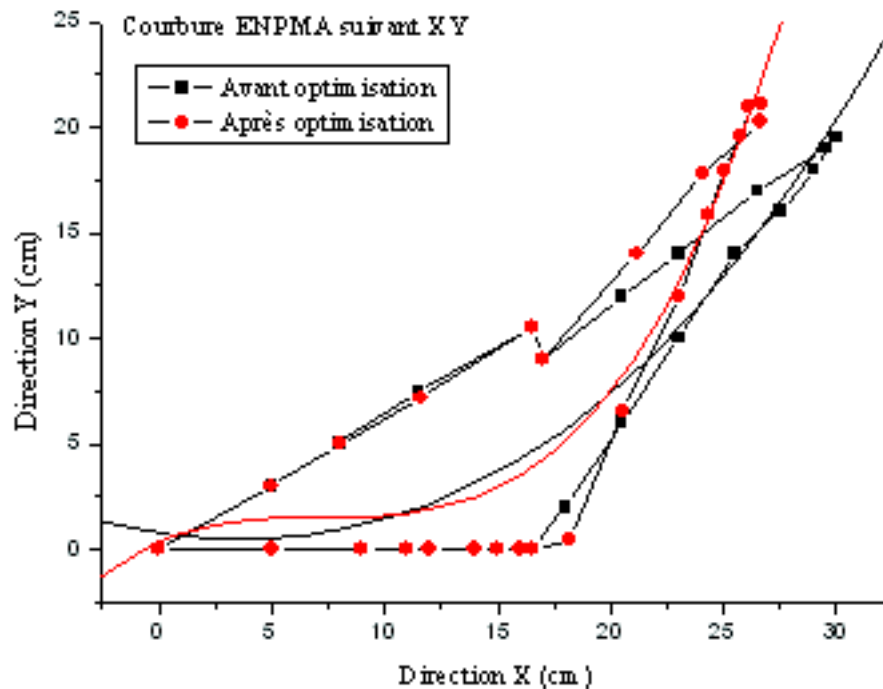
Au vu des résultats obtenus lors de l'analyse de l'effet des surfaces actives sur les indices qualitatifs, il a été constaté que :

La taille des mottes est plus importante lorsque le labour est réalisé avec la charrue ENPMA ; la porosité est également plus grande. L'inclinaison de la bande de terre est plus régulière avec la forme ENPMA. Il est possible d'affirmer que la bande de terre est moins sollicitée par rapport à la forme SACRA, donc l'effort nécessaire au travail du sol avec la forme ENPMA sera moins important que celui exigé par la forme SACRA.

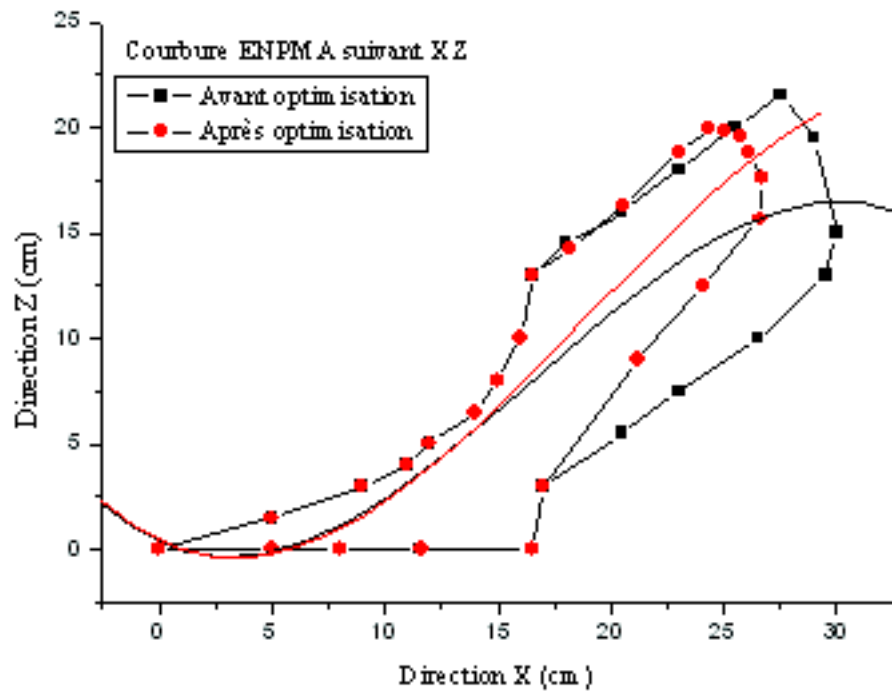
Outre le déplacement du centre de gravité des surfaces actives, la modification des courbures des surfaces, analysée dans ce qui suit, a également un effet sur le déplacement de la bande de terre et donc de sa déformation.

#### 12.2.4.2. Analyse des nouvelles courbures des surfaces actives des deux corps de charrue après optimisation.

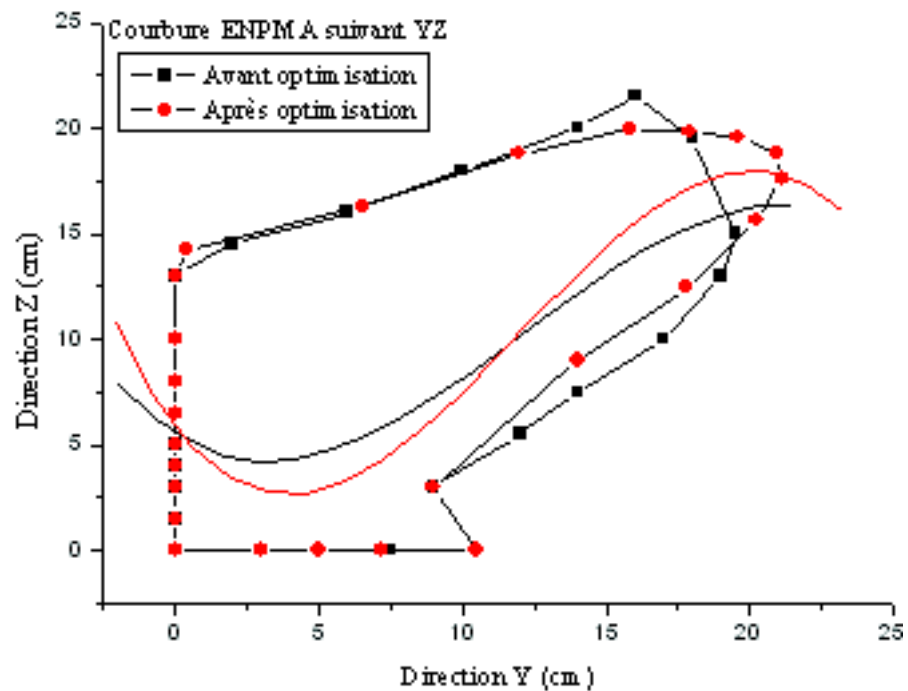
Les résultats de l'analyse de la modification des courbures des surfaces actives sont représentés sur les figures suivantes :



**Fig.120** : Comparaison de la courbure suivant le plan XOY, avant et après optimisation du contour de la surface pour ENPMA



**Fig. 121**: Comparaison de la courbure suivant le plan XOZ, avant et après optimisation du contour de la surface pour ENPMA



**Fig.122** : Comparaison de la courbure suivant le plan YOZ, avant et après optimisation du contour de la surface pour ENPMA



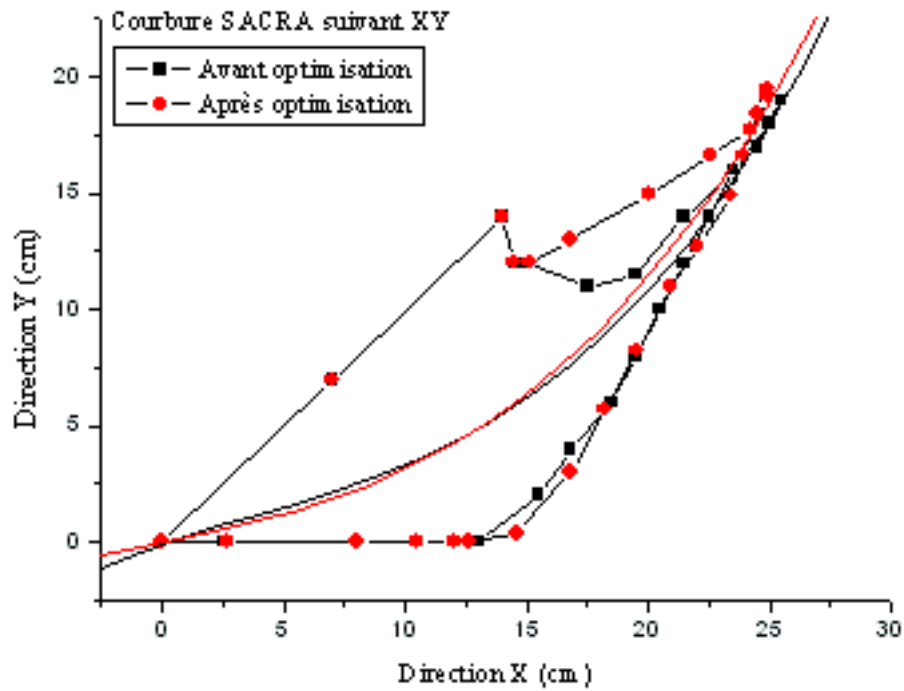


Fig.123 : Comparaison de la courbure suivant le plan XOY, avant et après optimisation du contour de la surface pour SACRA

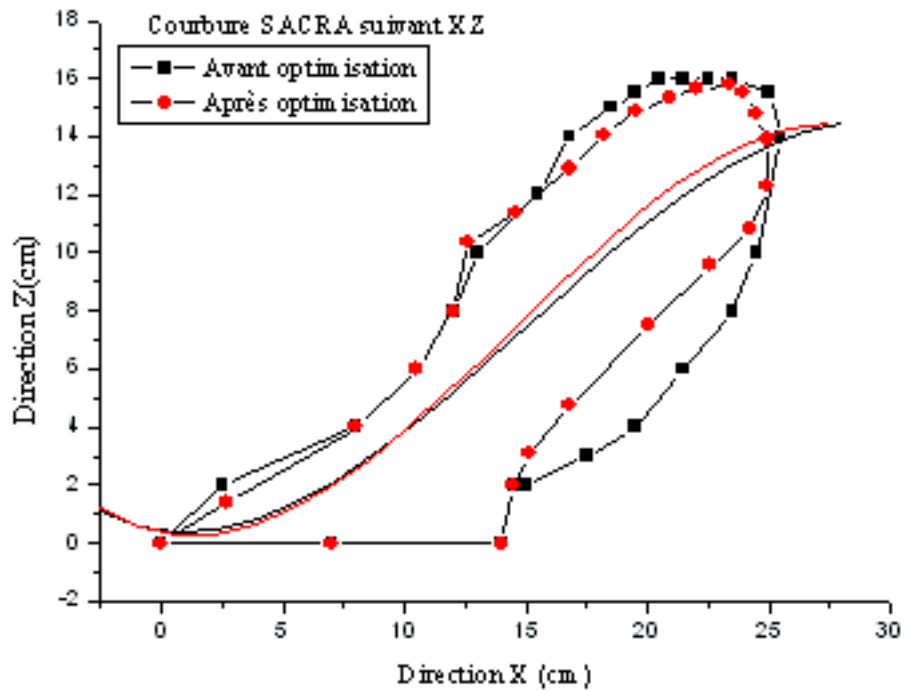
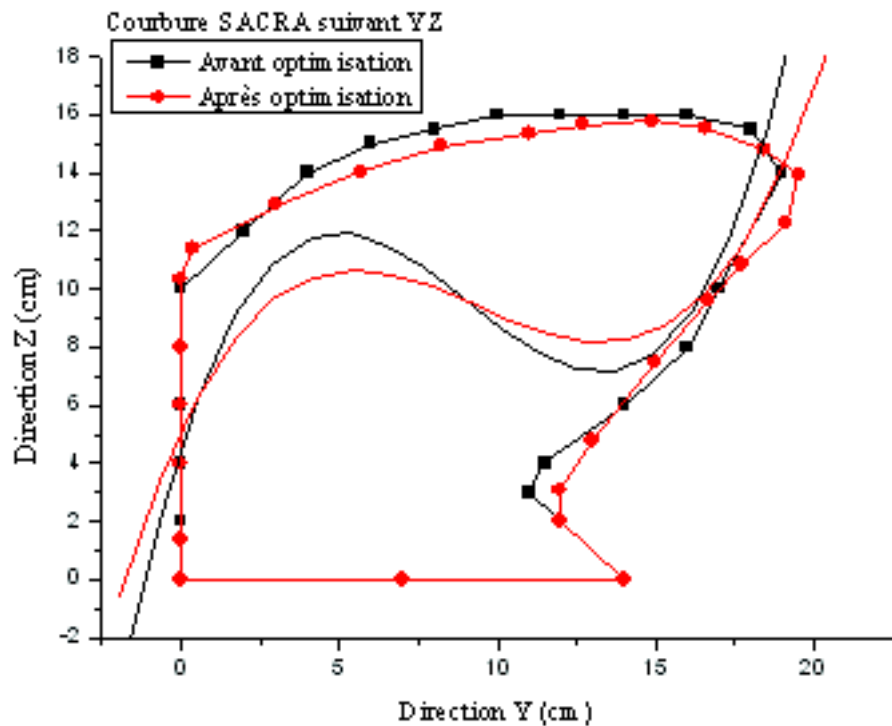


Fig.124 : Comparaison de la courbure suivant le plan XOZ, avant et après optimisation du contour de la surface pour SACRA



**Fig. 125:** Comparaison de la courbure suivant le plan YOZ, avant et après optimisation du contour de la surface pour SACRA

Les équations des courbures choisies pour la détermination des courbures suivantes les trois plans de travail du corps de charrue, après ajustement polynomiale du troisième degré, sont de la forme :

$$Y = A + B1X + B2X^2 + B3X^3$$

$$Z = A + B1X + B2X^2 + B3X^3$$

$$Z = A + B1Y + B2Y^2 + B3Y^3$$

Pour l'établissement de ces équations, les coordonnées des contours utilisées sont celles obtenues sur les formes avant optimisation (tableaux 16 et 17) et celles obtenues à partir des contours de Bezier (tableaux 65 et 66).

Les différents coefficients des équations de courbure sont consignés dans les tableaux ci-dessous :

**Tableau 69: Coefficient des équations de courbure pour la forme ENPMA**

Optimisation	Plan	A	B1	B2	B3	R <sup>2</sup>	p
Avant	XOY	0,810	-0,160	0,020	2,530	0,821	<0,0001
	XOZ	0,350	-0,470	-0,080	-0,001	0,691	<0,0001
	YOZ	5,550	-0,850	0,150	-0,004	0,323	0,032
Après	XOY	0,3000	0,4600	-0,0600	0,0030	0,8652	<0,0001
	XOZ	0,4100	-0,5200	0,0800	-0,0010	0,8184	<0,0001
	YOZ	5,8300	-1,7200	0,2600	-0,0070	0,5298	0,0007

**Tableau 70: Coefficient des équations de courbure pour la forme SACRA**

Optimisation	Plan	A	B1	B2	B3	R <sup>2</sup>	p
	XOY	-0,100	0,350	-0,010	0,001	0,736	<0,0001
Avant	XOZ	0,460	-0,090	0,050	-0,001	0,523	0,001
	YOZ	4,590	3,360	-0,460	0,010	0,274	0,066
	XOY	-0,0100	0,2100	0,0020	0,0007	0,7408	<0,0001
Après	XOZ	0,3600	-0,1600	0,0600	-0,0010	0,6656	<0,0001
	YOZ	5,1700	2,3100	-0,2900	0,0100	0,2513	0,0890

Les figures précédentes montrent que l'optimisation de la surface active entraînera une modification de la trajectoire de la bande de terre, celle-ci est plus apparente au niveau de la surface de la forme ENPMA, plus particulièrement sur les plans XOY et XOZ.

Les équations obtenues montrent que le coefficient de détermination est amélioré plus particulièrement pour les courbures suivant les plans de travail XOY et XOZ et ce pour les deux formes ce qui induirait une meilleure finition de la conception des contours des surfaces et du point de vue agronomique, une régularité de la déformation de la bande de terre.

### 12.3. Analyse de l'équation du modèle de l'effort de résistance à la traction

L'équation établie précédemment est :

$$F_t = \varepsilon \cdot R_0 \cdot e^{-14.54} \cdot \left( \frac{v^2}{g \cdot b} \right)^{0.15} \cdot E^{4.13} \cdot \alpha^{5.94} \cdot \theta^{-16.01} \cdot k^{0.98} \cdot (k_1)^{12.98} \cdot (k_2)^{2.74} \cdot g \cdot d \cdot b^3$$

Cette relation est composée de trois parties, la première partie relative à l'échelle que nous qualifierons de constante de forme et notée  $C_F$ , la deuxième partie relative aux caractéristiques géométriques notée  $C_G$ , la troisième partie relative aux conditions de travail et notée  $C_T$ . La relation peut donc être écrite sous la forme suivante :

$$F_t = \varepsilon \cdot R_0 \cdot e^{-14.54} \cdot \left[ \left( \frac{v^2}{g \cdot b} \right)^{0.15} \cdot g \cdot d \right] \cdot \left[ E^{4.13} \cdot \alpha^{5.94} \cdot \theta^{-16.01} \cdot (k^{0.98}) \cdot (k_1^{12.98}) \cdot (k_2^{2.34}) \cdot b^3 \right]$$

Ou sous forme simplifiée :

$$F_t = C_F \cdot C_T \cdot C_G$$

L'analyse de ces trois caractéristiques donne :

#### 12.3.1. Constantes de forme

Pour nos calculs, nous considérerons les corps de charrue, modèles réduits d'échelle 1/2.

$$C_F = \varepsilon \cdot R_0 \cdot e^{-14.54}$$

$$\text{Où } R_{0SACRA} = 1,931 \quad \varepsilon_{SACRA} = 1000$$

$$\text{Et } R_{0ENPMA} = 1,976 \quad \varepsilon_{ENPMA} = 10$$

Ce qui donne :

$$C_{Fsacra} = 9,782 \cdot 10^{-4}$$

$$C_{Fenpma} = 1,001 \cdot 10^{-5}$$

### 12.3.2. Caractéristiques relatives aux conditions de travail :

$$C_T = \left[ \left( \frac{v^2}{g \cdot b} \right)^{0.15} \cdot g \cdot d \right]$$

Nous choisirons, pour ce paramètre, une vitesse de  $v = 1,5 \text{ m / s}$  et une densité apparente du sol  $d = 1290 \text{ kg / m}^3$  et  $g$  la constante de gravité terrestre  $= 10 \text{ m / s}^2$ .

La largeur de travail étant respectivement de  $b = 0,15 \text{ m}$  pour la forme SACRA et  $b = 0,16 \text{ m}$  pour la forme ENPMA. Nous avons donc :

$$C_{Tsacra} = 13710$$

$$C_{Tenpma} = 13580$$

### 12.3.3. Caractéristiques relatives à la géométrie des surfaces actives :

$$C_G = \left[ E^{4.13} \cdot \alpha^{5.94} \cdot \theta^{-16.01} \cdot (k^{0.98}) \cdot (k_1^{12.98}) \cdot (k_2^{2.34}) \cdot b^3 \right]$$

Dans ce paramètre relatif aux caractéristiques géométriques, l'échelle choisie précédemment est  $E = 0,5$ , les autres composantes sont consignées dans le tableau suivant :

Forme SACRA 1/2	Forme ENPMA 1/2
$\alpha_0 = 0,297$ (rad)	$\alpha_0 = 0,506$ (rad)
$\theta_0 = 0,576$ (rad)	$\theta_0 = 0,611$ (rad)
$b = 0,15$ (m)	$b = 0,16$ (m)
$k = 0,8$	$k = 0,74$
$k_1 = 1,714$	$k_1 = 2,136$
$k_2 = 1,290$	$k_2 = 1,464$

**Tableau 71** : valeurs des caractéristiques géométriques des deux corps de charrue (échelle 1 / 2)

Ce qui donne :

**C G sacra = 1,549**

**C G enpma = 375,559**

En résumé nous avons :

**C F<sub>sacra</sub> = 9,782.10<sup>-4</sup>**

**C F<sub>enpma</sub> = 1,001. 10<sup>-5</sup>**

**C T<sub>sacra</sub> = 13710**

**C T<sub>enpma</sub> = 13580**

**C G sacra = 1,549**

**C G enpma = 375,559**

En utilisant les valeurs de ces coefficients, dans les conditions de nos essais, il est possible d'évaluer l'effort de résistance à la traction pour chacune des formes de surfaces actives, ce qui donne :

**F<sub>tSACRA</sub> = 20,774 daN**

**F<sub>tENPMA</sub> = 51,052 daN**

Ces valeurs montrent que dans les mêmes conditions de travail, même densité apparente, même vitesse d'avancement, l'effet de la forme sur l'effort de résistance à la traction est apparent. D'où l'importance du choix du modèle introduisant les caractéristiques géométriques des surfaces actives.

## 12.4. Optimisation de l'effort de résistance à la traction

Deux cas se présentent donc pour l'optimisation de l'effort de résistance à la traction. Le premier cas est celui où les caractéristiques géométriques sont fixées, le second cas est

celui où les conditions de travail telles que la vitesse et la densité apparente du sol sont fixées.

#### **12.4.1. Premier cas : Les caractéristiques géométriques sont fixées.**

La minimisation de l'effort portera sur les caractéristiques du sol et des conditions de travail, ce qui revient à déterminer la valeur de la densité du sol et celle de la vitesse d'avancement optimal.

Dans ce cas : les valeurs  $C_F$  et  $C_G$ , étant connues les relations donnant  $F_t$  pour chacune des formes sont respectivement :

$$\text{Pour la forme SACRA : } F_{t_{\text{SACRA}}} = C_{F_{\text{SACRA}}} \cdot C_{G_{\text{SACRA}}} \cdot \left[ \left( \frac{v^2}{10 \cdot 0.15} \right)^{0.15} \cdot 10 \cdot d \right]$$

$$\text{Pour la forme ENPMA : } F_{t_{\text{ENPMA}}} = C_{F_{\text{ENPMA}}} \cdot C_{G_{\text{ENPMA}}} \cdot \left[ \left( \frac{v^2}{10 \cdot 0.16} \right)^{0.15} \cdot 10 \cdot d \right]$$

En appliquant les valeurs numériques des différents coefficients nous aurons :

$$F_t \text{ SACRA} = 0,014 \cdot v^{0.3} \cdot d$$

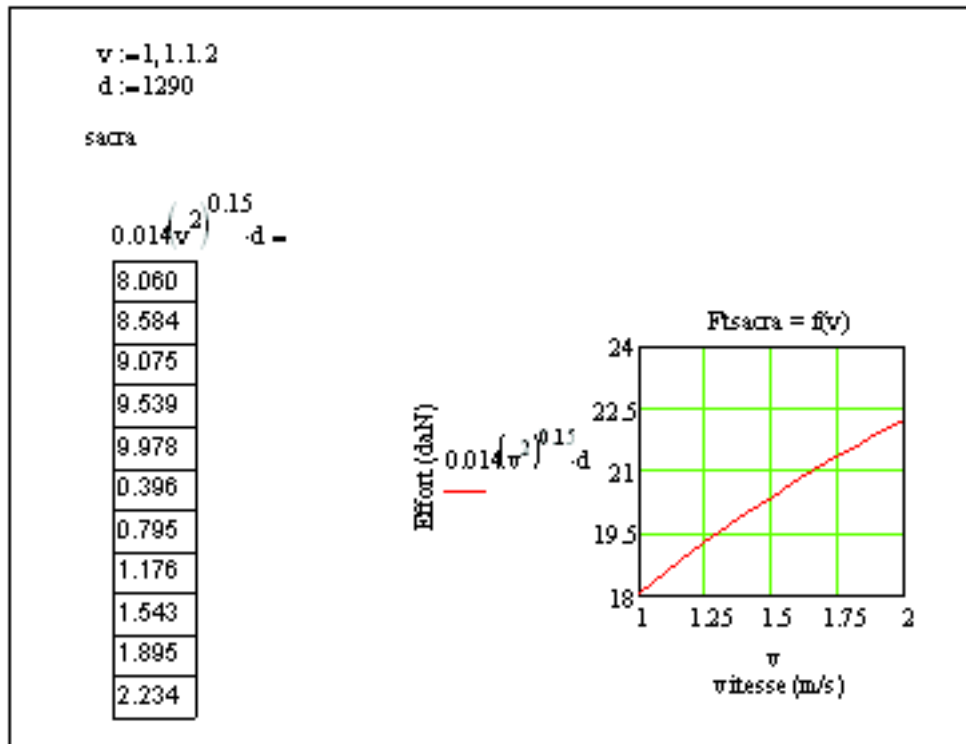
$$F_t \text{ ENPMA} = 0,035 \cdot v^{0.3} \cdot d$$

Pour une vitesse de 1,5 m / s et une densité apparente du sol de 1290 kg / m<sup>3</sup>, les valeurs de  $F_t$  ont été respectivement de 18,764 daN pour SACRA et 44,580 daN pour ENPMA. Ces valeurs sont appliquées au modèle réduit d'échelle 1 / 2.

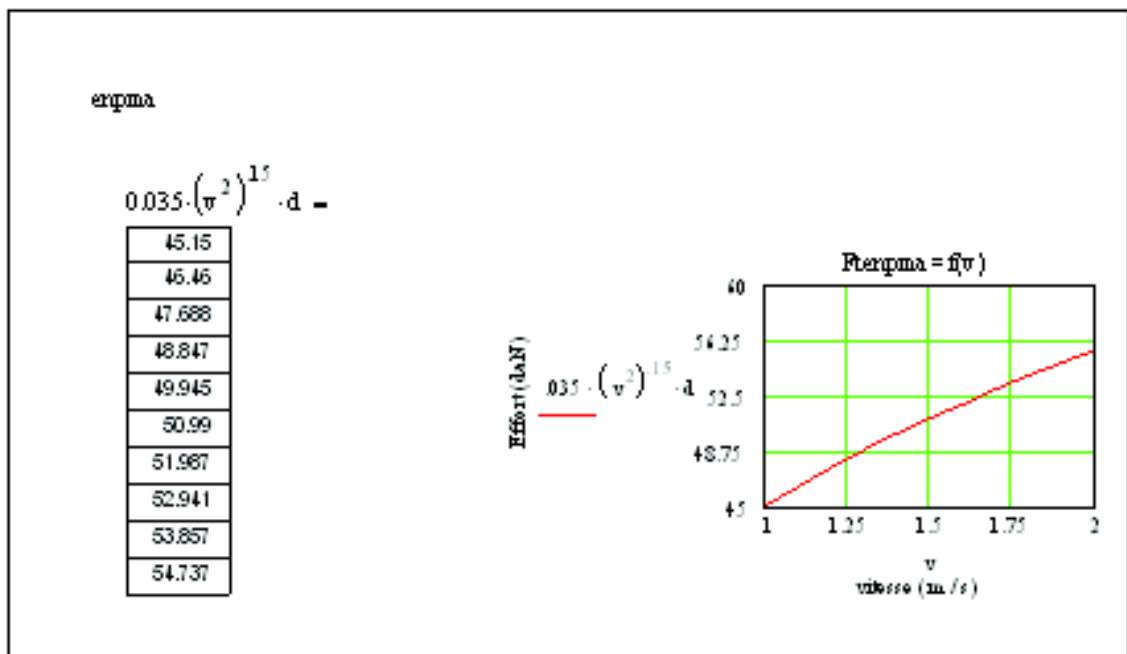
Tenant compte de ces relations, l'opérateur ne pouvant pas agir pour modifier la densité du sol, l'optimisation se fera par le choix de la vitesse adéquate pour la réalisation du travail. La vitesse de travail sera donc définie en relation avec la densité du sol et de la puissance de traction du tracteur. Si par contre la puissance de traction est limitée, l'augmentation de la vitesse de travail ne pourra se faire qu'en choisissant l'humidité du sol convenable, car l'augmentation de l'humidité réduirait dans les limites acceptables, voir la capacité au champs, la cohésion du sol d'où un effort de résistance à la traction moins important.

Dans ce qui suit, nous représentons, la variation de l'effort de résistance à la traction en relation avec la variation de la vitesse. Celle-ci est considérée variable et ayant une valeur maximale de 2 m / s (7,2 km / h). La densité apparente du sol étant fixée à une valeur de 1290 kg / m<sup>3</sup>. L'effort maximum obtenu est de 20,645 daN pour la forme sacra et de 60,351 daN pour la forme ENPMA. Ces valeurs sont évidemment applicables pour l'échelle 1 / 2.

Ces relations permettent d'estimer de façon précise l'effort nécessaire pour labourer un sol de densité apparente de 1290 kg / m<sup>3</sup> en choisissant la vitesse maximale de 2 m / s.



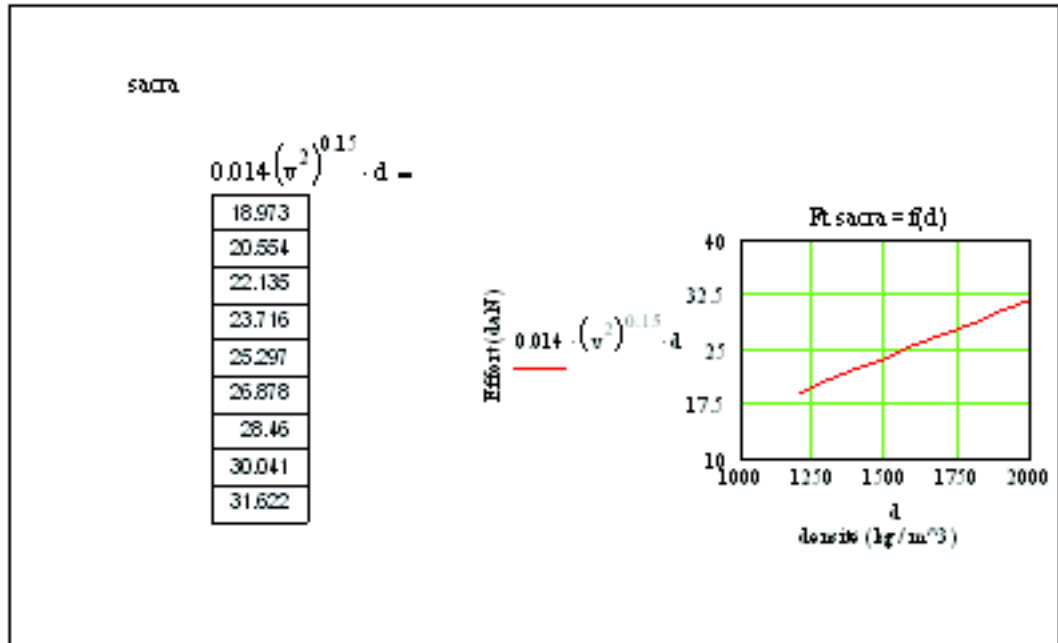
**Fig. 126** : Evolution de l'effort Ft en relation avec la vitesse pour une densité apparente du sol de  $1290 \text{ kg / m}^3$  pour SACRA



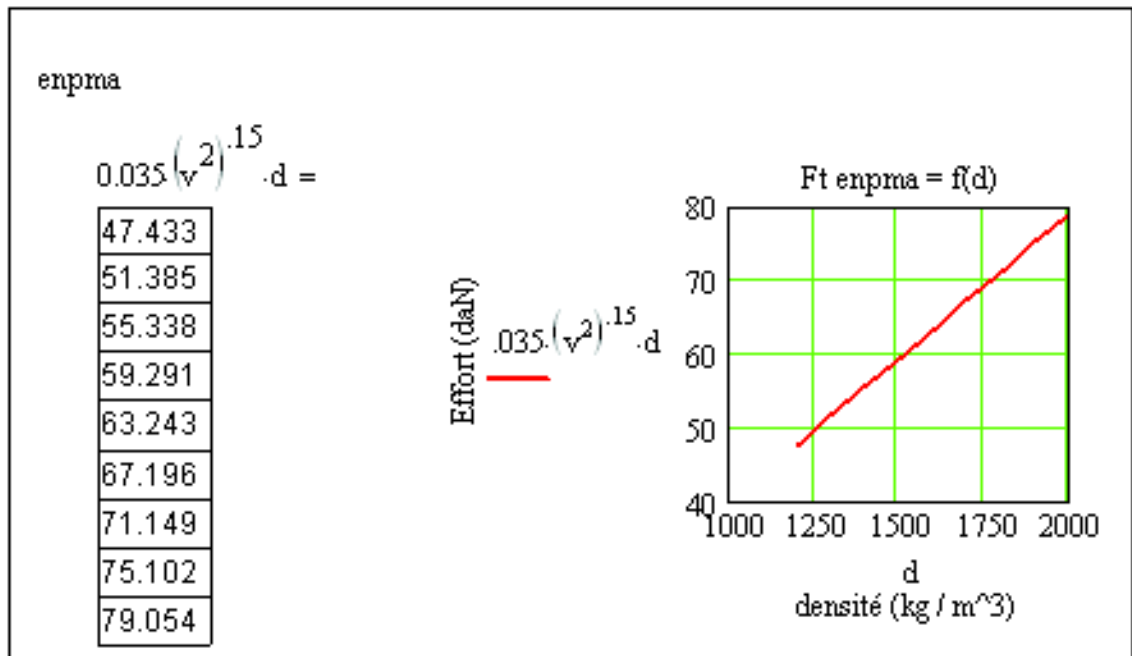
**Fig. 127** : Evolution de l'effort Ft en relation avec la vitesse pour une densité apparente du sol de  $1290 \text{ kg / m}^3$  pour ENPMA

Dans le cas où la vitesse de travail est fixée à  $1,5 \text{ m / s}$  ( $5,4 \text{ km / s}$ ), vitesse couramment utilisée pour les labours et que la densité apparente varie de  $1200$  à  $2000 \text{ kg / m}^3$ , l'effort

maximum obtenu pour la densité de  $2000 \text{ kg / m}^3$ , densité fréquemment rencontrée après les récoltes où le sol est tassé, est de 29,363 daN pour la forme SACRA et de 69,116 daN pour la forme ENPMA.



**Fig. 128** : Evolution de l'effort Ft en relation avec la densité apparente du sol pour une vitesse de 1,5 m /spour SACRA



**Fig. 129** : Evolution de l'effort Ft en relation avec la densité apparente du sol pour une vitesse de 1,5 m /spour ENPMA

Cette approche permet de choisir la vitesse en relation avec la densité apparente du sol et d'estimer avec précision, l'effort de résistance à la traction. L'avantage de ce modèle



est sa simplicité pour l'agriculteur car celui-ci peut évaluer la densité du sol et choisir la vitesse optimum.

#### 12.4.2. Deuxième cas : Les conditions de sol sont fixées

Dans ce cas, la minimisation du modèle portera sur le choix des caractéristiques géométriques des surfaces actives, c'est un problème de dimensionnement et donc de conception.

Dans ce cas : les valeurs  $C_F$  et  $C_T$ , étant connues, l'analyse portera sur le paramètre  $C_G$ , les relations donnant  $F_t$  pour chacune des formes sont respectivement :

$$F_{tSACRA} = 13,411 C_{Gsacra}$$

$$F_{tENPMA} = 0,136 C_{Genpma}$$

La relation générale donnant la caractéristique géométrique  $C_G$  est :

$$C_G = E^{4,13} \cdot \alpha^{5,94} \cdot \theta^{-16,01} \cdot k^{0,98} \cdot k_1^{12,98} \cdot k_2^{2,34} \cdot b^3$$

Dans cette relation, la valeur de E est de 0,5 pour les deux formes de corps de charrue à socs (échelle 1 / 2). Pour ce qui est de la largeur de travail  $b=0,15$  m pour SACRA et  $b = 0,16$  m pour la forme ENPMA. L'analyse de  $C_G$  portera donc sur les autres paramètres  $\alpha$ ,  $\theta$ ,  $k$ ,  $k_1$  et  $k_2$ . Les valeurs de ces trois derniers paramètres adimensionnés, restent inchangés pour chacune des formes, quelque soit l'échelle du corps de charrue. (tableau précédent). Les efforts seront donc :

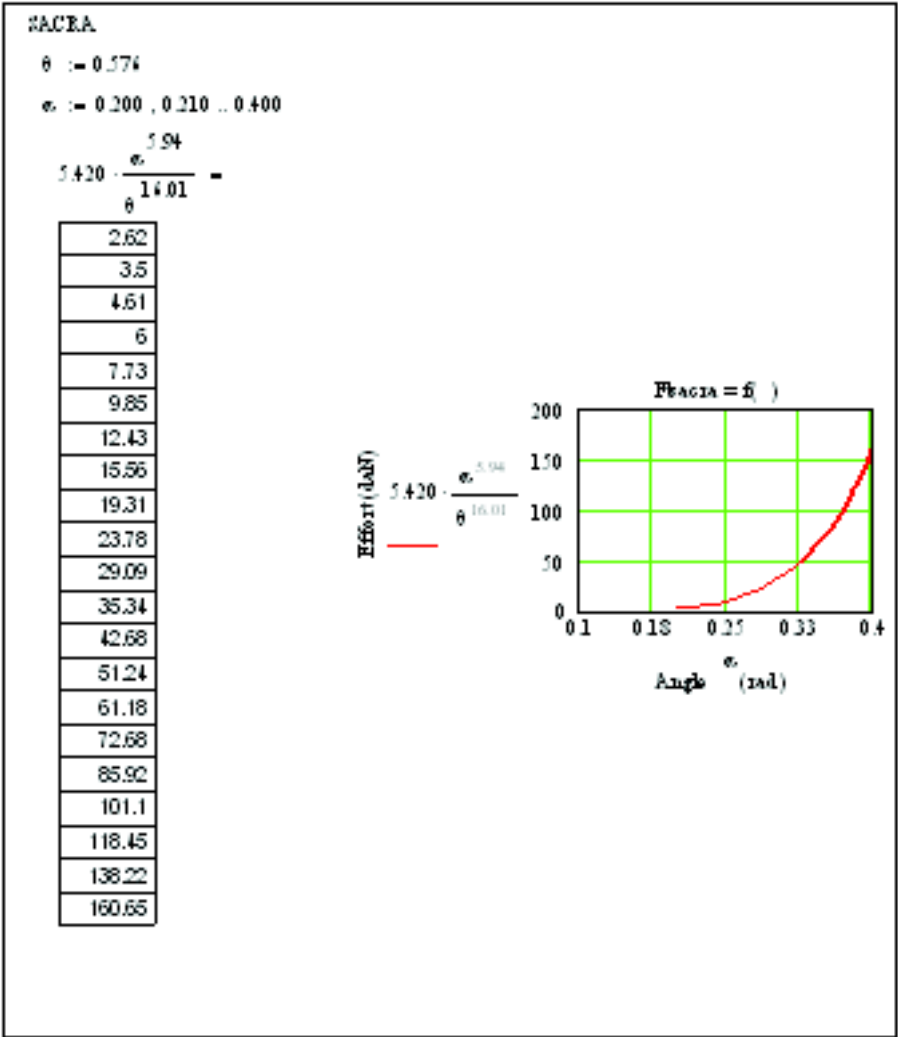
$$F_{tSacra} := 5.420 \cdot \frac{\alpha^{5.94}}{\theta^{16.01}}$$

et

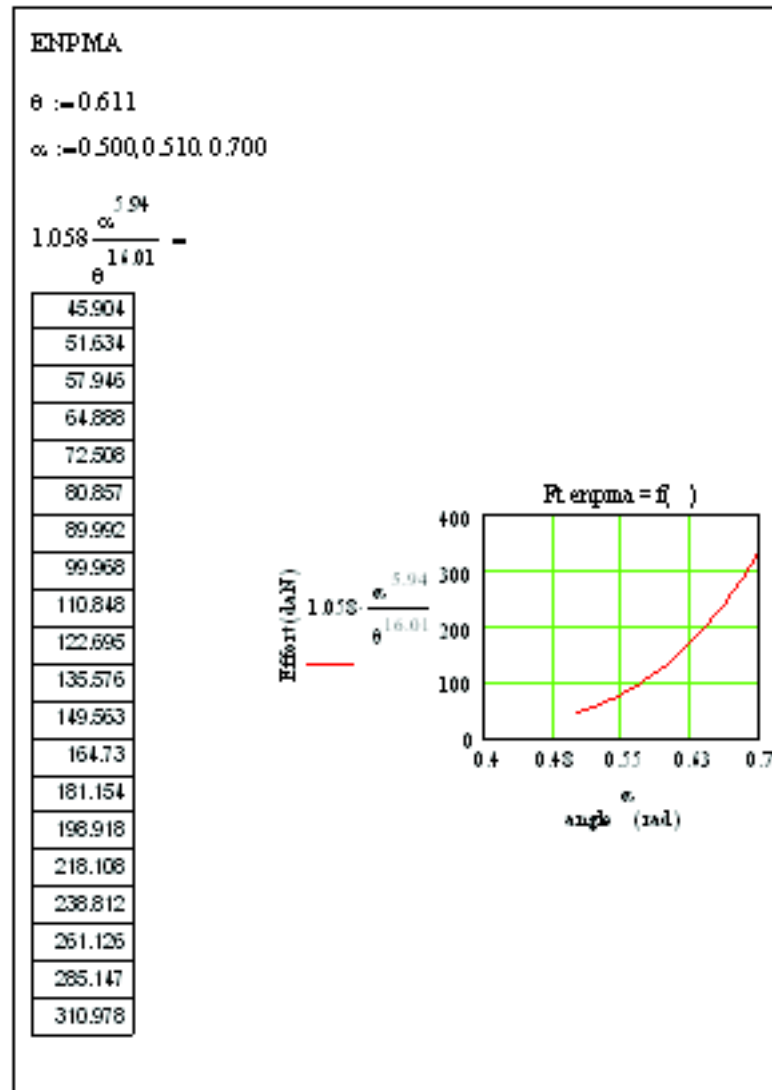
$$F_{tEnpma} := 1.058 \cdot \frac{\alpha^{5.94}}{\theta^{16.01}}$$

Les deux relations obtenues ci-dessus montrent que l'effort de résistance à la traction est proportionnel à l'angle d'entrure  $\alpha$  et est inversement proportionnel à l'angle de courbure  $\theta$  du versoir. L'optimisation de l'effort de résistance se fera donc en relation avec ces deux angles.

Pour cela faisant varier respectivement pour chacune des formes de surface active la valeur de  $\alpha$  en maintenant  $\theta$  constant, ensuite faisant varier  $\theta$  en maintenant  $\alpha$  constant. Les variations des efforts, en respectant ces hypothèses, sont illustrées par les graphes suivants :



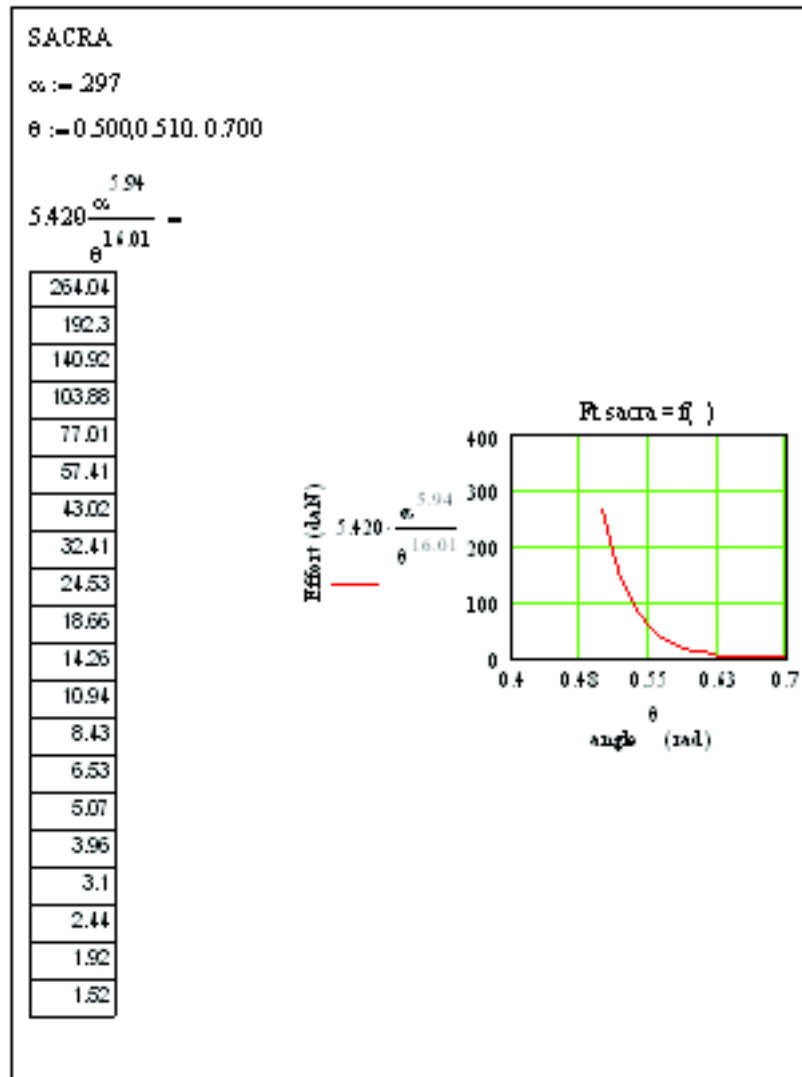
**Fig. 130** : Evolution de l'effort  $F_t$  en relation avec l'angle  $\alpha$  pour un angle d'inclinaison  $\theta$  de 0.576 rads pour la forme SACRA



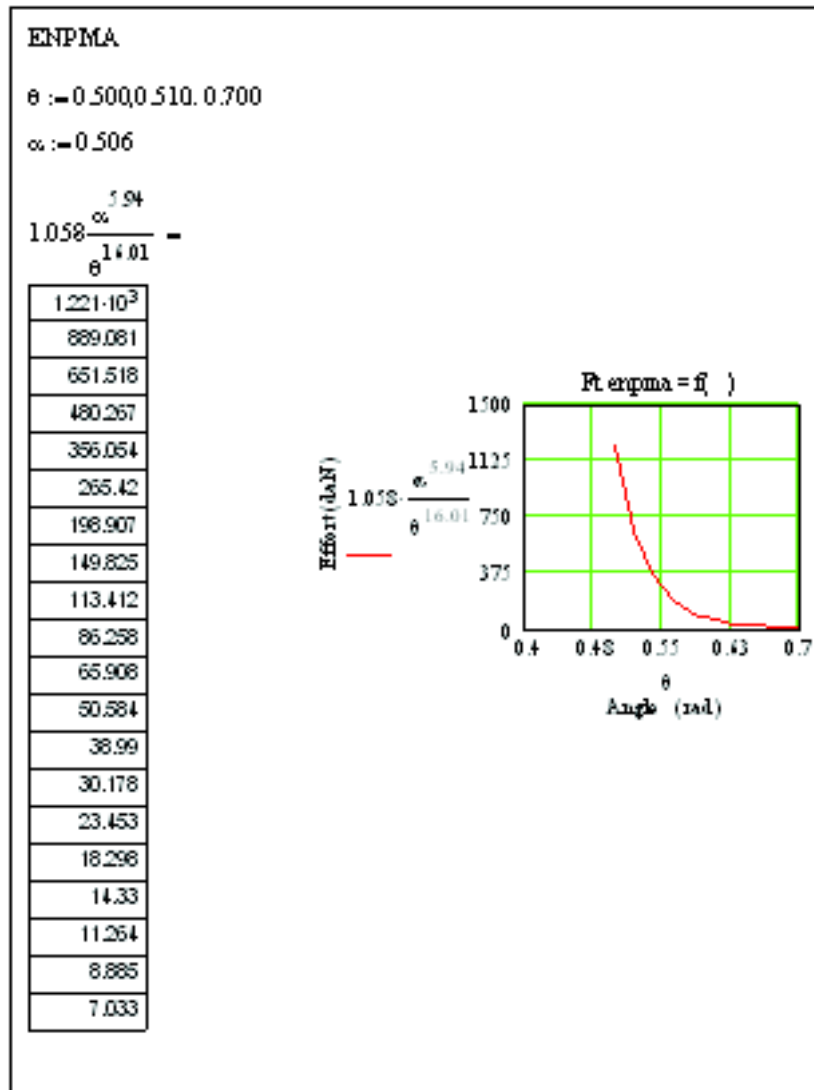
**Fig. 131** : Evolution de l'effort  $F_t$  en relation avec l'angle  $\alpha$  pour un angle d'inclinaison  $\theta$  de 0.611 rads pour la forme ENPMA

Ces représentations montrent que l'augmentation de l'angle  $\alpha$  entraîne, et ce brusquement, l'augmentation de l'effort. Cette variation est plus importante pour la forme ENPMA. Ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'un angle  $\alpha$  important induirait en plus du cisaillement du sol, une pression de la surface active sur le sol.

Pour ce qui est de la variation de l'angle moyen de courbure  $\theta$  de la surface active, représenté sur les figures ci-dessous, son choix sera dicté par l'importance du couvert végétal à enfouir, si celui-ci est important l'angle  $\theta$  doit avoir une valeur maximale pour un retournement efficace de la bande de terre. L'effort exigé sera alors moins important quand sa valeur augmente.



**Fig. 132 :** Evolution de l'effort  $F_t$  en relation avec l'angle d'inclinaison  $\theta$  pour un angle  $\alpha$  de 0,297 rad pour la forme SACRA



**Fig. 133 :** Evolution de l'effort  $F_t$  en relation avec l'angle d'inclinaison  $\theta$  pour un angle  $\alpha$  de 0,506 rad pour la forme ENPMA

Pour les deux formes l'effort de résistance diminue brusquement pour les valeurs inférieures à 0,55 rad, à partir de cette valeur, l'effort diminue. L'angle  $\theta$  étant compris entre la tangente au point considéré de la surface et le plan horizontal, nous en déduisons que plus l'angle est grand plus le rayon de courbure est grand, donc la surface est moins incurvée. Plus cet angle est important plus le retournement de la bande de terre est moindre. Pour notre cas, nous considérerons la valeur limite de  $\theta = 0,55$  rad, dans ce cas l'effort sera de 265,42 daN pour la forme ENPMA et de 57,41 daN pour la forme SACRA.

Tenant compte de ces valeurs optimisées de l'effort pour chacune des formes de surface actives, nous pouvons écrire :

Pour la forme SACRA :

$$5.42 \cdot \frac{\alpha^{5.94}}{\theta^{16.01}} := 57.41$$

Pour la forme ENPMA :

$$1.058 \cdot \frac{\alpha^{5.94}}{\theta^{16.01}} := 265.42$$

L'analyse de ces équations, après détermination des solutions de chacune d'elle, permet d'établir les relations entre les angles  $\alpha$  et  $\theta$  ce qui donne les résultats suivants :

SACRA

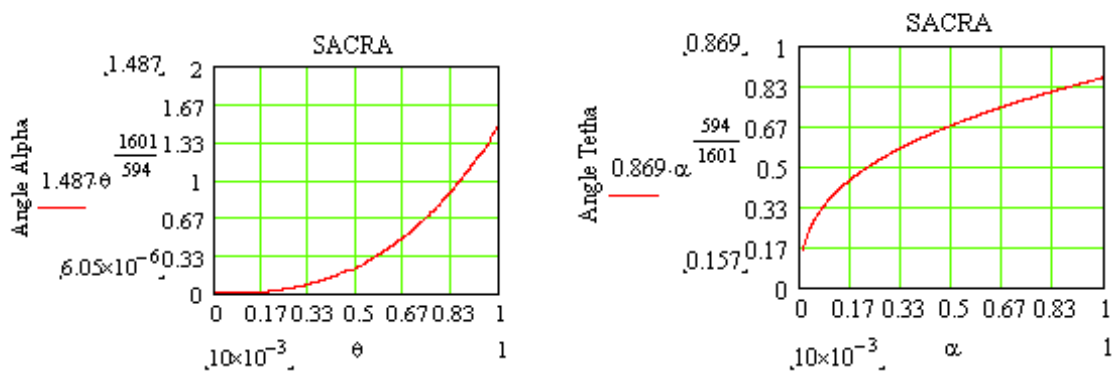
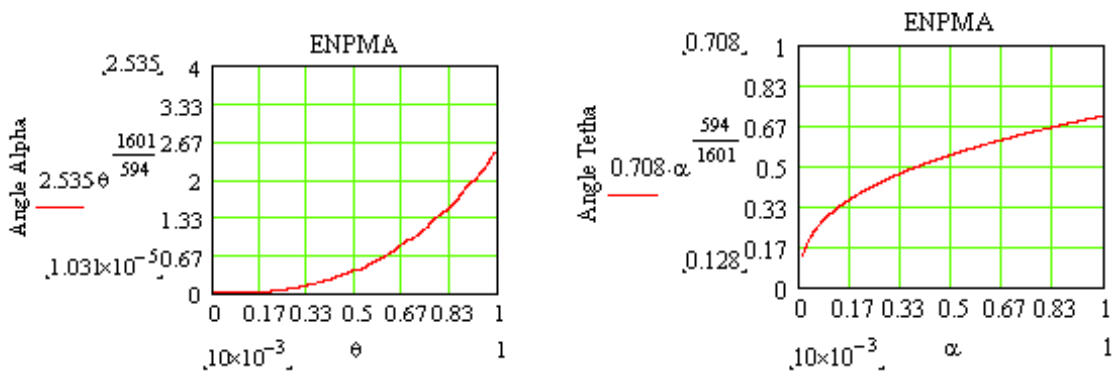


Fig.134 : relations entre les angles  $\alpha$  et  $\theta$

ENPMA



Ces résultats montrent que l'augmentation de l'angle de courbure  $\theta$  doit être accompagnée de celle de l'angle d'enture  $\alpha$  pour les deux formes de surfaces actives et ce de façon exponentielle. Par contre l'augmentation de l'angle  $\alpha$  entraîne une augmentation de l'angle  $\theta$  mais de façon moins accentuée.

L'intérêt de ces résultats est constructif, en effet, pour maintenir la forme des surfaces actives, à chaque valeur de l'un des angles correspond une valeur de l'autre. Les couples d'angles  $\alpha$  et  $\theta$  sont :

Tableau 72 : Couples de valeurs ( $\alpha$ ,  $\theta$ ) pour la forme SACRA

Angle $\theta$ fixé	Angle $\alpha$	Angle $\alpha$ fixé	Angle $\theta$
0,2	0,019	0,2	0,478
0,25	0,035	0,25	0,52
0,3	0,058	0,3	0,556
0,35	0,088	0,35	0,589
0,4	0,126	0,4	0,619
0,45	0,173	0,45	0,646
0,5	0,23	0,5	0,672
0,55	0,297	0,55	0,696
0,6	0,375	0,6	0,719
0,65	0,466	0,65	0,741
0,7	0,569	0,7	0,761
0,75	0,685	0,75	0,781
0,8	0,815	0,8	0,8
0,85	0,96	0,85	0,818
0,9	1,119	0,9	0,836
0,95	1,295	0,95	0,853
1	1,487	1	0,869

Tableau 73 : Couples de valeurs ( $\alpha$ ,  $\theta$ ) pour la forme ENPMA

Angle $\theta$ fixé	Angle $\alpha$	Angle $\alpha$ fixé	Angle $\theta$
0,2	0,033	0,2	0,39
0,25	0,06	0,25	0,423
0,3	0,099	0,3	0,453
0,35	0,15	0,35	0,48
0,4	0,213	0,4	0,504
0,45	0,295	0,45	0,526
0,5	0,391	0,5	0,547
0,55	0,506	0,55	0,567
0,6	0,64	0,6	0,586
0,65	0,794	0,65	0,603
0,7	0,969	0,7	0,62
0,75	1,168	0,75	0,636
0,8	1,389	0,8	0,652
0,85	1,636	0,85	0,667
0,9	1,908	0,9	0,681
0,95	2,208	0,95	0,695
1	2,535	1	0,708

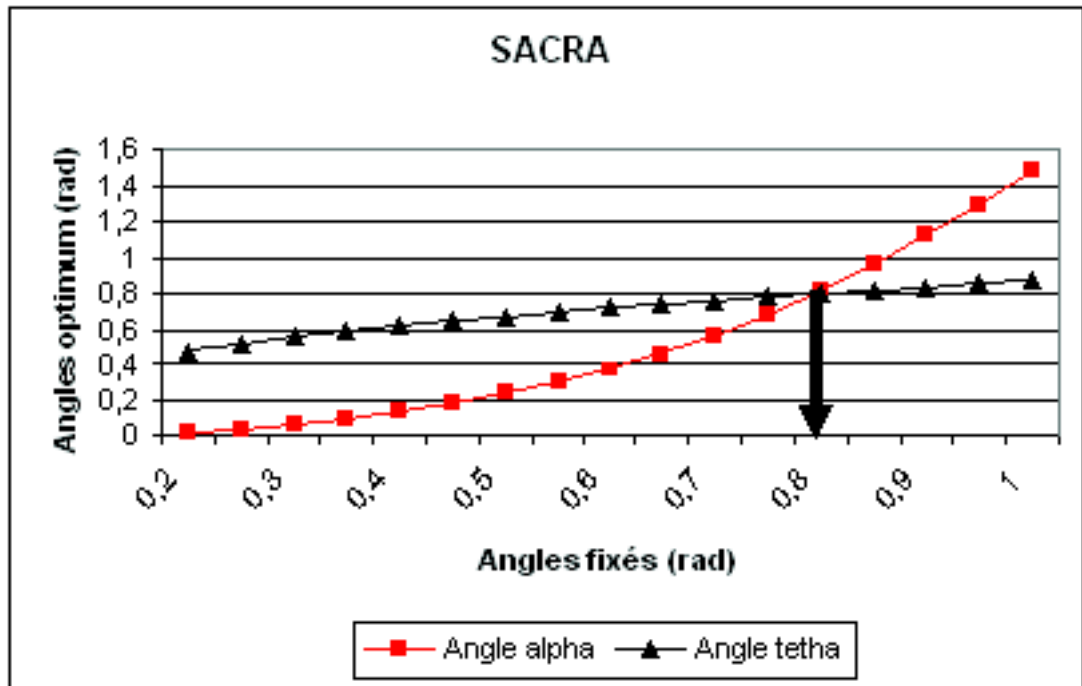


Fig. 135: Valeurs optimales des angles  $\alpha$  et  $\theta$  pour la forme SACRA

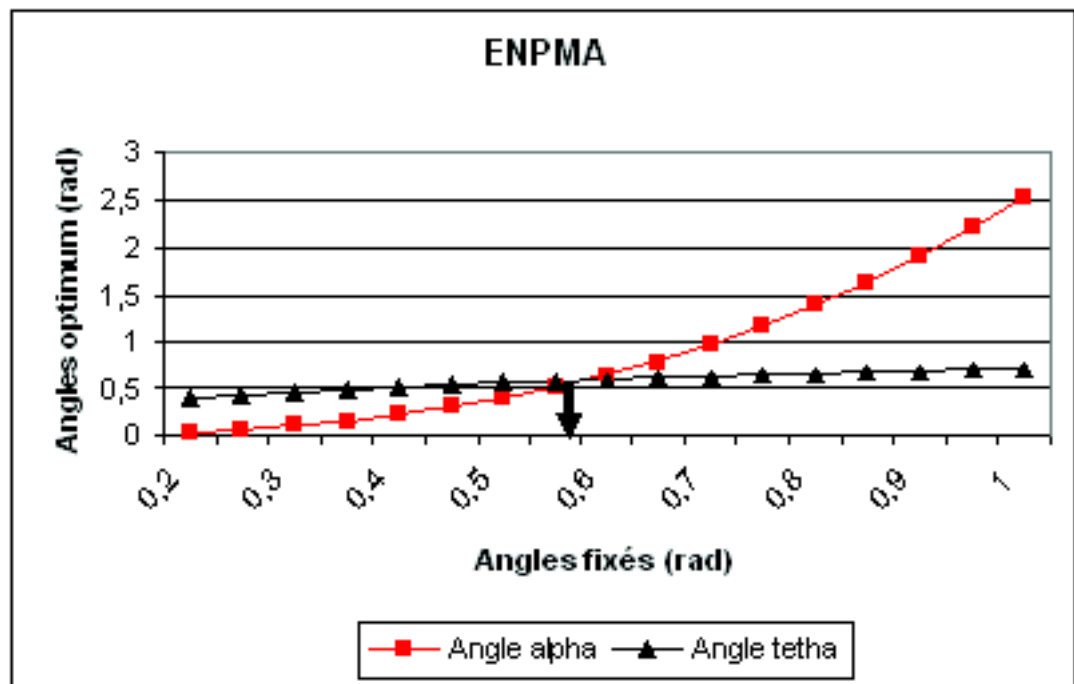


Fig.136: Valeurs optimales des angles  $\alpha$  et  $\theta$  pour la forme ENPMA

Les couples d'angles à retenir sont donc :

Pour la forme SACRA  $\alpha = 0,815$  radians (46,7 degrés) et  $\theta = 0,80$  radians (45,8 degrés)

Pour la forme ENPMA  $\alpha = 0,506$  radians (29 degrés) et  $\theta = 0,567$  radians (32,5 degrés)



## 12.5. Application du modèle de l'effort pour les corps de charrue de dimensions réelles.

Pour l'échelle réelle 1/1, ces valeurs angulaires resteront inchangées car ces paramètres considérés comme adimensionnés (sans dimension). Dans ce cas (échelle 1/1), les autres paramètres introduits dans le modèle proposé, telles que la profondeur et la largeur des corps de charrue, doivent être considérés à leurs valeurs réelles. Les valeurs réelles sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau 74 : Valeurs des paramètres introduits dans le modèle de Ft

Formes de la surface active	Rapport k = a / b	Rapport k <sub>2</sub> =d <sub>1</sub> /d <sub>3</sub>	Largeur b (m)	Coefficient de proportionnalité Ro <sup>1/2</sup>	Coefficient de correction ε
SACRA	0,80	1,290	0,31 m	1,931	1000
ENPMA	0,74	1,464	0.35 m	1,976	10

Ce qui donne dans le cas du modèle réel (échelle 1/1) où les valeurs de les largeurs de travail changent tel que mentionné sur le tableau précédent :

Les coefficients de forme reste inchangés pour chacune des formes :

$$C_F = \varepsilon \cdot R_0 e^{-14.54}$$

$$C_{FSACRA} = 9,782 \cdot 10^{-4}$$

$$C_{FENPMA} = 1.001 \cdot 10^{-5}$$

Les coefficients des conditions de travail contenant le paramètre b (largeur de travail) deviennent :

$$C_T = \left[ \left( \frac{v^2}{g \cdot b} \right)^{0.15} \cdot g \cdot d \right]$$

$$C_{TSACRA} = 13400$$

$$C_{TENPMA} = 13160$$

Les coefficients des caractéristiques géométriques contenant également b, deviennent :

$$C_G = \left[ E^{4.13} \cdot \alpha^{5.94} \cdot \theta^{-16.01} \cdot (k^{0.98}) \cdot (k_1^{12.98}) \cdot (k_2^{2.34}) \cdot b^3 \right]$$

$$C_{GSACRA} = 28,57$$

$$C_{GENPMA} = 13010$$

Pour ces valeurs les efforts de résistance à la traction seront donc de:

· Pour la forme SACRA :  $F_{TSACRA} = 9,782 \cdot 10^{-4} \cdot 13400 \cdot 28,57 = 374,492 \text{ daN}$

· Pour la forme ENPMA :  $F_{TENPMA} = 1.001 \cdot 10^{-5} \cdot 13160 \cdot 13010 = 1714 \text{ daN}$

Il est à remarquer que la valeur de l'effort pour la forme ENPMA est très grande, ceci est dû à la valeur de  $C_{GENPMA}$  qui est de 13010 alors que celle de la forme SACRA n'est que de 28,57. Pour réduire la valeur du coefficient des caractéristiques géométriques  $C_{GENPMA}$  sans changer la forme générale et surtout le mode d'action de la surface active et en maintenant les valeurs des caractéristiques angulaires, il suffira d'agir sur les valeurs des coefficients  $k$ ,  $k_1$  ou  $k_2$ .

Comme l'exposant de  $k_1$  correspondant au rapport de la longueur totale ( $L_1$ ) du corps de charrue sur sa hauteur ( $h$ ) est le plus élevé, une légère modification de sa valeur sera sans effet sur la forme générale et permettra de réduire fortement la valeur de l'effort de résistance à la traction. L'autre caractéristique qui pourrait également être modifiée est la largeur de travail ( $b$ ) du corps de charrue ENPMA, cependant la variation de la largeur de travail entraînera la variation du coefficient  $k = a/b$ . La largeur de travail est aussi un paramètre important pour la dynamique du retournement de la bande de terre et influe sur la capacité de travail ( $W = 0.36 \times B \times v \times t$ ),  $b$  sera donc maintenue à sa valeur initiale de 0,35 m. Cela revient à modifier la valeur du coefficient  $C_{GENPMA}$  en modifiant la valeur de  $k_1$ .

Pour cela, nous fixerons la valeur de l'effort  $F_{TENPMA}$  proche de celle de la forme SACRA pour uniformiser l'application du modèle général en respectant les caractéristiques angulaires, ce qui donnera :

**$k_1 = 1,9$ ,  $C_{GENPMA} = 2846$  et l'effort  $F_{TENPMA} = 374,908 \text{ daN}$ .**

La variation de  $k_1$  portera sur celle de la hauteur ( $h$ ) ou de la longueur totale ( $L_1$ ) du corps de charrue, la hauteur du corps de charrue doit être maintenue pour respecter la profondeur de travail, la profondeur maximum de travail d'un corps de charrue pour un labour moyen est de 0.25 à 0.30 m correspond à la hauteur du corps de charrue. L'intervention se fera sur la longueur projetée sur le plan XOZ ( $L_1$ ).

La valeur initiale de  $L_1$  est de 0,640 m et la hauteur  $h$  est de 0.30 m, ce qui donne pour avoir  $k_1 = 1,9$  une valeur de  $L_1 = 0,57 \text{ m}$ .

Ces valeurs calculées à partir du modèle de l'effort de résistance à la traction, à savoir 374,492 daN pour SACRA et 374,908 daN pour ENPMA sont proches des valeurs calculées à l'aide des modèles de Gorjatchkin et de Gee Cloug (voir chapitre précédent), ce qui nous permet de confirmer la validité du modèle établi.

Nous signalerons également que les valeurs obtenues avec le modèle établi sont calculées avec une vitesse de 2 m / s.

En conclusion les nouvelles caractéristiques géométriques, notamment angulaires proposées pour la conception des surfaces actives permettent de réduire l'effort de résistance à la traction.

**Tableau 75 : Valeurs initiales et corrigées des caractéristiques géométriques des surfaces actives des deux corps de charrues de dimensions réelles.**

	SACRA		ENPMA	
	Valeurs initiales	Valeurs corrigées	Valeurs initiales	Valeurs corrigées
h(m)	0,425	0,425	0,440	0,300
b(m)	0,310	0,300	0,350	0,350
$\alpha$ (rad)	0,297	0,815	0,506	0,800
$\theta$ (rad)	0,576	0,506	0,611	0,567
$\gamma$ (rad)	0,681	0,681	0,663	0,663
k	0,806	0,806	0,714	0,714
k1	1,714	1,714	2,136	1,900
k2	1,290	1,290	1,464	1,464

Les photos ci-dessous montrent clairement la modification de la surface active du corps de charrue ENPMA suivant les trois plans de travail. La partie arrière du versoir est plus arrondie avec une courbure plus nette après optimisation.

Les modifications apportées sur la surface active du corps de charrue de forme SACRA sont cependant moins importantes car seuls les angles  $\alpha$  et  $\theta$  ont été changés.

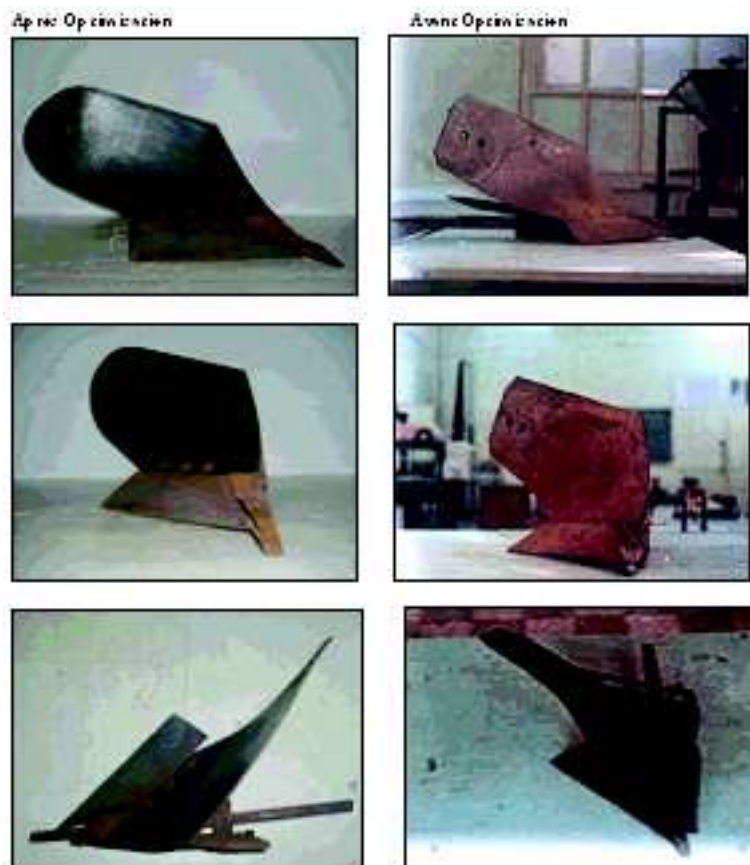


Fig.137 : Forme de la surface active ENPMA après et avant optimisation

## Chapitre 13. Analyse du comportement mécanique des surfaces actives des corps de charrue

## 13.1. Introduction

---

Sous l'action du sol, les surfaces actives des corps de charrues à socs sont sollicitées par l'effort de résistance à la traction. Celui-ci entraîne des déformations élastiques qui seront quantifiées par les contraintes normales (traction et compression), les contraintes de cisaillement dites tangentielles et les déformations plastiques du matériau avec lequel est conçu le corps de charrue (soc et versoir). Il sera donc intéressant d'analyser le comportement mécanique du corps de charrue, qui est très sollicité pendant le labour, afin de choisir convenablement les caractéristiques du matériau avec lequel il sera conçu. Cela permettra de limiter la détérioration des surfaces actives par fatigue du matériau.

Actuellement le versoir du corps de charrue est fabriqué avec un acier triplex, acier à ressort manganosilicieux (C 0,47 à 0,55 ; Si 1,5 à 1,8 Mn (0,5 à 0,8) de résistance pratique de 70 à 90 daN/mm<sup>2</sup>, outre ceci, il est conseillé de tremper à l'huile à 830-860 °C la partie travaillante pour limiter l'usure de la surface active.

Nous signalerons également que les déformations élastiques de la surface active sont étroitement liées à sa géométrie. Ces déformations sont donc fonction des caractéristiques géométriques du corps de charrue.

## 13.2. Méthodologie

---

Les principales étapes de cette étude sont respectivement :

- Tracer les contours (3D) des surfaces actives à partir des coordonnées X,Y et Z.
- Fixer les surfaces actives par des appuis fixes
- Appliquer un effort de résistance à la traction suivant une direction, pour cela nous choisirons l'effort de cisaillement du sol par le soc d'une valeur de 1000 [N].
- Utiliser le module AMFEA (Analyse Mécanique par la méthode des Eléments Finis) du logiciel "Autocad Mechanical". Ce module permet de simuler la déformation d'un solide sous l'action d'un torseur.

L'utilisation de ce module donne les caractéristiques mécaniques suivantes :

### 13.2.1. Contrainte de Von Mises

Soit  $(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz})$  les trois contraintes principales en un point M d'un solide. Nous supposons que la limite élastique en traction simple est égale à la limite élastique en compression simple.

Soit  $\sigma_E$  cette limite élastique.

Comment vérifier, dans un état de contrainte complexe, que la limite élastique n'est pas dépassée, pour cela on admet que cette limite est atteinte lorsqu'une certaine fonction f des contraintes principales est égale à limite élastique du matériau en traction simple :

$$f(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}) = \sigma_E$$

Le domaine élastique en un point du solide est donc défini par la relation :

$$f(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}) < \sigma_E$$

La contrainte de Von Mises est donnée par la relation :

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2 \right]} < \sigma_E$$

L'analyse de cette contrainte permet de prévoir l'intensité de la déformation du sol en relation avec son état initial.

### 13.2.2. Contraintes normales suivant les trois directions X, Y et Z.

Ces contraintes nous renseignent également sur la déformation que subira le sol suivant les trois directions de travail du corps de charrue à socs. En effet la contrainte normale suivant l'axe des x (direction d'avancement) nous renseignera sur la compression du sol, suivant l'axe des y il s'agira de prévoir le degré de retournement de la bande de terre, par contre la contrainte suivant l'axe des z nous informera sur le degré de soulèvement de la bande de terre et par conséquent sur l'indice de foisonnement. La relation fondamentale donnant la valeur de ces contraintes est la suivante :

$$\sigma = \frac{N}{S} \quad [\text{daN} / \text{mm}^2]$$

Avec: N : Effort normal suivant la direction considérée

S : Section normale à la direction considérée

L'intérêt de ces contraintes est également d'ordre technologique, elles permettent en effet de choisir la valeur de la section ou de la matière dont sera constituée la surface active du corps de charrue.

### 13.2.3. Contraintes tangentielles de cisaillement suivant XY

Connaissant les caractéristiques mécaniques du matériau, donc de la contrainte de cisaillement admissible, avec lequel est fabriqué le versoir, l'évaluation de la variation de la contrainte effective de cisaillement sur la surface active du corps de charrue nous renseignera sur la sollicitation que subira la bande de terre pendant le travail.

La contrainte de cisaillement est donnée par la relation :

$$\tau = \frac{T}{S} \quad [\text{daN} / \text{mm}^2]$$

avec : T : Effort tangentiel suivant la direction d'avancement du corps de charrue

S : Section de la surface active (dans notre cas : S = longueur de l'élément fini considéré x épaisseur du versoir).

Cette analyse a également un intérêt technologique qui est celui du choix des caractéristiques mécaniques du matériau à utiliser pour la fabrication du versoir à partir des propriétés physico mécaniques du sol où évoluera le corps de charrue.

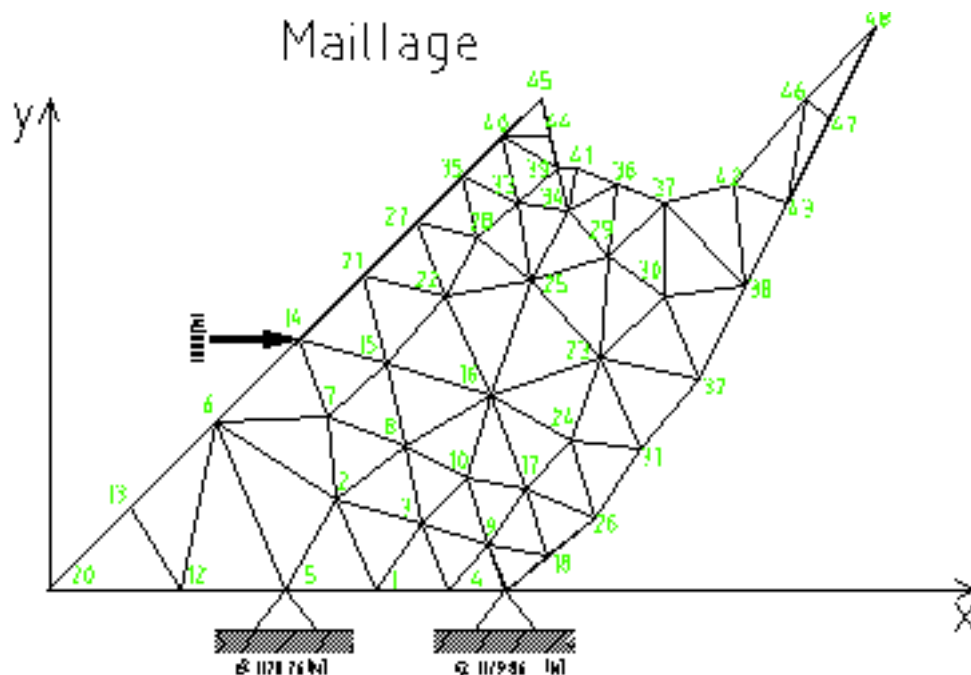
### 13.2.4. Déformation du matériau en [mm]

Sous l'action des différentes sollicitations que subit le corps de charrue, celui-ci est appelé à se déformer suivant les trois directions de travail. Cette déformation est évidemment fonction de la résistance du sol (cohésion et humidité).

Après ces brefs rappels des principales notions de contraintes et de déformation, une analyse par simulation du comportement des surfaces actives des deux corps de charrue sous l'action d'un effort de 1000 Newtons appliqué au niveau du soc, a été réalisée. Les résultats de cette analyse sont représentés par les figures suivantes et ce respectivement pour la surface de forme SACRA et pour la surface de forme ENPMA comme suit :

- Maillage qui consiste en une décomposition de la surface en éléments finis triangulaires
- Définition des caractéristiques mécaniques initiales tels que le module d'élasticité longitudinale ou module de Young  $E$  qui est fixé à  $210000 \text{ N/mm}^2$ , le coefficient de Poisson  $\nu$  qui est fixé à  $0.3$  et la résistance pratique ou contrainte à la limite élastique  $R_e = 235 \text{ N/mm}^2$  (valeurs utilisées en Algérie). (Le choix de ces valeurs est à titre indicatif et ne sont qu'une référence à partir de laquelle se fera le choix du matériau à utiliser et des traitements à lui faire subir).
- Détermination de la variation des contraintes de Von Mises
- Détermination de la variation des contraintes de cisaillement
- Détermination de la déformation élastique de la surface active
- Détermination des contraintes normales suivant les trois directions de travail (x, y et z)

### 13.3. Représentation des contraintes et des déformations des surfaces actives



**Fig. 138:** Maillage de la surface active de la forme SACRA

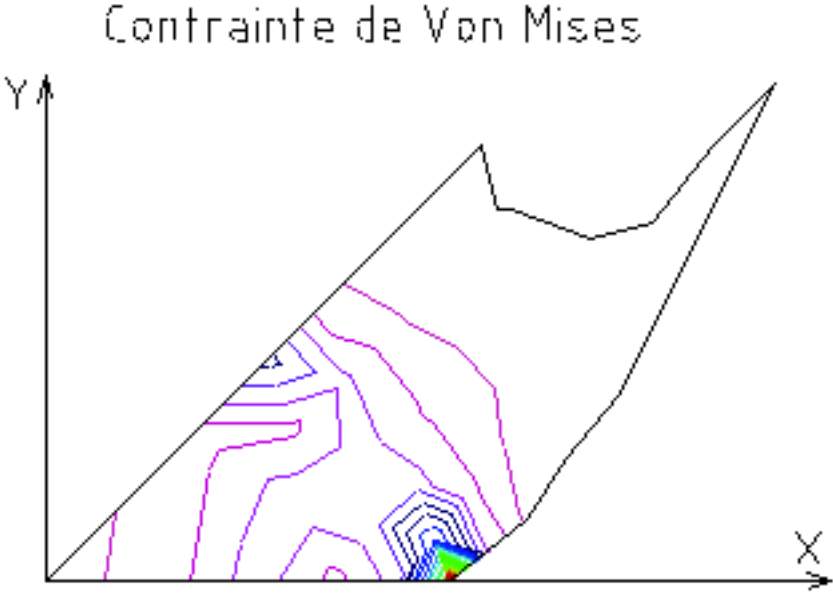


Fig. 139 : Contrainte de Von Mises pour la forme SACRA

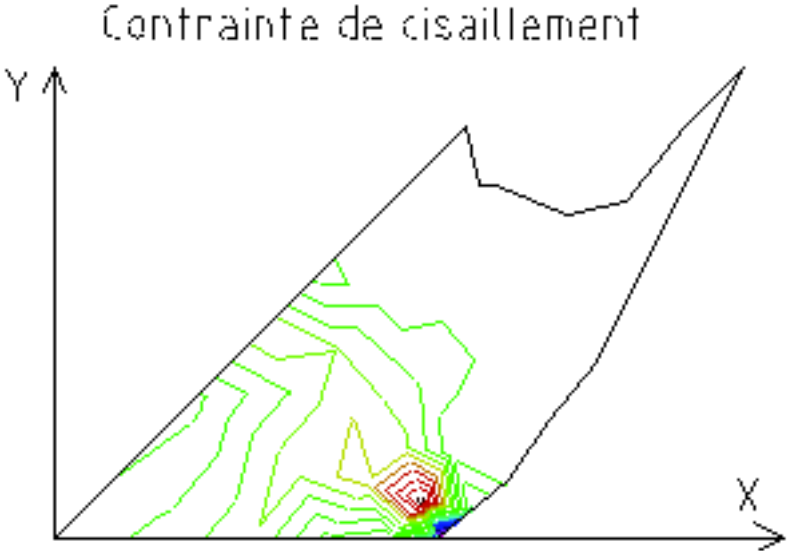
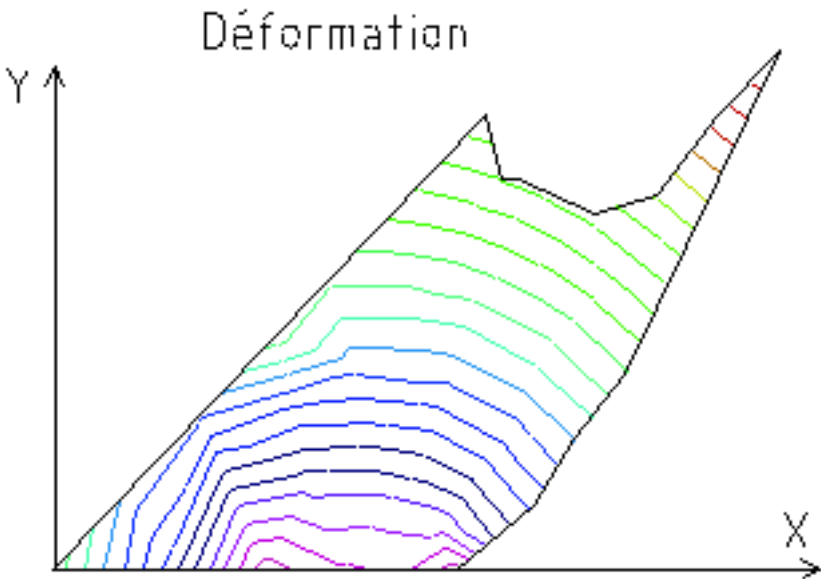
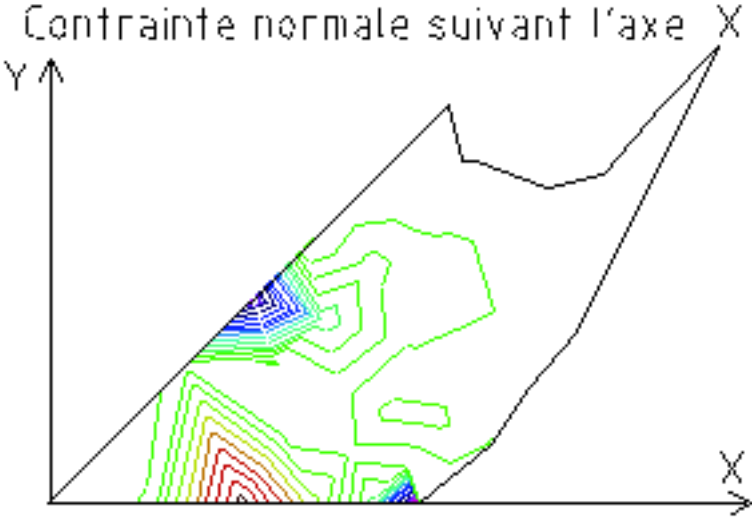


Fig. 140 : Variation de la contrainte de cisaillement pour la forme SACRA



**Fig. 141 :** Variation de la déformation de la surface de SACRA



**Fig. 142 :** Variation de la contrainte normale suivant la direction OX pour SACRA





Fig.143: Variation de la contrainte normale suivant la direction OY pour SACRA

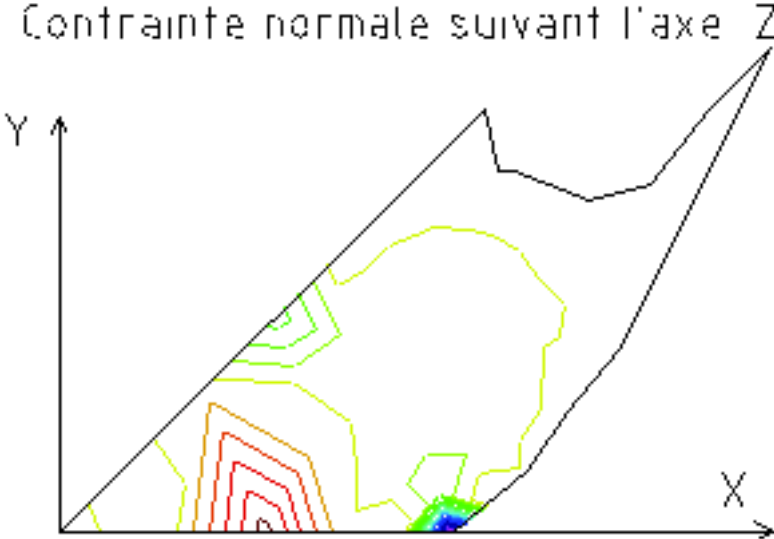


Fig. 144 : Variation de la contrainte normale suivant la direction OZ pour SACRA

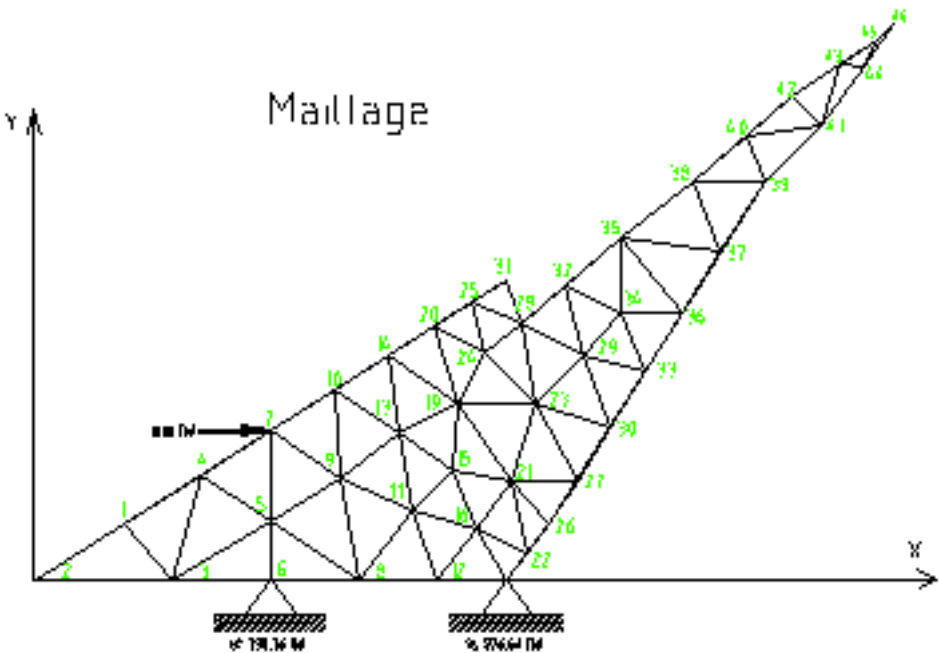


Fig. 145: Maillage de la surface active de la forme ENPMA

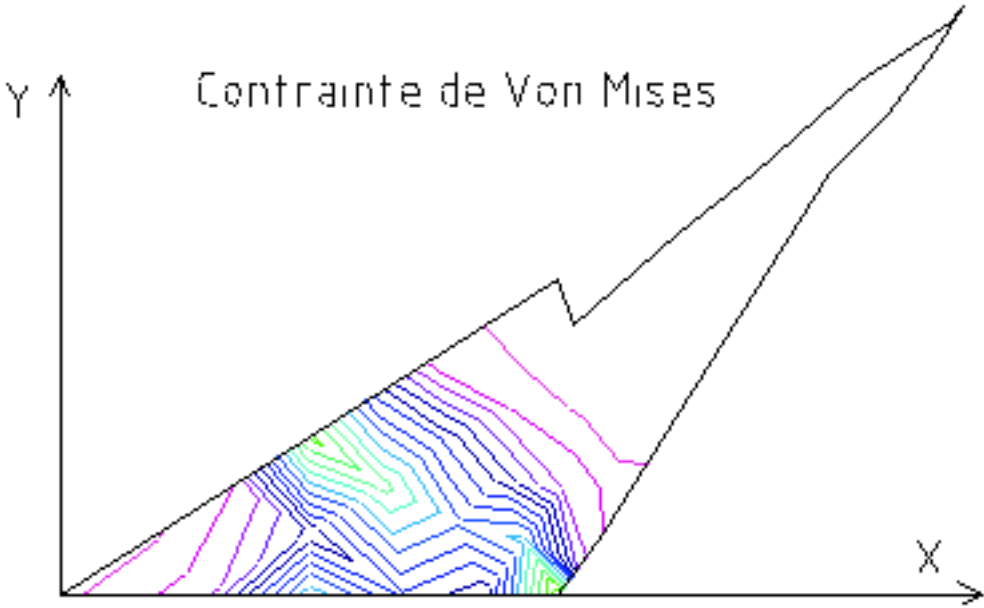


Fig. 146: Contrainte de Von Mises pour la forme ENPMA

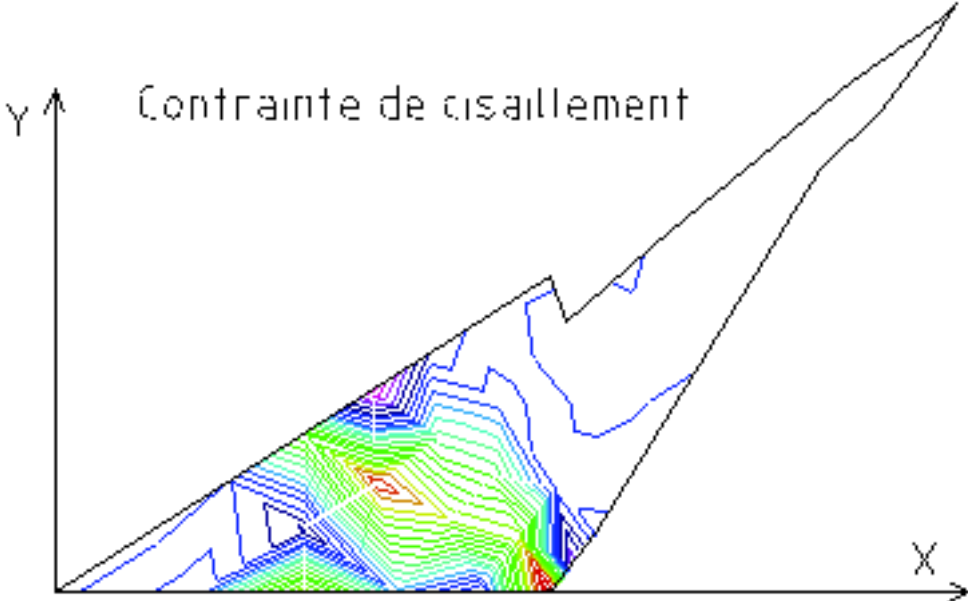


Fig.147 : Variation de la contrainte de cisaillement pour la forme ENPMA

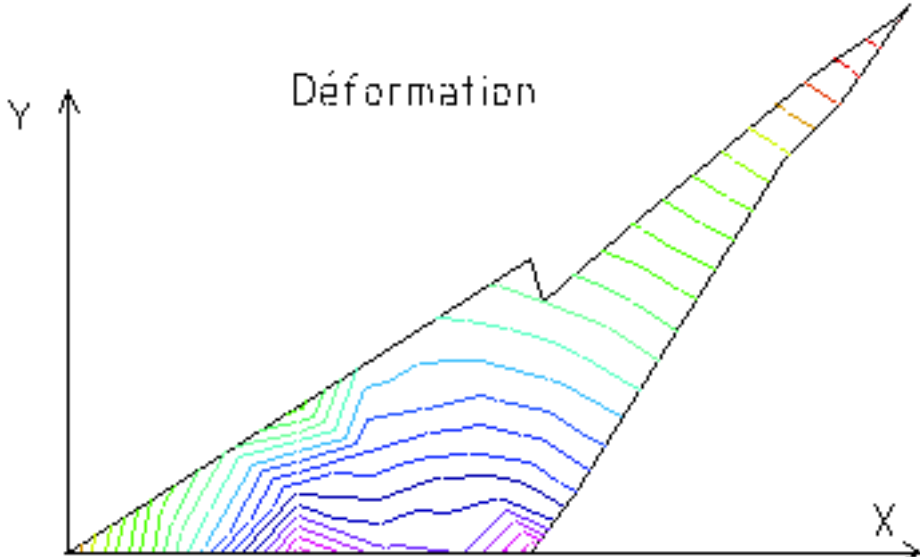
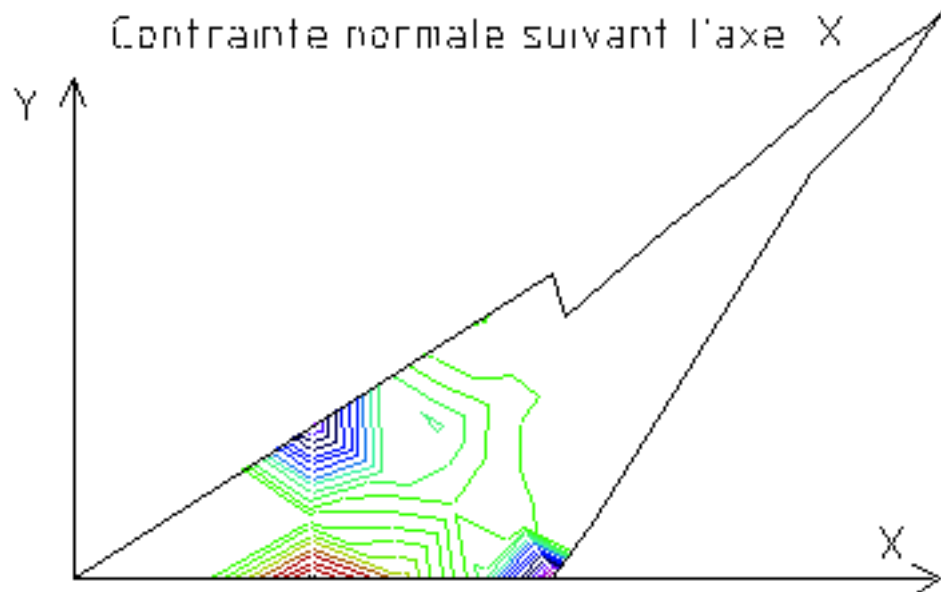
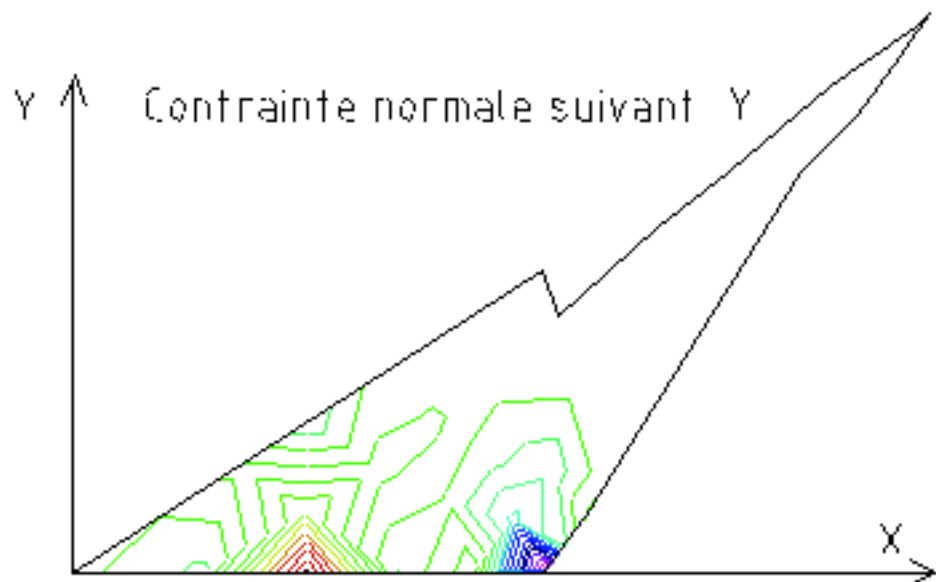


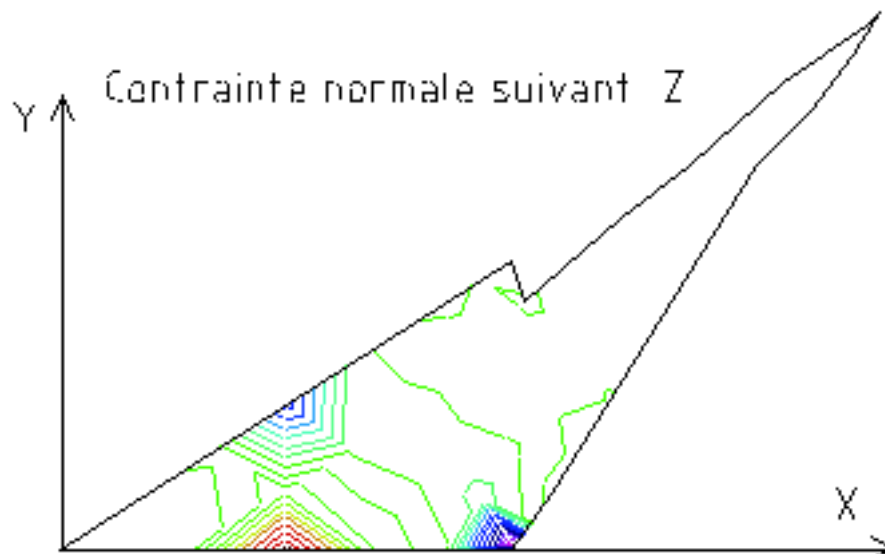
Fig. 148: Variation de la déformation de la surface de ENPMA



**Fig.149 :** Variation de la contrainte normale suivant la direction OX pour ENPMA



**Fig. 150:** Variation de la contrainte normale suivant la direction OY pour ENPMA



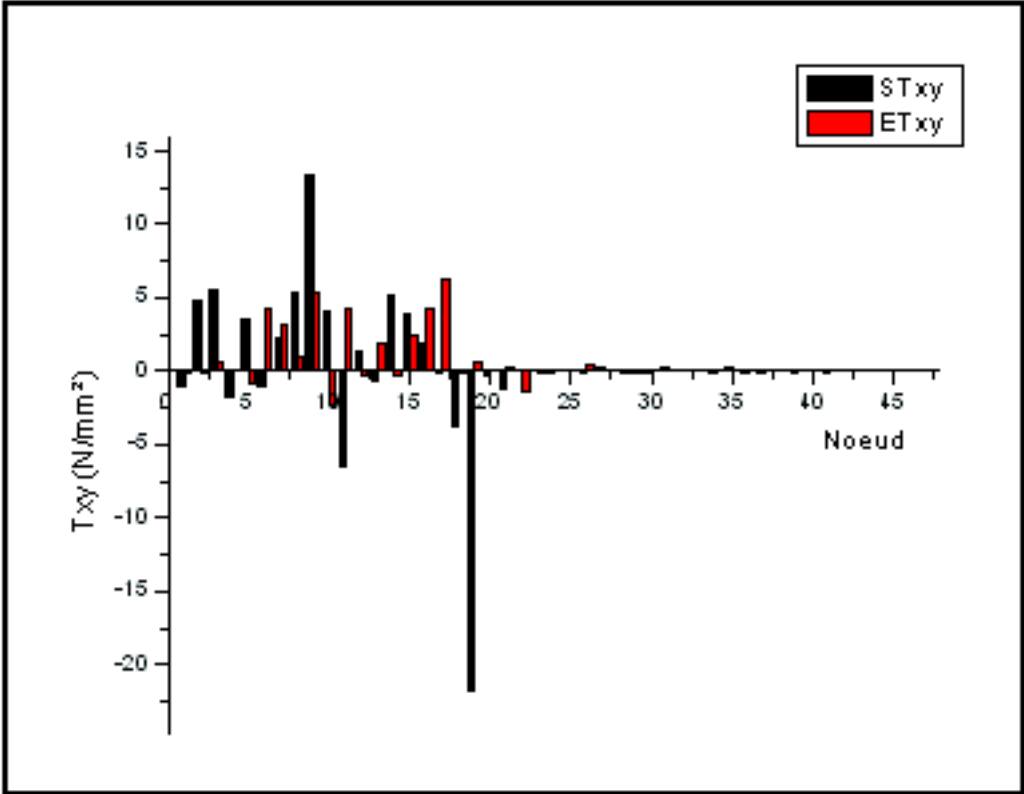
**Fig. 151:** Variation de la contrainte normale suivant la direction OZ pour ENPMA

L'analyse de ces représentations graphiques de la variation des contraintes normales suivant les directions de travail du corps de charrue et des contraintes de cisaillement, montre le comportement du matériau aux différents points (nœuds) de la surface active. L'intérêt de cette étude est le choix des caractéristiques mécaniques du matériau utilisé pour la fabrication des corps de charrue à socs ; ceci pour le concepteur des charrues à socs. Pour l'agronome, l'intérêt de cette étude réside dans le comportement du sol sur la surface active du corps de charrue.

### 13.4. Résultats de l'analyse

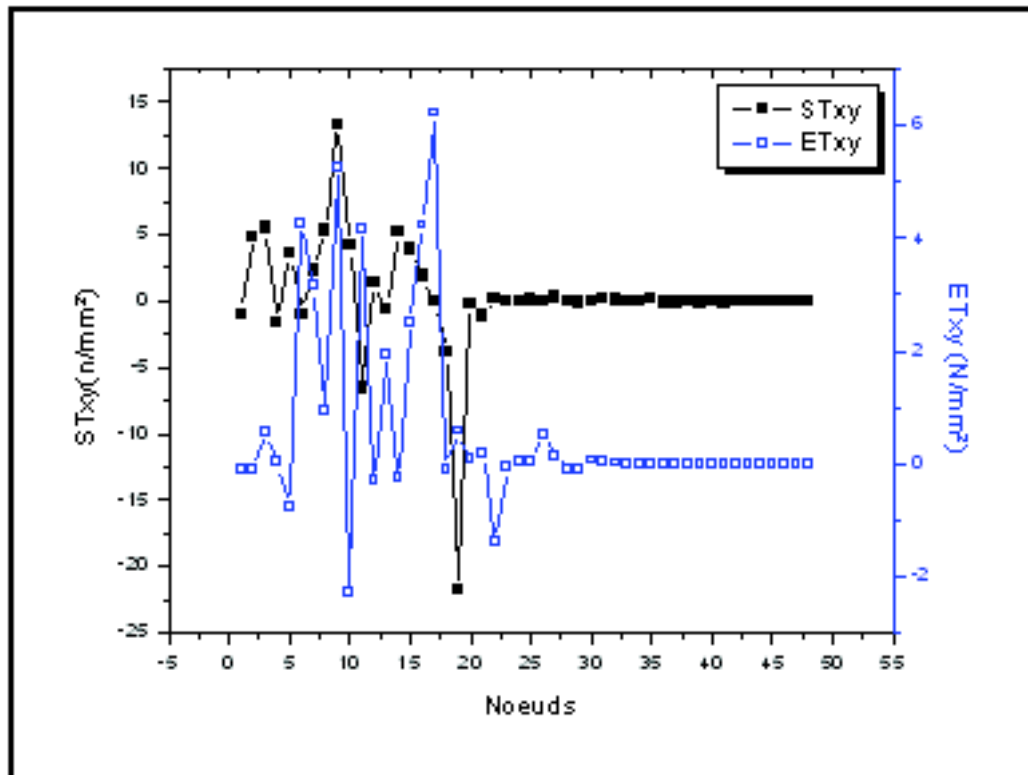
---

Pour comparer la variation du comportement des surfaces actives nous présentons sur la page suivante ces variations sous forme d'histogrammes et de courbes :



(a)

Fig. 152: Variation des contraintes de cisaillement suivant le plan XOY (a, b)

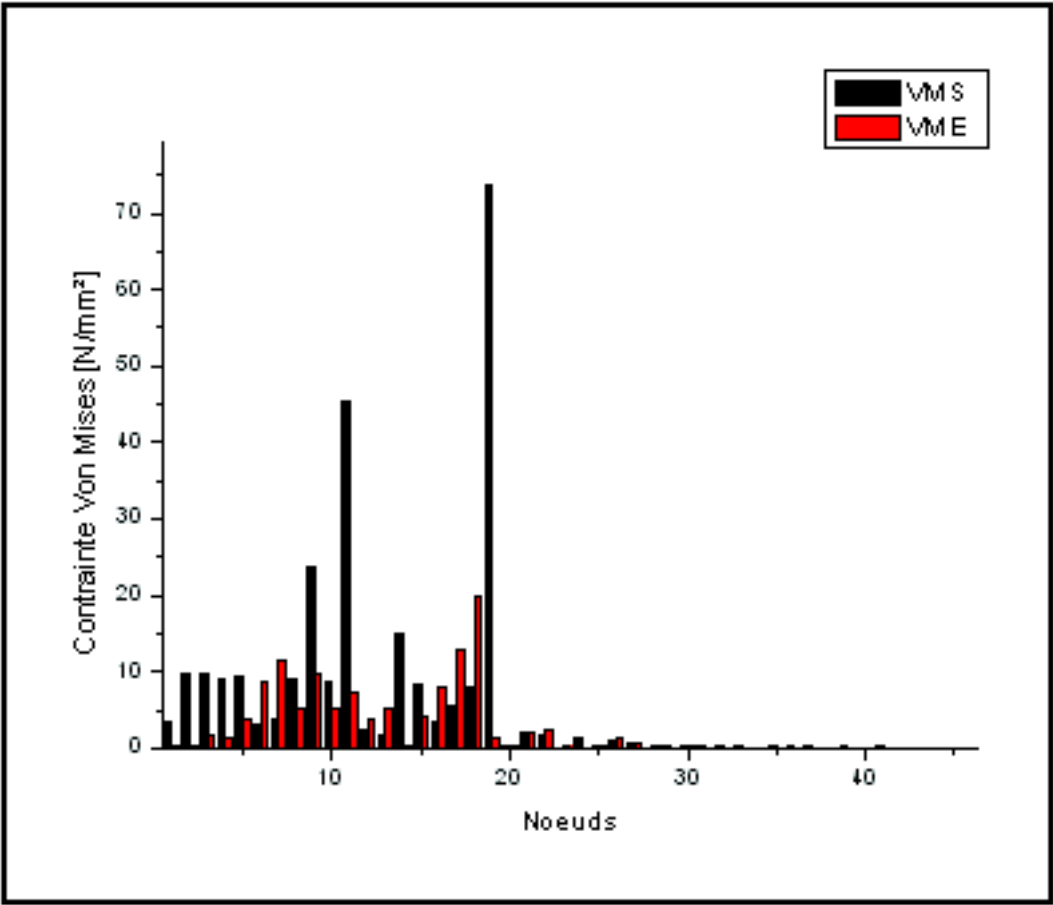


(b)

L'analyse de cette représentation montre que la surface SACRA est plus sollicitée par la bande de terre que la surface ENPMA. Nous en concluons donc que pour une même épaisseur du matériau (Acier S235, résistant à la corrosion) utilisé pour la fabrication des corps de charrues, la réaction de la surface de SACRA sur la bande de terre sera plus importante, d'où une déformation plus importante du sol qui entraîne un émiettement plus poussé. Cela confirme les résultats obtenus précédemment pour l'analyse des indices qualitatifs.

Cet histogramme montre également que la partie arrière, pratiquement à partir du nœud 30 des surfaces est moins sollicitée au cisaillement. (Annexe 9 et 10).

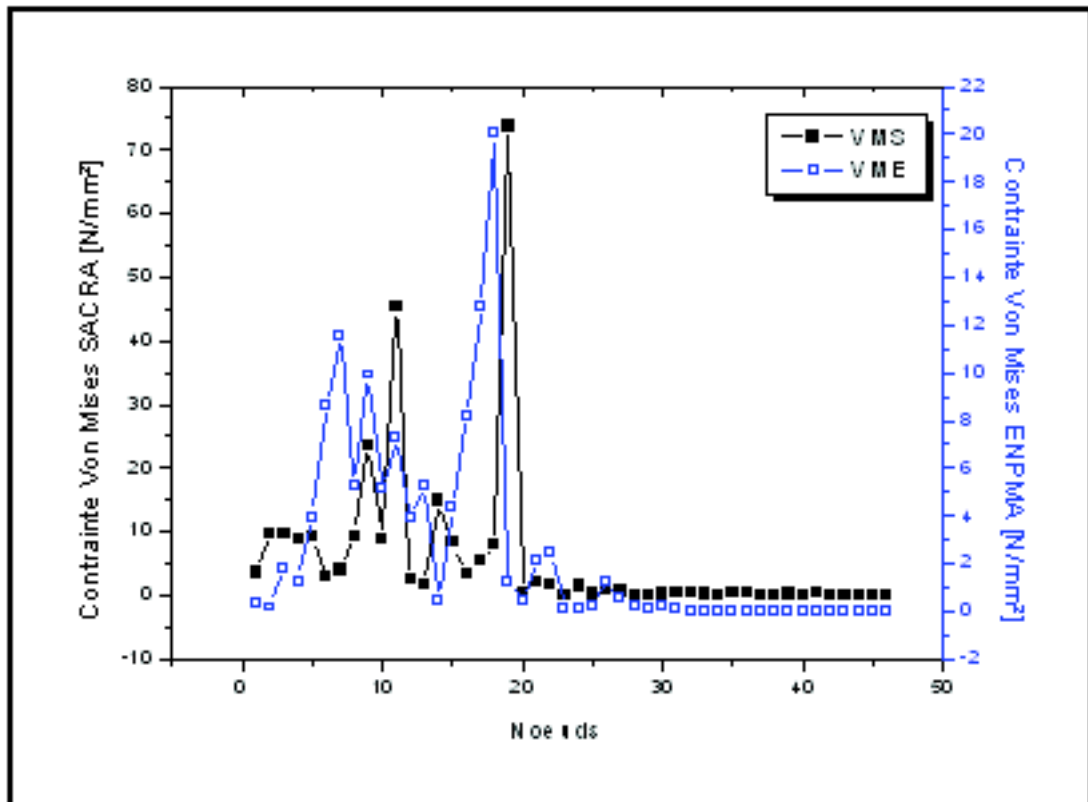
En conclusion, dans les conditions de nos hypothèses, il serait proposé d'augmenter l'épaisseur de la surface active des corps de charrue ayant une forme cylindrique pour augmenter sa résistance à la déformation et augmenter ainsi la déformation du sol suivant les plans horizontaux. Cette conclusion est confirmée par l'analyse de la variation des contraintes de Von Mises, illustrée par les représentations graphiques ci-dessous, qui représentent la résultante des contraintes normales et de cisaillement. Il serait également nécessaire d'utiliser des matériaux plus résistants à la déformation et surtout aux chocs, même si le prix de revient initial est plus élevé mais la durée de vie du corps de charrue sera plus longue. Idéalement le versoir sera réalisé en acier triplex, (une couche d'acier doux intercalé entre deux couches d'acier dur résistant à l'usure par abrasion) qui offre une bonne résistance aux chocs et prend un bon poli au travail.



(a)

Fig. 153 : Variation des contraintes de Von Mises suivant le plan XOY (a, b)





(b)

## Chapitre 14. Modélisation de l'effort de résistance à la traction des outils à dents

### 14.1. Introduction

En complément aux travaux précédents, et tenant compte de leur importance pour la préparation du sol, nous nous sommes également intéressés à la modélisation de l'effort de résistance à la traction des outils à dents.

L'une des premières formes d'équations qui a été proposée dans ce sens par **Reece (1965)** pour l'évaluation de l'effort de résistance à la traction pour les outils de formes simples est dite équation universelle de la dynamique du sol et est de la forme suivante :

$$P = (\gamma d^2 N_\gamma + cdN_c + qdN_q).w$$

Où :  $p$  = effort total sur l'outil

$\gamma$  = densité apparente du sol

$w$  = largeur de l'outil

$d$  = profondeur de travail

$g$  = accélération terrestre

$c$  = cohésion du sol

$q$  = pression de surcharge verticale du sol

$N_\gamma$ ,  $N_c$  et  $N_q$  = facteurs dépendants respectivement de l'angle de frottement interne du sol, de la largeur de l'outil et des caractéristiques outil – résistance du sol.

Ce modèle à deux dimensions, fut par la suite, développé par d'autres chercheurs qui ont introduit une caractéristique géométrique à savoir l'angle d'inclinaison de l'outil par rapport au sol et des paramètres liés au sol. Ceci a permis l'obtention de modèles à trois dimensions qui tiennent compte de la zone de rupture du sol qui n'est plus bidirectionnelle mais tridirectionnelle (forme elliptique). Les modèles proposés ont été synthétisés par Godwin et Spoor (1977) qui proposent le modèle suivant :

$$H = (\gamma g d^2 N_\gamma + c d N_c + c_a d N_{c_a} + q d N_q)(x + s) \sin(\alpha + \delta) + c_a d w \cdot \cot \alpha$$

Où:

$H$  = effort total sur l'outil

$$s = r \sin \rho' = r \sqrt{1 - (d \cos \alpha / r)^2}$$

$r$  = rayon de courbure de la section de cisaillement du sol.

$c_a$  = coefficient d'adhésivité sol - métal

$\alpha$  = angle d'inclinaison de l'outil

$\delta$  = coefficient de frottement sol – métal

Au travers des modèles proposés, il en ressort que l'évaluation de l'effort de résistance à la traction qu'oppose le sol à l'avancement de l'outil est une fonction qui introduit plusieurs paramètres liés à l'état physico - mécanique du sol et à la forme géométrique de l'outil. Ces derniers paramètres notés  $N$  nécessitent pour leurs déterminations, plusieurs essais sur plusieurs échantillons de sol à textures différentes. Leurs valeurs seront déterminées sur des abaques.

La complexité de ces modèles nous a amené à rechercher deux modèles plus simples permettant une évaluation rapide et simple de l'effort de résistance à la traction, le premier en relation avec les caractéristiques géométriques du soc, le second en relation avec l'état d'usure du soc. Ces modèles seront de la forme:

$$F_t = f(\text{Etat du sol, géométrie de l'outil, conditions de travail})$$

$$F_t = f(\text{Etat du sol, Etat d'usure du soc})$$

## 14.2. Moyens matériels et méthodologie

---

### 14.2.1. Moyens matériels

Pour la détermination de l'effort de résistance à la traction, les moyens matériels utilisés (canal d'essais et chaîne de mesure) sont les mêmes que ceux utilisés pour la détermination de l'effort de résistance à la traction des corps de charrue à soc. (Voir 9.3).

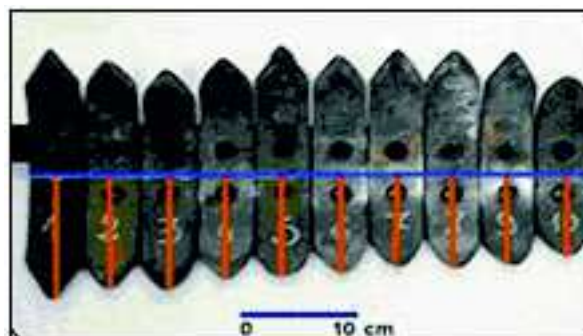
Les pièces travaillantes utilisées, leurs caractérisations géométriques et leurs états d'usure des socs des cultivateurs à dents, sont illustrés par les figures suivantes :



*Fig.154: Lames simples incurvées*



*Fig. 155: Socs de formes réelles*



*Fig.156 : Socs usés*

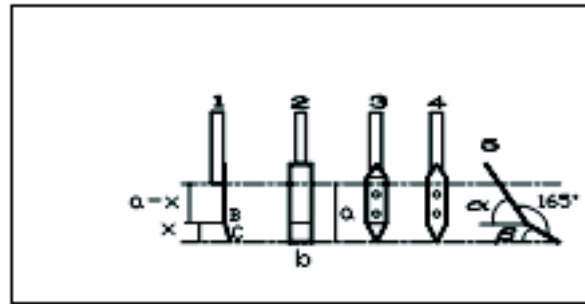
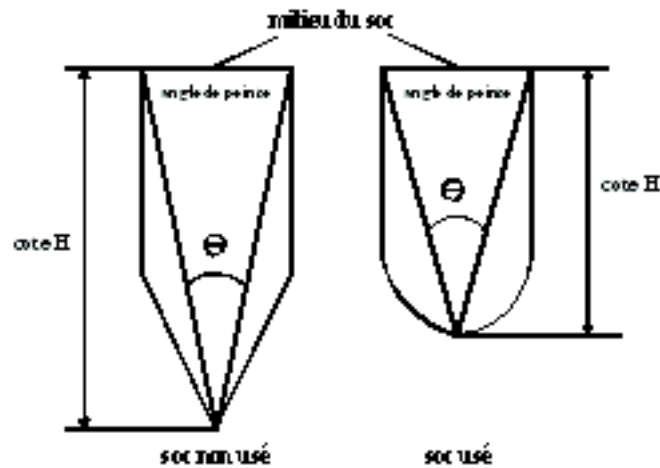


Fig.157 : Caractéristiques géométriques des socs

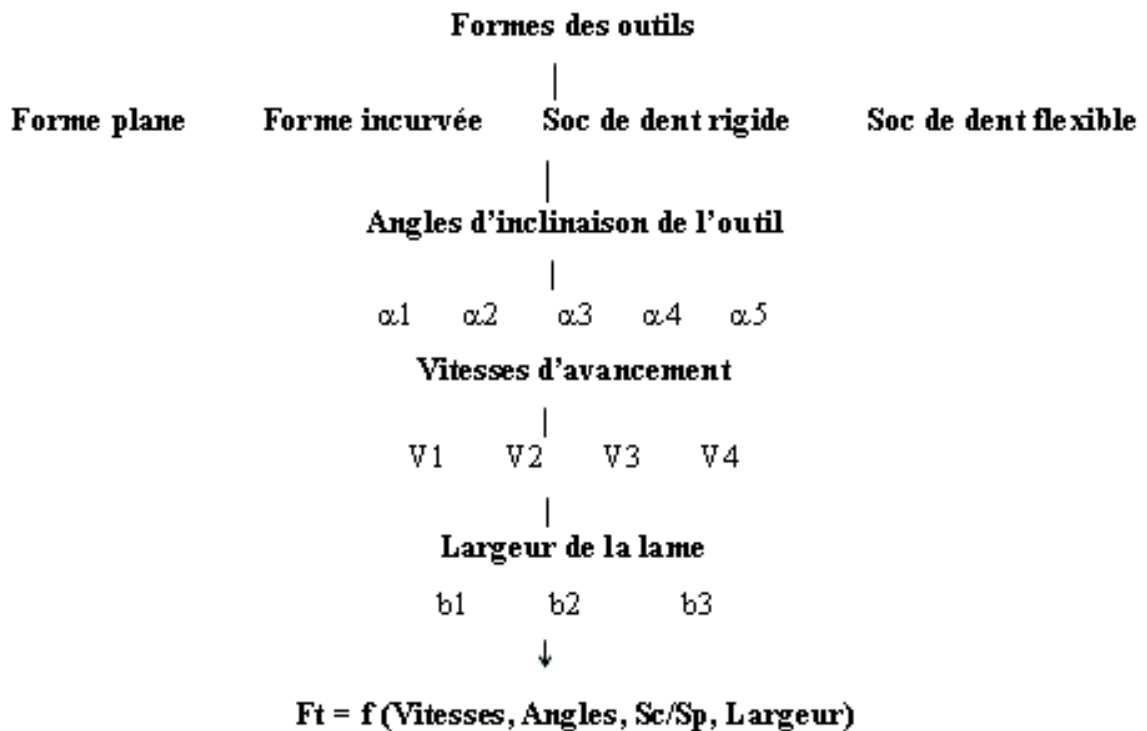
- 1 - lame incurvée vue de profil avec  $\alpha = 90$  degrés
- 2 - lame plane vue de face
- 3 - soc de cultivateur à dents rigides
- 4 - soc de cultivateur à dents flexibles
- 5 - différentes positions angulaires d'une lame incurvée (degrés)
- a – profondeur de travail (12 cm)
- b – largeur de travail (4 ; 6 et 8 cm)
- x – profondeur de la partie incurvée de la lame (cm)
- a-x – longueur en contact avec le sol de la partie plane de la lame (cm)
- $\alpha$  - angle d'inclinaison de la partie plane de la lame par rapport au sol ( $^{\circ}$ )
- $\beta$  - angle de la partie incurvée de la lame =  $(\alpha - 15)$  ( $^{\circ}$ )
- BC – longueur de la partie inclinée (7 cm)
- Sc/Sp – Rapport de la surface de contact sol-outil sur la surface projetée sur le plan vertical-transversal à la direction d'avancement.

Fig. 158 : Caractéristiques d'usure des socs H et  $\theta$



#### 14.2.2. Méthode de détermination des valeurs des efforts

La détermination des valeurs de l'effort de résistance à la traction a été réalisée suivant le schéma représenté ci-dessous :



La détermination de l'effort de résistance à la traction, en relation avec l'état d'usure, a été réalisée sur le canal d'essai de traction.

Le sol sur lequel se sont déroulés nos essais est un sol remanié (tamisé à travers des mailles carrées de 10 mm de côté) pour pouvoir mettre les outils dans les mêmes conditions de travail. L'analyse granulométrique a donné les résultats suivants :

Argile : 16,2 %

Limon ( G + F ) : ( 7,32 % + 6,20 % )

Sable ( G + F ) : ( 53,36 % + 7,42 % )

Cette texture **sablo-argilo-limoneuse** a été volontairement choisie pour la raison de sa prédominance dans les régions du sud algérien.

Dans le cas de l'effet de l'usure, seulement trois vitesses de travail (v) ont été choisies, elles sont respectivement de 0,23, 0,29 et 0,43 m/s. Trois angles d'entrure ( $\alpha$ ) définis ont pour valeurs respectives : 35, 45 (valeur constructive) et 60 degrés. La profondeur de travail sur canal est maintenue à une valeur de 12,5 cm ce qui est possible avec le dispositif de fixation des socs.

Les efforts de résistance à la traction ont été déterminés à l'aide d'une chaîne de mesure composée de capteurs extensiométriques, d'un amplificateur de signaux et d'un enregistreur graphique (chapitre 9).

Pour chaque passage, deux socs sont fixés sur un chariot porte outil, ce qui fait 45 passages avec trois répétitions pour chacun. Neuf valeurs, distantes l'une de l'autre de 0,5 mètre, de l'effort de résistance à la traction ont été déterminés sur un enregistrement graphique.

### 14.2.3. Résultats des essais

Les résultats des essais sont consignés dans les tableaux suivants :

#### 14.2.3.1. Résultats des essais de l'effet des caractéristiques géométriques sur l'effort de résistance à la traction

ANGLE (°)	L1V1	M1V1	L1V2	M1V2	L1V3	M1V3 Ft(daN )	L1V4	M1V4	L2V1	M2V1	L2V2	M2V2
50	4,81	5,08	6,75	5,04	5,92	5,00	4,75	5,24	9,79	5,92	7,47	5,52
60	8,68	5,56	7,55	5,48	7,52	6,92	7,12	7,36	9,66	10,12	8,09	8,80
70	12,42	5,76	11,17	7,16	10,81	8,00	10,43	9,08	14,91	10,52	14,81	9,16
80	15,07	19,50	14,14	21,60	13,10	24,40	12,55	26,50	16,14	17,70	15,29	25,00
90	16,65	26,50	15,62	28,10	15,14	35,90	14,38	41,70	22,55	30,30	19,72	34,50
ANGLE (°)	L2V3	M2V3	L2V4	M2V4	L3V1	M3V1 Ft(daN )	L3V2	M3V2	L3V3	M3V3	L3V4	M3V4
50	6,64	5,28	6,17	5,64	11,54	7,56	9,56	6,96	8,41	6,76	7,38	7,92
60	7,95	9,00	6,65	10,68	11,13	11,00	9,84	11,48	9,35	9,48	9,33	13,48
70	13,81	10,72	13,48	11,48	15,68	9,40	14,12	10,40	13,77	15,76	13,15	12,52
80	15,11	31,40	14,49	38,7	22,04	23,60	17,02	33,90	16,76	33,60	16,17	44,7
90	19,39	39,60	15,41	52,2	26,01	27,70	21,39	37,70	20,67	41,10	19,92	60,8

**Tableau 76 : Outils simples (Lames simples)**

**L1V1 : Effort Ft de la lame incurvée, de largeur 1 pour la vitesse 1**

**M1V1 : Effort Ft de la lame plane de largeur 1 pour la vitesse 1**

VITESSE (m/s)	DR $\alpha$ .1	DF $\alpha$ .1	DR $\alpha$ .2	DF $\alpha$ .2	DR $\alpha$ .3	DF $\alpha$ .3 Ft(daN)	DR $\alpha$ .4	DF $\alpha$ .4	DR $\alpha$ .5	DF $\alpha$ .5	DR $\alpha$ .35	DF $\alpha$ .4 5
0,23	10,93	15,89	13,97	19,10	22,15	37,51	24,81	35,13	40,83	62,04	3,02	11,64
0,29	7,24	8,24	12,75	18,38	20,9	32,08	24,71	33,95	33,85	56,91	2,56	11,48
0,43	6,47	7,75	12,05	16,20	20,24	30,51	23,35	31,66	28,26	53,95	2,51	10,78
0,87	6,39	6,90	10,16	15,14	18,99	16,97	13,26	29,58	27,25	41,42	1,67	9,81

**Tableau 77 : Outils réels (Socs de dents réelles)**

**DR $\alpha$ .1** : Effort Ft du Soc de la dent rigide pour l'angle  $\alpha$ .1

**DF $\alpha$ .1** : Effort Ft du Soc de la dent flexible pour l'angle  $\alpha$ .1

**DR $\alpha$ .35** : Effort Ft du Soc de la dent rigide pour l'angle 35 degrés

**DF $\alpha$ .45** : Effort Ft du Soc de la dent flexible pour l'angle 45 degrés

#### 14.2.3.2. Résultats des essais de l'effet de l'état d'usure des socs sur l'effort de résistance à la traction

N° soc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H (cm)	12,26	11,48	11,46	10,83	10,47	10,18	09,40	09,36	09,34	8,49
$\theta$ (deg)	25,5	27	27,5	28,5	29,5	30	32,5	33,5	39	47,5

**Tableau 78 : Caractéristiques d'usure des socs**

Les résultats détaillés des valeurs des efforts de résistance à la traction en relation avec l'état d'usure des socs sont présentés sur l'annexe 11.

Les résultats sont illustrés par les représentations graphiques suivantes :

- Effet des caractéristiques géométriques des lames et socs sur l'effort de résistance à la traction

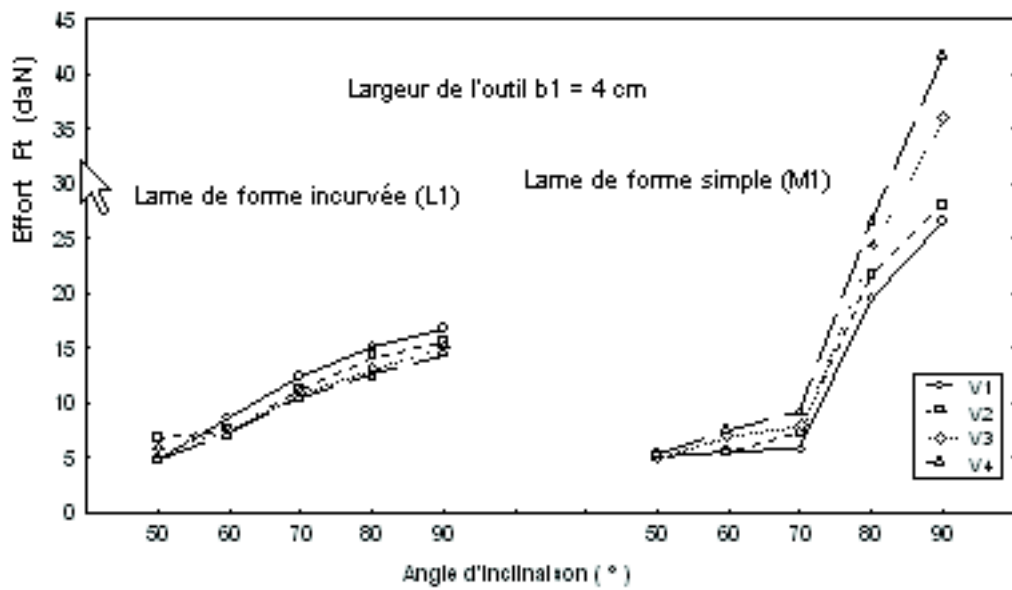


Fig. 159: Influence comparée de la forme et de la vitesse sur Ft pour les formes L1 et M1

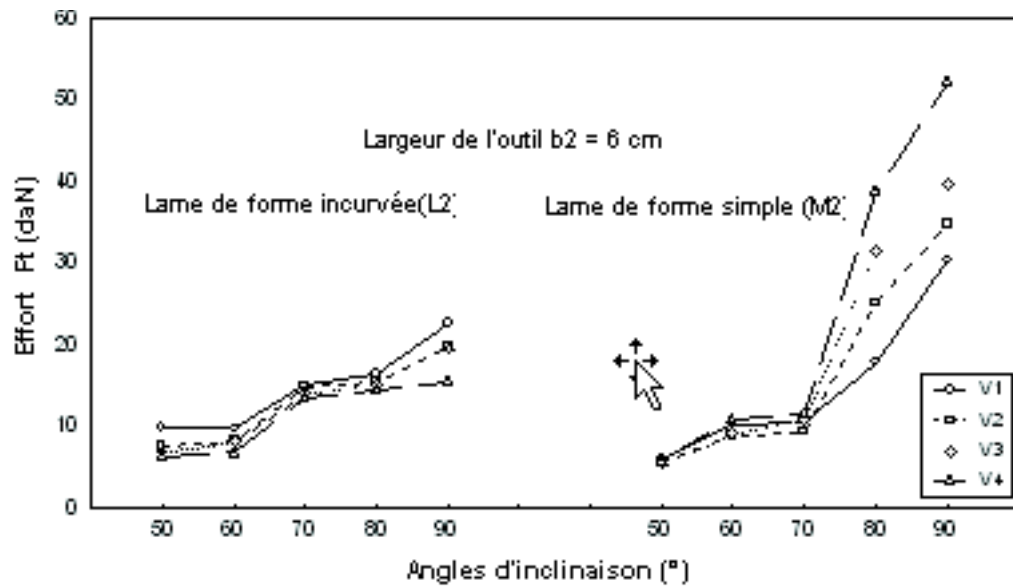


Fig.160: Influence comparée de la forme et de la vitesse sur Ft pour les formes L2 et M2



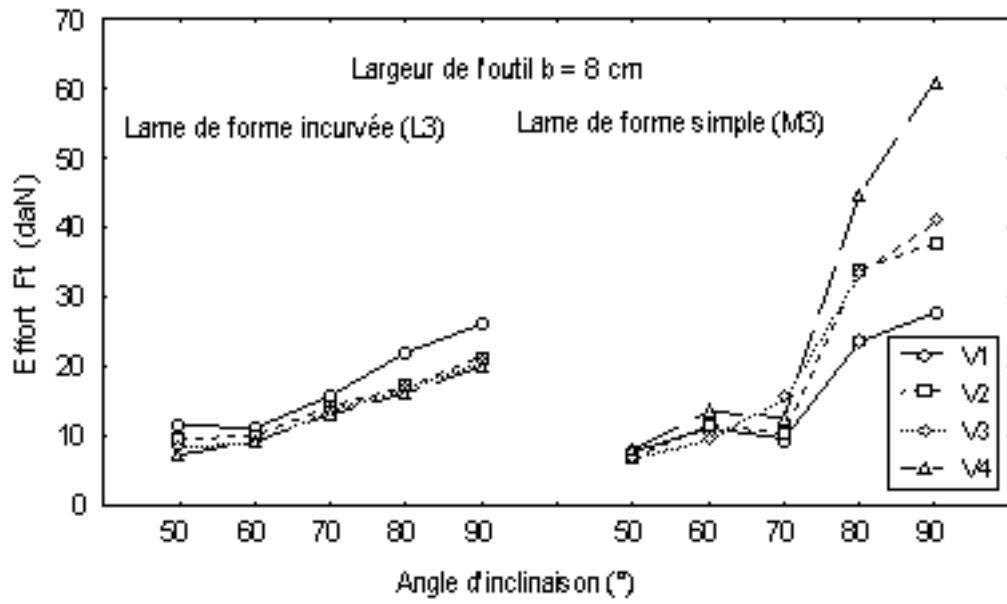


Fig. 161: Influence comparée de la forme et de la vitesse sur Ft pour les formes L3 et M3

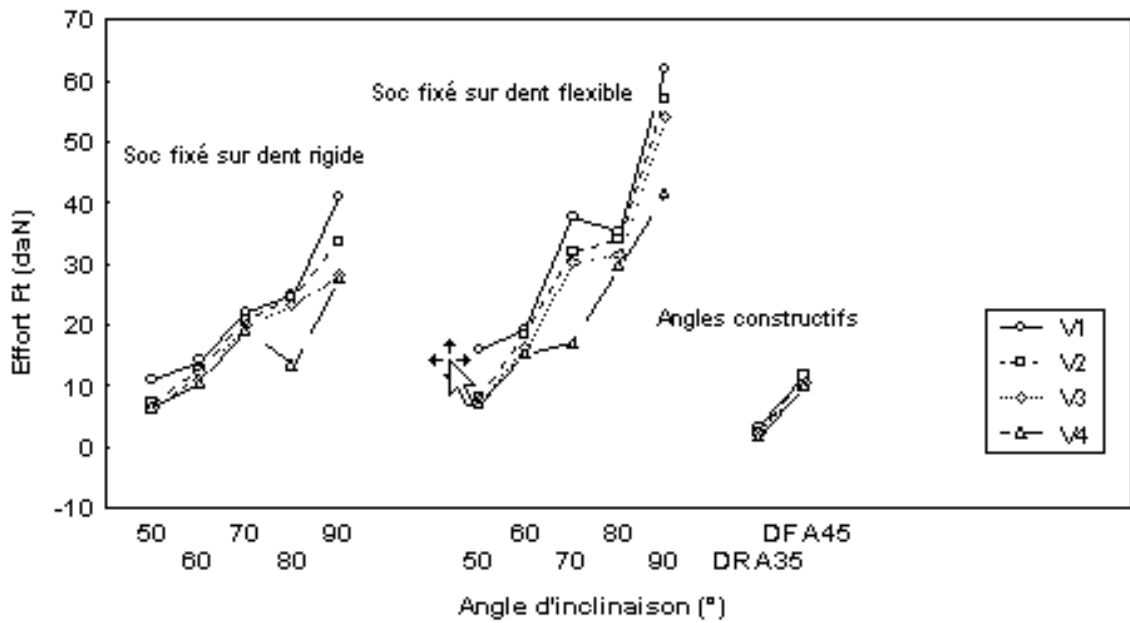


Fig.162: Variation de l'effort Ft en relation avec l'angle d'inclinaison pour les deux socs (Dr et Df)

Effet de l'état d'usure des socs sur l'effort de résistance à la traction

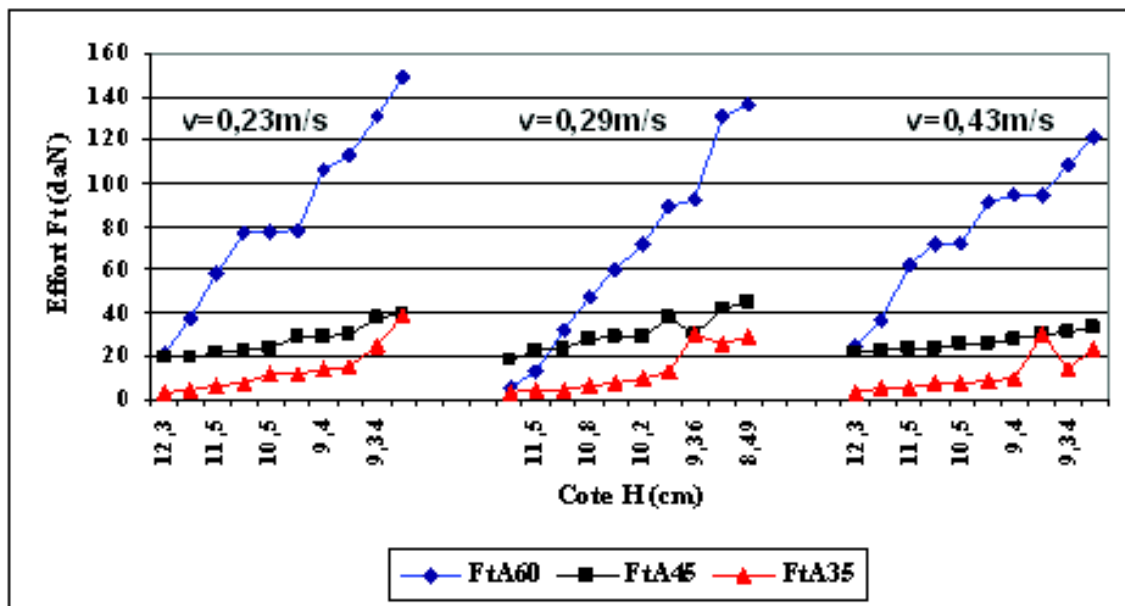


Fig.163 : Effet de la cote H sur l'effort de résistance à la traction pour chaque vitesse et chaque angle d'inclinaison du soc

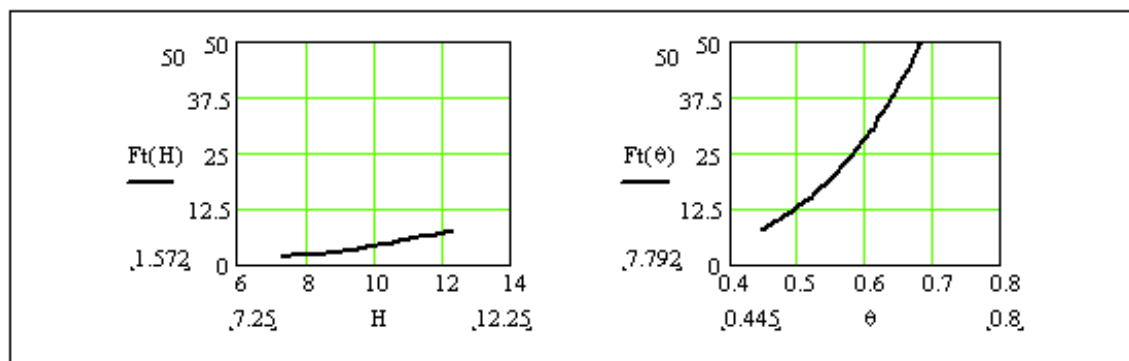


Fig. 164 : Variations de l'effort en relation avec H et  $\theta$

#### 14.2.4. Interprétations

##### 14.2.4.1. Effets des caractéristiques géométriques des socs

Les premières observations représentées sur les graphes Fig.160, Fig.161 et Fig.162 montrent nettement l'importance de l'effet de la vitesse et de l'angle d'inclinaison sur la valeur de l'effort de résistance à la traction. En effet l'augmentation de ces deux paramètres entraîne celle de l'effort Ft.

Il apparaît également sur ces représentations graphiques, que les lames de formes planes (M) demandent un effort plus important pour leurs tractions que les lames de forme inclinée (L). Cette différence est d'autant plus importante quand l'angle d'inclinaison augmente.

Si la variation de l'effort de résistance à la traction, en relation avec l'angle d'inclinaison de l'outil, est progressive pour les lames inclinées (L), elle est plutôt brutale à partir de l'angle de 70 degrés pour les lames planes (M). Ce qui pourrait s'expliquer par le fait que l'outil exerce, à partir de cet angle, une pression sur le sol et non un cisaillement.

Il est à remarquer aussi, sur ces trois représentations graphiques, que l'effet de la largeur est significatif, en effet la valeur de l'effort de résistance à la traction  $F_t$  varie de 4,75 à 16,65 daN pour la largeur  $b_1 = 4\text{cm}$ , de 6,17 à 22,55 daN pour la largeur  $b_2 = 6\text{cm}$  et de 7,38 à 26,01 daN pour la troisième largeur de l'outil  $b_3=8\text{cm}$  pour ce qui est des lames inclinées (L). Pour les lames planes (M), ces variations sont respectivement de 5,24 à 41,7 daN pour la largeur  $b_1= 4\text{cm}$ , de 5,28 à 52,2 daN pour  $b_2 = 6\text{ cm}$  et de 6,76 à 60,8 daN pour  $b_3 = 8\text{cm}$

Pour les socs de forme réelles, et afin de mettre en évidence l'effet de la forme de la partie tranchante de l'outil sur l'effort de résistance à la traction, nos essais ont également porté sur l'analyse de deux formes de socs de dents réelles de même largeur (4 cm) ; cependant l'un des deux socs a sa partie inférieure inclinée, l'autre non. Ces deux socs ont été utilisés dans les mêmes conditions que les lames simples, planes (M1) et inclinés (L1).

L'analyse de ces résultats montre nettement que l'effort consommé par le soc de forme plane (Df) est plus important que celui du soc de forme inclinée (Dr) soit sous l'effet de la variation de l'angle ou celui de la vitesse.

#### 14.2.4.2. Effets de l'état d'usure des socs

La figure 163 montre que l'effet de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  est nettement apparent, nous remarquerons que l'effort est plus faible pour un angle de 35 degrés et est plus grand pour un angle de 60 degrés, ce qui pourrait s'expliquer par une pression plus importante car la surface de pression sur le sol est plus importante pour un soc usé. La surface de pression étant en relation direct avec la grandeur H. Ceci montre clairement l'effet de l'usure sur l'effort de résistance à la traction.

### 14.3. Essai de modélisation de l'effort de résistance à la traction des outils simples

Pour la quantification des effets des caractéristiques géométriques et de l'état d'usure des socs sur l'effort de résistance à la traction, des essais de modélisation de l'effort ont été réalisés par la méthode de l'analyse dimensionnelle décrite précédemment (chapitre 11).

Cette analyse a permis l'obtention des modèles suivants :

Modèle de l'effort en relation avec les caractéristiques géométriques :

$$F_t = e^{3.93} \cdot \left(\frac{v^2}{gb}\right)^{-0.06} \cdot \left(\frac{Sc}{Sp}\right)^{2.96} \cdot (\alpha)^{4.11} \cdot (\beta)^{0.34} \cdot (\theta)^{-0.62} \cdot d \cdot b^3$$

Avec :  $v$  : vitesse d'avancement (m/s),

$\alpha$  : angle d'inclinaison du soc par rapport à la surface du sol ( $^\circ$ ),

$\beta$  : Angle de la partie incurvée de la lame ( $^\circ$ ),

$\theta$  : Angle de pointe du soc ( $^\circ$ )

$Sc / Sp$  : rapport des surfaces de contact avec le sol et projetée sur le plan vertical,

$d$  : la masse volumique du sol ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ),

$b$  : largeur du soc (m).

Modèle de l'effort en relation avec les caractéristiques d'usure :

$$F_t = e^{-3,18} \left( \frac{v^2}{g \cdot H} \right)^{-0,052} \cdot \alpha^{1,56} \cdot \theta^{4,36} \cdot g \cdot d \cdot H^3$$

Avec H : Hauteur d'usure du soc (cm)

### 14.3.1. Analyse de ces modèles

Ces deux relations montrent nettement l'effet des caractéristiques géométriques et de l'état d'usure des socs sur l'effort de résistance à la traction. La vérification de ces modèles a montré que les valeurs des efforts calculés sont proches de ceux déterminés sur canal, d'où la fiabilité des modèles proposés.

Nous en concluons donc à partir du premier modèle que les socs les moins exigeants en effort de traction sont ceux présentant une extrémité en forme triangulaire (Df et Dr) puis viennent les lames ayant leurs parties inférieures droites (L1 et M1) qui sont plus exigeantes. Nous remarquerons cependant que contrairement aux socs Df et Dr, la lame incurvée L1 nécessite plus d'effort pour sa traction que la lame non incurvée M1.

Pour ce qui est de l'état d'usure des socs, l'analyse du modèle proposé montre que l'effet de l'angle de pointe  $\theta$  sur l'effort de résistance à la traction est plus important que celui de la cote H. d'où l'intérêt de faire subir au socs un traitement approprié pour réduire l'usure et maintenir la valeur de l'angle de pointe après plusieurs passages dans le sol. Nous signalerons que la valeur de la cote H est dépendante de la valeur de  $\theta$ .

A l'état neuf, usure nulle, sur un sol sableux, un soc de cultivateur à dent exige en moyenne une force de traction de 37 daN. Les solutions de cette relation, pour cet effort maximum de 37 daN par soc, sont :

$$\theta := 3.6748 \left( \frac{1}{H^{2.052}} \right)^{0.23} \quad H := 6.419 \left( \frac{1}{\theta^{4.36}} \right)^{0.33}$$

En maintenant la cote H à une valeur de 12.5 cm, égale à la profondeur de travail, l'angle de pointe sera de 0,627 radians soit 35,92 degrés.

Ce qui signifie que l'état d'usure acceptable, dans les conditions d'un sol à texture sableuse, correspondrait au soc 8 ou à la limite au soc 9, nous retiendrons le soc 8 pour éviter une altération du support du soc. Il sera cependant nécessaire de vérifier la profondeur de travail effective du cultivateur à dents. Dans ce cas l'effort réel sera de 46,79 daN et la cote H de 9,36 cm. Il sera donc nécessaire d'augmenter la profondeur de travail du cultivateur de 3cm.

---

# CONCLUSION GENERALE

Les premières parties de nos essais relatives à l'étude des indices qualitatifs et des indices énergétiques, montrent clairement l'effet des conditions de travail et plus particulièrement celui de la forme de la surface active sur les valeurs de ces indices.

D'une manière générale, il a été constaté que la qualité du labour dépend autant de la vitesse de travail que de la forme de la surface active des corps de charrue, illustrée par la variation des angles d'attaque  $\gamma$ , d'entrure  $\alpha$  et de courbure  $\theta$ .

L'ameublissement de la bande de terre est surtout influencé par la variation des angles  $\alpha$  et  $\theta$  et à un degré moindre par l'angle  $\gamma$ . L'accroissement de ces valeurs se traduit par un accroissement de l'ameublissement que nous avons quantifié par les indices de foisonnement  $I_f$ , de porosité  $n$  et d'émiettement (taille des mottes).

Le retournement de la bande de terre  $\Delta w$  et par conséquent l'enfouissement des résidus végétaux  $\Delta \delta$  est surtout influencé par la forme du versoir caractérisée par les angles  $\gamma$  et  $\theta$ .

Pour ce qui est de la valeur de l'effort de résistance à la traction, paramètre choisi pour la quantification des besoins en énergie, celui-ci augmente avec la vitesse et est différent pour les deux formes de corps de charrue utilisés. Quelques soient les conditions de travail comme la vitesse, l'humidité et le tassement initial du sol, l'effort nécessaire pour le labour est supérieur pour la forme ENPMA.

A partir de ces constats, l'étude et l'analyse des formes des surfaces actives avec comme objectif, leurs choix, devient nécessaire pour atteindre les objectifs recherchés, qu'ils soient qualitatifs ou énergétiques, lors des opérations de préparation du sol pour la mise en place de la culture.

Trois méthodes ont été présentées :

La première qualifiée d'analytique proposée par Craciun V. et Leon D. (1998) permet de définir les points caractéristiques du contour de la surface active mais exigeant beaucoup de calcul, cette méthode est simple quand la surface active est de forme cylindrique mais devient plus complexe pour les surfaces hélicoïdales et culturales.

Les deux autres méthodes que nous avons proposées présentent des avantages quand à la rapidité de la caractérisation des contours à l'aide de logiciels de statistiques permettant l'établissement d'équations de contours par des ajustements polynomiaux de second ou de troisième ordre, ceci pour la deuxième méthode. L'une des caractéristiques importante de cette méthode est la détermination de la trajectoire moyenne que suivra la bande de terre sur la surface active, avant et après optimisation des contours, ce qui permet de prévoir le comportement de la bande de terre lors du labour. La modification de ces courbures, donc de l'angle d'inclinaison ( $\theta$ ) de la surface active influera certainement sur les valeurs des différents indices qualitatifs. En effet des courbures plus accentuées entraîneraient un retournement plus important et un éclatement de la bande de terre, par compression, plus accentué.

Pour ce qui est de la troisième méthode, l'utilisation des courbes de  $s$ , les contours sont plus affinés. Cette dernière méthodes beaucoup plus complexe que les autres est cependant plus précise.

L'utilisation de ces deux dernières méthodes a permis de proposer des équations de forme pour les deux surfaces actives des deux corps de charrue à socs que nous rappelons ci-dessous :

**Forme SACRA :**

$$f(x, y) = 9,05.x.y + 21,76.\ln(1+\exp(-3.x + 4,5)) .y - 97,70.y + 0,03.x.y^2 + 0,036.x.y^2 + 0,005.x.y^4$$

**Forme ENPMA :**

$$f(x, y) = 4,13.x.y + 8,5.x.\exp(-6,25 / -89+25.\ln(x)) .y + 0,20.x.y^2 - 0,026.x.y^3$$

Après correction des contours des surfaces actives par la méthode de s, les équations des différentes parties du contour, suivant la projection yoz, des deux formes retenues sont :

Contour de la partie supérieure SACRA

$$z = 10,10 + 1,08 y - 0,05 y^2 \text{ Avec } R^2 = 0,99 \text{ p} < 0,0001$$

Contour de la partie arrière du versoir SACRA

$$z = -100 + 13,91 y - 0,41 y^2 \text{ Avec } R^2 = 1 \text{ p} < 0,0001$$

Contour de la partie latérale SACRA

$$z = 11,06 - 1,86 y + 0,10 y^2 \text{ avec } R^2 = 0,99 \text{ p} < 0,0004$$

Contour de la partie supérieure ENPMA

$$z = 13,25 + 0,43 y + 0,004 y^2 \text{ avec } R^2 = 0,99 \text{ p} < 0,0003$$

Contour de la partie arrière du versoir ENPMA

$$z = -127,07 + 18,42 y - 0,57 y^2 \text{ avec } R^2 = 1 \text{ p} < 0,0001$$

Contour de la partie latérale du versoir ENPMA

$$z = 2,21 - 0,33 y + 0,04 y^2 \text{ avec } R^2 = 0,98 \text{ p} < 0,0016$$

Les valeurs des coefficients de détermination  $R^2$  et des probabilités  $p$  montrent que les modèles établis sont très hautement significatifs et peuvent donc être retenus pour la caractérisation des deux corps de charrue SACRA et ENPMA. Cette méthode est applicable pour toutes formes de surfaces actives gauches comme celles des corps de charrue à socs.

Une fois les contours définis, un intérêt particulier a été porté sur la position du centre de pression de la surface active sur la bande de terre. L'optimisation des surfaces a permis le déplacement vers le bas du centre de pression ce qui a pour conséquence l'augmentation du moment de la force exercée sur le sol ce qui augmente, pour une même profondeur de travail, le retournement de la bande de terre et donc de l'incorporation des résidus végétaux.

Pour l'évaluation des besoins en énergie pour la réalisation des opérations de travail du sol, les modèles proposés par plusieurs chercheurs tiennent souvent compte des caractéristiques physico-mécaniques du sol, les caractéristiques géométriques, par la complexité de leur détermination ont cependant été négligés. Notre travail a montré par une analyse statistique simple, l'importance de ces paramètres sur la précision de la détermination de l'effort de résistance à la traction et par conséquent sur celle de l'évaluation de la consommation en énergie.

L'utilisation des deux modèles établis par Gorjatchkin et Gee Clough a montré que pour le même corps de charrue et dans de mêmes conditions de travail, les valeurs des efforts

obtenus sont différentes d'un modèle à un autre. L'utilisation de l'un de ces deux modèles pour la détermination de l'effort de résistance à la traction pour deux corps de charrue de formes différentes donne la même valeur, mais sur canal les efforts sont différents entre les deux formes. D'où l'intérêt de proposer un modèle mathématique de l'effort de résistance à la traction en relation avec les caractéristiques géométriques des surfaces actives.

Après la caractérisation et l'optimisation des surfaces actives, les essais ont porté sur l'effet des caractéristiques géométriques de ces surfaces sur l'effort de résistance à la traction.

L'utilisation des modèles réduits des deux formes de corps de charrue sur canal d'essai de traction a montré l'importance de la forme sur la valeur de l'effort de résistance à la traction et a facilité l'établissement d'un modèle mathématique de l'effort en relation avec les caractéristiques géométriques des corps de charrue car les conditions de travail, telles que la profondeur de travail, la vitesse d'avancement et les propriétés physico-mécaniques du sol sont maîtrisées au niveau du canal d'essai de traction.

Avant l'établissement du modèle de l'effort, une analyse de l'effet des différentes caractéristiques géométriques sur l'effort a été réalisée. Les résultats de cette analyse sont :

- L'effort augmente avec la vitesse d'avancement, vu son importance, c'est un paramètre qui est introduit dans plusieurs modèles mathématiques de l'effort.
- La teneur en eau du sol au moment des labours joue un rôle très important sur la qualité du travail et sur la valeur de l'effort de résistance à la traction, ce paramètre n'apparaît cependant pas dans les modèles permettant de quantifier l'effort.
- La densité apparente, ou la masse volumique du sol a également un effet sur l'effort, c'est l'un des principaux paramètres introduit soit directement comme dans le modèle de Gee Clough , Qiong et Grisso, soit indirectement dans les autres modèles notamment dans le modèle de Gorjatchkin qui introduit la résistance spécifique ou dans les modèles de Larson et Binesse qui utilisent la cohésion du sol ou le modèle d'Oskoui qui utilise plutôt le cone index.

L'ordre d'importance de l'effet de ces différents paramètres observé est le suivant :

1. Profondeur de travail
2. Densité apparente du sol
3. Vitesse d'avancement
4. Humidité du sol

Pour ce qui est de l'effet des caractéristiques géométriques l'ordre d'importance de l'effet est :

1. L'angle de courbure de la surface active  $\theta$
2. L'angle d'entrure  $\alpha$

L'ordre d'importance de l'effet des différents paramètres confondus (condition de travail et caractéristiques géométriques est :

1. L'angle de courbure de la surface active  $\theta$
2. L'angle d'entrure  $\alpha$
3. Densité apparente du sol
4. k
5. k1
6. k2

Pour la réalisation de cette classification, avant optimisation de la surface active, l'ajustement par régression multiple n'a pas tenu compte de la profondeur de travail, celle-ci étant maintenue, dans ce cas, constante.

Ces observations justifient l'optimisation de la surface active des corps de charrue à soc et l'établissement d'un modèle mathématique de l'effort de résistance à la traction en relation avec les caractéristiques géométriques de cette surface.

Le modèle établi par la méthode de Buckingham-Vachy, en utilisant l'analyse dimensionnelle est le suivant :

$$F_t = \varepsilon R_0 \cdot e^{-14.54} \cdot \left( \frac{v^2}{g \cdot l \cdot \sin \gamma} \right)^{0.15} \cdot E^{4.13} \cdot \alpha^{5.94} \cdot \theta^{-16.01} \cdot k^{0.98} \cdot (k_1)^{12.98} \cdot (k_2)^{2.74} \cdot g \cdot d \cdot (l \cdot \sin \gamma)^3$$

Dans le cas où l'angle d'attaque  $\theta$  est maintenu constant, le modèle pourrait être écrit sous la forme :

$$F_t = \varepsilon R_0 \cdot e^{-14.54} \cdot \left( \frac{v^2}{g \cdot b} \right)^{0.15} \cdot E^{4.13} \cdot \alpha^{5.94} \cdot \theta^{-16.01} \cdot k^{0.98} \cdot (k_1)^{12.98} \cdot (k_2)^{2.74} \cdot g \cdot d \cdot b^3$$

Pour plus de simplification, ces modèles ont été décomposés de la façon suivante :

$$F_t = C_F \cdot C_T \cdot C_G$$

Avec : Constantes de forme :

$$C_F = \varepsilon R_0 \cdot e^{-14.54}$$

Caractéristiques relatives aux conditions de travail :

$$C_T = \left[ \left( \frac{v^2}{g \cdot b} \right)^{0.15} \cdot g \cdot d \right]$$

Caractéristique relative à la géométrie des surfaces actives :

$$C_G = \left[ E^{4.13} \cdot \alpha^{5.94} \cdot \theta^{-16.01} \cdot (k^{0.98}) \cdot (k_1^{12.98}) \cdot (k_2^{2.34}) \cdot b^3 \right]$$

Ceci pour les surfaces actives complexes dites gauches, pour ce qui est des surfaces actives dites simples comme les socs des outils à dents deux modèles ont été établis.

Le premier relatif à l'évaluation de l'effort de résistance à la traction en relation avec les caractéristiques géométriques.

$$F_t = e^{3.83} \cdot \left( \frac{v^2}{g \cdot b} \right)^{-0.06} \cdot \left( \frac{S_c}{S_p} \right)^{2.96} \cdot (\alpha)^{4.11} \cdot (\beta)^{0.84} \cdot (\theta)^{-0.62} \cdot d \cdot b^3$$



Avec :  $v$  : vitesse d'avancement (m/s),  
 $\alpha$  : Angle d'inclinaison du soc par rapport à la surface du sol ( $^{\circ}$ ),  
 $\beta$  : Angle de la partie incurvée de la lame ( $^{\circ}$ ),  
 $\theta$  : Angle de pointe du soc ( $^{\circ}$ )  
 $S_c / S_p$  : rapport des surfaces de contact avec le sol et projetée sur le plan vertical,  
 $d$  : Masse volumique du sol ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ),  
 $b$  : Largeur du soc (m).

Ce modèle fait ressortir l'importance des caractéristiques géométriques, notamment celles des angles  $\alpha$  et  $\theta$  et avec un effet moindre celle de l'angle :  $\beta$

Le second relatif à l'évaluation de l'effort de résistance à la traction en relation avec les caractéristiques d'usure des socs d'un cultivateur à dents.

$$F_T = e^{-318} \left( \frac{v^2}{gH} \right)^{-0,012} \alpha^{1,56} \theta^{4,36} \cdot g \cdot d \cdot H^3$$

Avec H : Hauteur d'usure du soc (cm)

Ce dernier modèle a permis également de définir l'usure maximale acceptée pour l'utilisation des socs de cultivateurs à dents, cette limite se situe à une valeur de 9,36 cm pour H et 33,5 degrés pour  $\theta$ . A partir de ces valeurs, le soc doit être changé ou retourné.

L'analyse et l'utilisation de ces modèles permettent une évaluation précise de l'effort de résistance à la traction en relation avec les caractéristiques géométriques et pourraient être utilisés pour l'amélioration des surfaces actives des outils aratoires ou bien pour la conception de nouvelles formes en faisant varier dans les limites acceptables les différents paramètres introduits dans le modèle.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anonyme, 2003.** Vulgarisation, fiche technique des céréales de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC), El-Harrach.
- Bernacki H., 1972.** Agricultural Machines, Theory and construction, Vol.1, pp.162-168. Springfield, Ill : Nat. Technical Information Service.
- Bézier P., 1986.** Courbes et surfaces mathématiques et CAO. Edition Hermès, Paris
- Binesse M., 1970.** Cisaillement et résistance spécifique du sol lors du labour classique. Etudes du CNEEMA, n°341-342 – France.
- Campbell A.J., Martin Carter et Neil McLaughlin, 2001.** Fuel Consumption and Draft Requirements Under Various Tillage Systems, *Agri-Info* 01-10, May, 2001.
- Caproiu et al, 1982.** Tillage Machines, Sowing Machines and Machines for Crop Protection. Didactic and Pedagogical Publishing House, Bucharest Romania
- Charreau C. et Nicou, R. 1971.** Amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques. *L'Agronomie Tropicale*, N°3, pp.209-255 ; N°5, pp.565-631 ; N°9, pp.903-978 ; N°11 pp.1184-1247.
- Chopart J.L. et Nicou, R. 1976.** Influence du labour sur le développement racinaire de différentes plantes cultivées au Sénégal. Conséquences sur leur alimentation hydrique. *L'Agronomie Tropicale* **31** (1), pp.7-28.
- Craciun V., Leon, D., 1998.** An Analytical Method for Identifying and Designing a Moldboard Plough Surface. Transactions of the ASAE, vol. 41 (6) pp.1589- 1599 , Michigan, USA.
- Dalleine E., 1962.** Notes pour le siège N°904, 1228.
- Dalleine E., 1964.** Comment étudier un versoir de charrue. Revue agricole de France, Aout-Septembre , n°32.
- Doner R.D. and Nichols M.L , 1934.** The Dynamic Properties of Soil V. Dynamics of Soil on Plow Mouldboard Surfaces Related to Scouring. Journal of ASAE, Vol 15, N°1, pp.9-13
- Faure A., 1968.** Contribution à l'étude de l'action d'un versoir sur le sol. Thèse de docteur de spécialité.
- Faure A., 1969.** Contribution à l'étude de l'action d'un versoir sur le sol. 1-Etude de la géométrie des versoirs, classification. Annales Agronomiques 20(6) , p 565-595.
- Faure A., 1970.** Contribution à l'étude de l'action d'un versoir sur le sol. II- Comportement du sol travaillé par un versoir de charrue. Annales Agronomiques 21(2), pp.159-195 - INRA – France.
- Fiès J.C., 1971.** Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. Annales Agronomiques 22(6), pp.655-685.

- 
- Fies J.C., Stengel P., 1981.** Densité texturale de sols naturels II. - Eléments d'interprétation. *Agronomie* 1 pp. 659-666.
- Gao Qiong, Pitt R.E., Ruina A., 1986.** A Model to Predict Soil Forces on the Plough Mouldboard. *Journal of Agricultural Engineering Research* 35, p.141-155.
- Gee Clough, D.G. et al., 1978.** The empirical prediction of tractor implement field performance. *J. of Terramechanics*, 15 (2) p.81-94
- Girma G., 1989:** Measurement and prediction of forces on plough bodies–1. Measurement of forces and soil dynamic parameters. *Land and Water Use*. Eds. Dodd et Grace, Balkema, Rotterdam, p.1539-1545.
- Godwin R.J. and G. Spoor, 1977.** Soil failure with narrow tines. *Journal of Agricultural Engineering Research..* Vol.22 (1977) No.3 p.213-228.
- Goryatchkin V.P. et Sohene 1960 .**Collected Works in Three Volumes. Ed. N. D. Luchinskii. Translated 1972. Jerusalem, Israel: Ketter Press.
- Grisso et al., 1983 .** A soil model based on limit equilibrium analysis. *Transaction of the ASAE*, vol. 26 N° 4 , p.991-995
- Guerif J., 1994.** Effects of compaction on soil strength parameters. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production, Development in Agric. Eng. Series 11*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, p.191-214.
- Hénin S., 1969.**Le profil cultural, Edition Masson & Cie, Paris, 332 p.
- Hernanz J.L. et al. 1982.** Influence of speed and physical properties of soil in relation to the specific resistance and quality of work of mouldboard and disc ploughs, 9ème conférence internationale de International Soil Tillage Research Organisation – Osijek, Yougoslavie.
- Hettiaratchi D.R.P. and Reece A.R. 1967.** Symmetrical three-dimensional soil failure. *Journal .of Terramechanics*. Vol.4 , No.3, p:45-67.
- Hunt D. R. 1983.**Farm power and machinery management, Iowa state University Press, U.S.A.
- Kanafojski C. Z. 1967.**Théorie et construction des machines agricoles. T1, Ed.d'état des ouvrages en agriculture. Varsovie, 826 p.
- Kuczewski J. , 1978.** Eléments Théoriques des Machines Agricoles . Edition Varsovie Pologne.
- Langhaar H. L. , 1954.** Dimensional Analysis and Theory of Models, Ed. New York . John Wiley and Sons, Inc.
- Larson L.W. et al. , 1968.** Predicting draft forces using mouldboardplows in agricultural soils. *Transactions of ASAE*, 11, p.665-668.
- Laurent F., Eschenbrenner G., 1995.** Dynamique de l'azote : L'effet des résidus de culture et du travail du sol. *Perspectives agricoles, numéro spécial "Azote et Interculture"* 206, p.20-29.
- Maertens C. 1964.** Influence des propriétés physiques des sols sur le développement racinaire et conséquences sur l'alimentation hydrique et azotée des cultures. *Science de Sol*, p.31-41.
-

- Maertens C., Blanchet, R. et Puech, J. 1974.** Influence de différents régimes hydriques sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par la culture. In: *Régimes hydriques, systèmes racinaires et modalités d'alimentation en eau. Ann. Agron.* **25**, p.575-586.
- Magnan J.P. 1991.** Résistance au cisaillement. Techniques de l'ingénieur. Mécanique des sols. C216.
- Mesri D. 1982.** Etude des corps de charrues pour labours rapides et de quelques conséquences de l'accroissement de la vitesse de travail. Thèse Docteur-Ingénieur INA-PG, France.
- Meynard J.M. et al. 1981.** Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse. II-Types de réponse à la fumure azotée et application de la méthode du bilan prévisionnel. *Agronomie*, 1 (9), p.795-806.
- McKyes E ; Ali O. S. , 1977.** The cutting of soil by narrow blades. *Journal of Terramechanics.* (1977), **14**(2), p.43-58.
- Monnier G. et Stengel P., 1982.** Structure et état physique du sol, Techniques Agricoles, Fascicule 1140. Avignon- INRA.
- Nichols M.L. and Kummer, T. H. , 1932.** The Dynamic Properties of Soil IV. A Method of Analysis of Plow Moldboard Design Based Upon Dynamic Properties of Soil. *Agricultural Engineering* 13(11), p.279-285.
- Nicou R. 1974.** Contribution à l'étude et à l'amélioration de la porosité des sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche. Conséquences agronomiques. *L'Agronomie Tropicale* **29**, p.1100-1127.
- Nolot J.M., 1983.** Conduite de la culture du blé d'après les résultats de l'expérimentation Sud-Ouest de 1976 à 1981. ITFC, 15 p.
- Oskoui K.E. et al, 1982.** The Determination of Plough Draught. Part II. The Measurement and Prediction of Plough Draught for Two Mouldboard Shape in Three Soil Series. *Journal of Terramechanics*, 19, p.153-164.
- Perumpral J.V. et al , 1983.** A soil-tool model based on limit equilibrium analysis. *Transactions of ASAE*, 26(4), p.991-995.
- Ravonison N.M. et Destain, M.F., 1994.** Parametric cubic equations for modeling mouldboard plough surfaces. *Soil and Tillage research.* Vol.31, p.363-373.
- Recous S., Darwis D., Robin D., Machet J.M., 1993.** Décomposition des résidus de récolte. Interactions avec la dynamique de l'azote. in "Matières organiques et agricultures" Decroux J. et Ignazi J.C. éditeurs, COMIFER-GEMAS, p.3-15.
- Reece A.R., 1965.** The fundamental equation of earthmoving mechanics. In *Proceeding of Symposium of Earth Moving Machinery*, 179 (3), p.8-14. Institut of Mechanical Engineering. Newcastle Upon Tyne.
- Reece A.R., Hettiaratchi, D.R.P., 1989.** A slip-line method for estimating passive earth pressure. *Journal of Agricultural Engineering Research* 42(1), p.27-41.
- Richey S. et al., 1989.** The use of Three Dimensional Computer Graphics to Design Moldboard Plough Surfaces. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 43, p.245-258, UK.

- Ros V. et al., 1993.** Analysis of a Tillage Tool Geometry. ASAE Paper nr 93, St. Joseph, Mich., USA. 1995.
- Ros V. et Smith R., 1995.** Mathematical Modeling and Computer Aided Design of Passive Tillage Tools. Transactions of ASAE, vol. 38 N° 3, p.675-683.
- Scott Murrell, 1998.** Efficient Fertilizer Use - Tillage and Fertilizer Interaction. Data: Illinois, USA. Cited in PPI. Fertilizer management for today's tillage systems.
- Severkey et Tsyganou, 1982.** The determination of plough draught, Part II. The measurement and prediction plough draught for two mouldboard shapes in three soil series. Journal of Terramechanics, vol 19 N°3; p.153-164.
- Soehne W., 1960.** Suiting the plow body shape to higher speeds. Grundlagen der landtechnik 12:51-62, illus , Nat. Inst. Agr. Engin. Translation.21, p.101-107.
- Stafford J. V. and J. G. Hendrick. 1988.** Dynamic sensing of soil pans. Transactions of the ASAE 31(1), p.9-13. (Presented as ASAE Paper No. 85-1547, Dynamic control of pan rupturing tines.)
- Summers J.D. et al. 1986.** Development of tractor performance simulation model. Transaction of ASAE, 29 (3), p.661-666
- Swick, W. C. and Perumpral, 1988 .** A model for predicting soil-tool interaction. Journal of Terramechanics, 25(1) pp.43-56
- Trouse A.C., 1985.** Development of the controlled traffic concept. Proceeding of International Conference on Soil Dynamics. Auburn, Al, USA, p.1112-1119.
- Terzaghi K., 1967.** Theoretical soil mechanics in engineering practice, Edition Wiley, New-York.

## Publications sur le sujet :

- AMARA M., 1995.** Influence de la forme de deux corps de charrue sur les indices qualitatifs des labours. Annales de l'INA, Vol. 16, N°1 et 2, pp.1- 20, 1995
- AMARA M., 1998.** Contribution à la modélisation mathématique de l'effort de résistance à la traction de deux corps de charrue à soc en sol sableux. **Annales de l'INA Vol.19, n°1 et 2, pp. 1-17, 1998**
- AMARA M., GUEADIOURA I., MOUSSAOUI N., 2006.** Analyse de l'application des modèles de Gorjatschkin et de Gee Clough pour l'évaluation de l'effort de résistance à la traction de deux formes de corps de charrues à socs. **Annales de l'INA Volume n°27 Année 2006**
- AMARA M., BOURARACH EH. , GUEADIOURA I., HARRAD F., 2006.** Modélisation de l'effort de résistance à la traction des outils à dents : Influence de la forme, de l'angle d'inclinaison et de la vitesse de travail sur l'effort de résistance à la traction. **Actes de l'Institut Agronomique et Vétérinaires Rabat – Maroc N°25 (1&2), pp.61-75**
- AMARA M., KHEYAR M.O., 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. **Sciences, Technologie et développement, Revue N°1 ANDRU**

**AMARA M., KHEYAR M.O., 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. **Terre et Vie N°98, Juillet 2006.**

### **Publications on-line (Internet) :**

---

Notes de recherches sur « Académie française de l'agriculture, Juillet 2005 » :

**AMARA M., COUHERT J.P., HARRAD F., 2005 :** 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. [www.academie-agriculture.fr](http://www.academie-agriculture.fr)

### **Communications internationales :**

**AMARA M., KHEYAR M.O., HARRAD F., 2006.** Effet de la succession des machines agricoles sur la conservation des sols sahariens. (Participation orale). **Journées d'études Internationales sur la désertification et développement durable de Biskra du 10-12 juin 2006.**

# Annexes

## Annexe 1 : Coordonnées des points des surfaces actives des deux corps de charrue Echelle 1 / 4

SACRA															
x	0	3,6	6,6	7,7	7,9	2	5,5	8,6	9,7	10	4,2	7,6	10,5	11,6	11,7
y	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4
z	0	2	4	6	7	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8
x	11,5	6,9	9,5	12,4	13,6	14,2	14	9,5	14,7	16,2	16,2	15,5	18,3	18	-
y	4	6	6	6	6	6	6	8	8	8	8	8	10	10	-
z	10	0	2	4	6	8	10	0	4	6	8	10	8	10	-

ENPMA																			
X	0	4	7	8,7	9,5	10	2,6	6,3	9,5	11	11,6	12,9	5,7	9,3	12,2	13,1	13,7	14,2	14,5
Y	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4
Z	0	2	4	6	8	10	0	2	4	6	8	10	0	2	4	6	8	10	11
X	8,8	11	14,7	15,5	15,8	16,3	16,3	10,3	17,5	17,8	17,9	18	18,2	19,3	19,5	19,7	19,5	20,5	-
Y	6	6	6	6	6	6	6	8	8	8	8	8	8	10	10	10	10	11	-
Z	0	2	4	6	8	10	12	0	6	8	10	12	12	6	8	10	12	8	-

## Annexe 2 : Coordonnées des points des surfaces actives des deux corps de charrue Echelle 1 / 3

SACRA																								
x	0	6	12,2	11	12,3	13,2	1,5	5,7	9,9	12,5	14	14,5	15,5	4,2	8,1	11,5	14,2	15,5	16,1	16,8	17,5	6,5	10,1	13,5
y	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6
z	0	2	4	6	8	10	0	2	4	6	8	10	12	0	2	4	6	8	10	12	14	0	2	4
x	15,9	16,8	17,6	18,1	18,1	8,3	12,3	12,7	17,1	18	18,9	19,2	19,4	19,6	10,5	14,6	17,7	19	19,9	20,3	20,5	20,5	20,3	12,9
y	6	6	6	6	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	12
z	6	8	10	12	14	0	2	4	6	8	10	12	14	16	0	2	4	6	8	10	12	14	16	0
x	15,5	19,5	20,6	20,9	21,5	21,7	21,8	21,7	14,8	22	22,3	22,5	22,8	22,7	22,5	23,7	24,2	23,7	23,6	23,5	24,9	24,9	24,7	24,5
y	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14	14	14	14	14	14	16	16	16	16	16	17	18	18	18
z	2	4	6	8	10	12	14	16	0	6	8	10	12	14	16	8	10	12	14	16	10	12	14	16

ENPMA																													
x	0	3,4	5,2	8	10,1	13,4	14,2	14,3	15,9	16,4	16,5	16,8	17,1	17,2	18	18,5	18,5	18,5	19,3	19,9	20,2	20,5	20,7	21,7	21,8	22	22	7	
y	0	2	0	2	0	2	0	2	2	2	2	0	2	2	0	2	0	0	0	2	2	2	2	4	4	4	4	4	
z	0	0	2	2	4	4	6	6	8	6	10	8	12	14	10	8	12	14	15	10	12	14	16	10	12	18	14	16	0
x	10,2	11	13,3	13,9	15,3	16,8	17,6	18,7	20,3	20,3	20,3	22,4	22,5	23	23,3	23,3	23,5	23,5	24	24,5	24,9	25	25,2	25,3	25,7	26,8	26,9	27	16
y	6	4	8	6	4	8	6	4	8	6	4	8	6	6	6	6	6	8	8	8	8	8	8	8	8	10	10	10	10
z	0	2	0	2	4	2	4	6	4	6	8	6	10	12	8	14	16	18	10	12	14	20	18	16	8	18	20	22	0
x	18	18,7	23,8	25,3	26	26,5	26,7	26,8	27,5	27,8	28,1	28,4	28,5	28,5	28,5	29,5	30	30,1	30,2	30,2	30,5	31,1	31,1	31,2	31,5	32,3	32,3	-	-
y	10	10	10	10	10	10	10	10	12	12	12	11	12	12	12	14	14	14	14	14	14	16	16	18	18	18	18	18	18
z	0	2	6	8	10	12	14	16	10	12	14	22	18	18	20	12	22	20	18	18	14	18	20	18	14	18	18	-	-



## Annexe 3 : Coordonnées des points des surfaces actives des deux corps de charrue Echelle 1 / 2

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

## Annexes 4 : Valeurs des efforts de résistance à la traction et des différents paramètres introduits dans le modèle mathématiques de Ft.





Forme	Ft	Ech	d	v	$\alpha$	$\gamma$	$\theta$	k	k1	k2
SACRA	8,58	0,5	1,02	0,23	0,297	0,698	0,576	0,75	2,559	1,274
SACRA	8,76	0,5	1,02	0,29	0,297	0,698	0,576	0,75	2,559	1,274
SACRA	9,94	0,5	1,02	0,43	0,297	0,698	0,576	0,75	2,559	1,274
SACRA	11,88	0,5	1,02	0,87	0,297	0,698	0,576	0,75	2,559	1,274
SACRA	20,64	0,5	1,35	0,23	0,297	0,698	0,576	0,75	2,559	1,274
SACRA	25,28	0,5	1,35	0,29	0,297	0,698	0,576	0,75	2,559	1,274
SACRA	26,24	0,5	1,35	0,43	0,297	0,698	0,576	0,75	2,559	1,274
SACRA	38,24	0,5	1,35	0,87	0,297	0,698	0,576	0,75	2,559	1,274
SACRA	40,32	0,5	1,63	0,23	0,297	0,698	0,576	0,75	2,559	1,274
SACRA	36,96	0,5	1,63	0,29	0,297	0,698	0,576	0,75	2,559	1,274
SACRA	49,44	0,5	1,63	0,43	0,297	0,698	0,576	0,75	2,559	1,274
SACRA	60,32	0,5	1,63	0,87	0,297	0,698	0,576	0,75	2,559	1,274
ENPMA	24,78	0,5	1,02	0,23	0,506	0,663	0,611	0,75	2,256	1,015
ENPMA	24,24	0,5	1,02	0,29	0,506	0,663	0,611	0,75	2,256	1,015
ENPMA	25,5	0,5	1,02	0,43	0,506	0,663	0,611	0,75	2,256	1,015
ENPMA	29,4	0,5	1,02	0,87	0,506	0,663	0,611	0,75	2,256	1,015
ENPMA	28,14	0,5	1,35	0,23	0,506	0,663	0,611	0,75	2,256	1,015
ENPMA	28,18	0,5	1,35	0,29	0,506	0,663	0,611	0,75	2,256	1,015
ENPMA	39,36	0,5	1,35	0,43	0,506	0,663	0,611	0,75	2,256	1,015
ENPMA	54,56	0,5	1,35	0,87	0,506	0,663	0,611	0,75	2,256	1,015
ENPMA	56,32	0,5	1,63	0,23	0,506	0,663	0,611	0,75	2,256	1,015
ENPMA	57,76	0,5	1,63	0,29	0,506	0,663	0,611	0,75	2,256	1,015
ENPMA	64,32	0,5	1,63	0,43	0,506	0,663	0,611	0,75	2,256	1,015
ENPMA	62,24	0,5	1,63	0,87	0,506	0,663	0,611	0,75	2,256	1,015

Les valeurs des efforts Ft représentent les moyennes de 10 valeurs obtenues sur l'enregistrement graphique.

Les unités des différents paramètres sont respectivement :

Paramètres	Ft	Ech	d	v	$\alpha$	$\gamma$	$\theta$	k	k1	k2
Unités	daN	-	g/cm <sup>3</sup>	m/s	rad	rad	rad	-	-	-

## Annexe 5 : Valeurs logarithmiques des $\pi$ termes pour l'établissement du modèle mathématique de l'effort de résistance à la traction.



**Contribution à la modélisation interface outils aratoires sol Optimisation de la forme et de l'effort de résistance à la traction des corps de charrues à socs et des outils à dents**

Nœuds	CisXZ1CDGAVO	CNX1CDGAVO	CNZ1CDGAVO	CisXZ1CDGAPO	CNX1CDGAPO	CNZ1CDGAPO
1	0,4758	0,5925	1,9751	0,2886	0,6251	2,0837
2	0,4489	0,4827	1,8996	0,2652	0,5234	2,0046
3	0,3953	0,2629	1,7487	0,2184	0,3199	1,8463
4	0,3416	0,0432	1,5977	0,1717	0,1165	1,6881
5	0,2879	-0,176	1,4468	0,1249	-0,086	1,5298
6	0,2343	-0,396	1,2958	0,0781	-0,29	1,3716
7	0,1806	-0,616	1,1448	0,0314	-0,493	1,2133
8	0,1269	-0,835	0,9939	-0,015	-0,697	1,0551
9	0,0733	-1,055	0,8429	-0,062	-0,9	0,8968
10	0,0196	-1,275	0,692	-0,108	-1,104	0,7386
11	-0,034	-1,495	0,541	-0,155	-1,307	0,5803
12	-0,087	-1,714	0,3901	-0,202	-1,511	0,4221
13	-0,141	-1,934	0,2391	-0,249	-1,714	0,2638
14	-0,195	-2,154	0,0882	-0,296	-1,917	0,1056
15	-0,248	-2,373	-0,062	-0,342	-2,121	-0,052
16	-0,302	-2,593	-0,213	-0,389	-2,324	-0,21
17	-0,356	-2,813	-0,364	-0,436	-2,528	-0,369
18	-0,409	-3,033	-0,515	-0,483	-2,731	-0,527
19	-0,463	-3,252	-0,666	-0,529	-2,935	-0,685
20	-0,517	-3,472	-0,817	-0,576	-3,138	-0,843
21	-0,57	-3,692	-0,968	-0,623	-3,342	-1,002
22	-0,624	-3,912	-1,119	-0,67	-3,545	-1,16
23	-0,678	-4,131	-1,27	-0,716	-3,748	-1,318
24	-0,731	-4,351	-1,421	-0,763	-3,952	-1,476
25	-0,785	-4,571	-1,572	-0,81	-4,155	-1,635
26	-0,812	-4,681	-1,647	-0,833	-4,257	-1,714
Moyennes	-0,1679	-2,0439	0,1639	-0,2722	-1,8157	0,1849

CisXZ1CDGAVO : contrainte de cisaillement suivant le plan XZ, lorsque la bande de terre sollicitée est fixée sur un coté et pour une position haute du point d'application de la force.

CNX1CDGAVO : contrainte normale suivant la direction X, lorsque la bande de terre sollicitée est fixée sur un coté et pour une position haute du point d'application de la force.

CNZ1CDGAVO : contrainte normale suivant la direction Z, lorsque la bande de terre sollicitée est fixée sur un coté et pour une position haute du point d'application de la force.

CisXZ1CDGAPO : contrainte de cisaillement suivant le plan XZ, lorsque la bande de terre sollicitée est fixée sur un coté et pour une position basse du point d'application de la force.

CNX1CDGAPO : contrainte normale suivant la direction X, lorsque la bande de terre sollicitée est fixée sur deux cotés et pour une position basse du point d'application de la force.

CNZ1CDGAPO : contrainte normale suivant la direction Z, lorsque la bande de terre sollicitée est fixée sur un coté et pour une position basse du point d'application de la force.

## Annexe 7 : Variation des contraintes subies par la bande de terre sous l'action de la surface active du corps de charrue à socs (analyse théorique de la déformation de la bande de terre fixée sur deux cotés)

Nœuds	CisXZ2CDGAVO	CNX2CDGAVO	CNZ2CDGAVO	CisXZ2CDGAPO	CNX2CDGAPO	CNZ2CDGAPO
1	0,4499	0,4695	1,2855	0,4007	0,4589	1,5298
2	0,4229	0,3631	1,2193	0,377	0,3606	1,4584
3	0,3688	0,1504	1,0869	0,3296	0,1639	1,3155
4	0,3147	-0,062	0,9545	0,2822	-0,032	1,7226
5	0,2606	-0,275	0,8221	0,2348	-0,229	1,0297
6	0,2065	-0,488	0,6897	0,1874	-0,426	0,8869
7	0,1524	-0,7	0,5573	0,14	-0,623	0,744
8	0,0983	-0,913	0,4249	0,0926	-0,819	0,6011
9	0,0442	-1,126	0,2924	0,0452	-1,016	0,4582
10	-0,009	-1,339	0,16	-0,002	-1,213	0,3153
11	-0,063	-1,552	0,0276	-0,049	-1,409	0,1725
12	-0,118	-1,764	-0,104	-0,097	-1,606	0,0296
13	-0,172	-1,977	-0,237	-0,144	-1,803	-0,113
14	-0,226	-2,19	-0,369	-0,191	-2	-0,256
15	-0,28	-2,403	-0,502	-0,239	-2,196	-0,399
16	-0,334	-2,615	-0,634	-0,286	-2,393	-0,541
17	-0,388	-2,828	-0,766	-0,334	-2,59	-0,684
18	-0,442	-3,041	-0,899	-0,381	-2,787	-0,827
19	-0,496	-3,254	-1,031	-0,428	-2,983	-0,97
20	-0,55	-3,467	-1,164	-0,476	-3,18	-1,113
21	-0,604	-3,679	-1,296	-0,523	-3,377	-1,256
22	-0,659	-3,892	-1,428	-0,57	-3,573	-1,399
23	-0,713	-4,105	-1,561	-0,618	-3,77	-1,542
24	-0,767	-4,318	-1,693	-0,665	-3,967	-1,684
25	-0,821	-4,531	-1,826	-0,713	-4,164	-1,827
26	-0,848	-4,637	-1,892	-0,736	-4,262	-1,899
Moyennes	-0,1989	-2,0835	-0,3031	-0,1677	-1,9013	-0,1633

CisXZ2CDGAVO : contrainte de cisaillement suivant le plan XZ, lorsque la bande de terre sollicitée est fixée sur deux cotés et pour une position haute du point d'application de la force.

CNX2CDGAVO : contrainte normale suivant la direction X, lorsque la bande de terre sollicitée est fixée sur deux cotés et pour une position haute du point d'application de la force.

CNZ2CDGAVO : contrainte normale suivant la direction Z, lorsque la bande de terre sollicitée est fixée sur deux cotés et pour une position haute du point d'application de la force.

CisXZ2CDGAPO : contrainte de cisaillement suivant le plan XZ, lorsque la bande de terre sollicitée est fixée sur deux cotés et pour une position basse du point d'application de la force.

CNX2CDGAPO : contrainte normale suivant la direction X, lorsque la bande de terre sollicitée est fixée sur deux cotés et pour une position basse du point d'application de la force.

CNZ2CDGAPO : contrainte normale suivant la direction Z, lorsque la bande de terre sollicitée est fixée sur deux cotés et pour une position basse du point d'application de la force.

## **Annexes 8 : Valeurs des contraintes de cisaillement, des contraintes normales et des contraintes de Von Mises pour la forme ENPMA**

Material: S235

Elastic modulus 210000.00 [N/mm<sup>2</sup>]

Poisson constant 0.30

Thickness 4.00



	max./min. Values			Nodes	XY-coord.
Displacement	max dx [mm]	:	8.2047 * E-3	46	300.00, 195.00
	min dx [mm]	:	0.0000 * E-3	6	82.50, 0.00
Displacement	max dy [mm]	:	8.6034 * E-3	2	0.00, 0.00
	min dy [mm]	:	-5.8298 * E-3	46	300.00, 195.00
Displacement	max d [mm]	:	10.0708 * E-3	46	300.00, 195.00
Von Mises	max svM [N/mm <sup>2</sup> ]	:	20.0106	18	165.00, 0.00
Stress in X-Axis	max sX [N/mm <sup>2</sup> ]	:	9.6262	6	82.50, 0.00
	min sX [N/mm <sup>2</sup> ]	:	-22.5133	18	165.00, 0.00
Stress in Y-Axis	max sY [N/mm <sup>2</sup> ]	:	11.2604	6	82.50, 0.00
	min sY [N/mm <sup>2</sup> ]	:	-14.8785	17	165.07, 0.10
Stress in Z-Axis	max sZ [N/mm <sup>2</sup> ]	:	6.2960	6	82.50, 0.00
	min sZ [N/mm <sup>2</sup> ]	:	-9.6985	17	165.07, 0.10
Shear Stress	max Txy [N/mm <sup>2</sup> ]	:	6.2249	17	165.07, 0.10
	min txy [N/mm <sup>2</sup> ]	:	-2.2035	10	105.13, 66.90
Main Stress	max s1 [N/mm <sup>2</sup> ]	:	14.8297	6	82.50, 0.00
	min s1 [N/mm <sup>2</sup> ]	:	-9.8080	17	165.07, 0.10
Main Stress	max s2 [N/mm <sup>2</sup> ]	:	6.1569	6	82.50, 0.00
	min s2 [N/mm <sup>2</sup> ]	:	-22.5205	17	165.07, 0.10

## Annexes 9 : Valeurs des contraintes de cisaillement, des contraintes normales et des contraintes de Von Mise pour la forme SACRA

Material: S235

Elastic modulus 210000.00 [N/mm<sup>2</sup>]

Poisson constant 0.30

Thickness 4.00





max./min. Values		Nodes	XY-coord.
Displacement	max dx [mm] :	46	235.00, 160.00
	min dx [mm] :	4	65.00, 0.00
Displacement	max dy [mm] :	18	0.00, 0.00
	min dy [mm] :	46	235.00, 160.00
Displacement	max d [mm] :	46	235.00, 160.00
Von Mises	max svM [N/mm <sup>2</sup> ]:	12	125.14, 19.40
Stress in X-Axis	max sX [N/mm <sup>2</sup> ]:	4	65.00, 0.00
	min sX [N/mm <sup>2</sup> ]:	13	131.87, 1.49
Stress in Y-Axis	max sY [N/mm <sup>2</sup> ]:	4	65.00, 0.00
	min sY [N/mm <sup>2</sup> ]:	13	131.87, 1.49
Stress in Z-Axis	max sZ [N/mm <sup>2</sup> ]:	4	65.00, 0.00
	min sZ [N/mm <sup>2</sup> ]:	13	131.87, 1.49
Shear Stress	max Txy [N/mm <sup>2</sup> ]:	3	103.96, 23.74
	min txy [N/mm <sup>2</sup> ]:	23	142.38, 9.91
Main Stress	max s1 [N/mm <sup>2</sup> ]:	4	65.00, 0.00
	min s1 [N/mm <sup>2</sup> ]:	13	131.87, 1.49
Main Stress	max s2 [N/mm <sup>2</sup> ]:	4	65.00, 0.00
	min s2 [N/mm <sup>2</sup> ]:	13	131.87, 1.49

## Annexe 10 : Valeurs des efforts de résistance à la traction des socs usés

<b>H</b>	<b>H</b>	<b>α</b>	<b>θ</b>	<b>v</b>
22,00	12,26	1,04	0,445	0,23
37,73	11,48	1,04	0,471	0,23
57,73	11,46	1,04	0,48	0,23
76,9	10,83	1,04	0,497	0,23
77,34	10,47	1,04	0,515	0,23
78,68	10,18	1,04	0,523	0,23
106,55	9,4	1,04	0,567	0,23
112,85	9,36	1,04	0,584	0,23
130,55	9,34	1,04	0,68	0,23
149,00	8,49	1,04	0,829	0,23
3,61	12,26	0,78	0,445	0,23
4,83	11,48	0,78	0,471	0,23
6,83	11,46	0,78	0,48	0,23
7,675	10,83	0,78	0,497	0,23
12,06	10,47	0,78	0,515	0,23
12,19	10,18	0,78	0,523	0,23
29,48	9,40	0,61	0,567	0,23
29,71	9,36	0,61	0,584	0,23
37,86	9,34	0,61	0,68	0,23
39,29	8,49	0,61	0,829	0,23
5,88	12,26	1,04	0,445	0,42
13,42	11,48	1,04	0,471	0,42
32,24	11,46	1,04	0,48	0,42
46,769	10,83	1,04	0,497	0,42
59,69	10,47	1,04	0,515	0,42
72,11	10,18	1,04	0,523	0,42
88,67	9,40	1,04	0,567	0,42
29,71	9,36	1,04	0,584	0,42
131,45	9,34	1,04	0,68	0,42
136,55	8,49	1,04	0,829	0,42
3,45	12,26	0,78	0,445	0,42
3,87	11,48	0,78	0,471	0,42

## Annexe 10 (suite) : Valeurs des efforts de résistance à la traction des socs usés

**Contribution à la modélisation interface outils aratoires sol Optimisation de la forme et de l'effort de résistance à la traction des corps de charrues à socs et des outils à dents**

---

<b>Ft</b>	<b>H</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\theta</math></b>	<b>v</b>
4,55	11,46	0,78	0,48	0,42
6,06	10,83	0,78	0,497	0,42
7,32	10,47	0,78	0,515	0,42
9,32	10,18	0,78	0,523	0,42
13,22	9,4	0,78	0,567	0,42
29,71	9,36	0,78	0,584	0,42
25,85	9,34	0,78	0,68	0,42
28,78	8,49	0,78	0,829	0,42
18,72	12,26	0,61	0,445	0,42
23,08	11,48	0,61	0,471	0,42
23,98	11,46	0,61	0,48	0,42
28,05	10,83	0,61	0,497	0,42
28,61	10,47	0,61	0,515	0,42
28,85	10,18	0,61	0,523	0,42
38,01	9,4	0,61	0,567	0,42
29,71	9,36	0,61	0,584	0,42
41,48	9,34	0,61	0,68	0,42
7,93	10,47	0,78	0,515	0,49
8,08	10,18	0,78	0,523	0,49
9,87	9,4	0,78	0,567	0,49
29,71	9,36	0,78	0,584	0,49
13,67	9,34	0,78	0,68	0,49
24,15	8,49	0,78	0,829	0,49
21,47	12,26	0,61	0,445	0,49
22,28	11,48	0,61	0,471	0,49
23,24	11,46	0,61	0,48	0,49
23,68	10,83	0,61	0,497	0,49
25,79	10,47	0,61	0,515	0,49
25,94	10,18	0,61	0,523	0,49
28,125	9,4	0,61	0,567	0,49
29,71	9,36	0,61	0,584	0,49
30,62	9,34	0,61	0,68	0,49
33,33	8,49	0,61	0,829	0,49