

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش-الجزائر

Ecole Nationale Supérieure Agronomique El Harrach – Alger

THÈSE

En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en sciences
agronomiques.

THÈME

Modélisation de l'interface outils aratoires-sol :

**Analyse du comportement du sol sous l'action des pièces travaillantes et
des besoins énergétiques**

Soutenue le **08/06/2023** par : **BELLEMOU Abdelkrim** devant le jury :

Président : **MOHAMMEDI Zekari** Maître de Conférences « A » (ENSA)

Directeur de thèse : **FEDDAL Mohamed Amine** Professeur (ENSA)

Examineurs : **KHEMISSI Houari** Maître de Conférences « A » (U. Boumerdes)

BENCHEIKH Abdelaali Maître de Conférences « A » (U. Adrar)

Membre invité : **LABAD Ryma** Maître de conférences "A" (ENSA)

Année universitaire : 2022 /2023

Sommaire

Introduction générale	13
Chapitre 1. Revue bibliographique	19
1.1 Place et importance des techniques de travail du sol	20
1.1.1 Importance du travail du sol	20
1.1.2 Objectifs des opérations de travail du sol	21
1.1.3 Objectifs des labours et leurs classifications	25
1.1.4 Le matériel de labour	26
1.1.5 Classification des labours	35
1.1.6 Place et importance des labours dans l'itinéraire technique	36
1.2 Impact des pièces travaillantes de la charrue à soc sur le comportement physico-mécanique du sol	37
1.2.1 Mode d'action des pièces travaillantes de la charrue à soc et le profil obtenu	37
1.2.2 Profil obtenu	38
1.2.3 Comportement du sol sous l'action des outils aratoires	41
1.3 Méthodes de caractérisation et de projection des corps de charrue	50
1.3.1 Caractérisation des outils aratoires	51
1.3.2 Méthode des coordonnées	51
1.3.3 Méthode des projections	51
1.3.4 Méthode photographique ou optique	51
1.3.5 Autres méthodes	52
1.3.6 Modélisation de la trajectoire de la bande de terre	52
1.4 Conclusion bibliographique et orientations de la recherche	56
Chapitre 2. Analyse du comportement mécanique des surfaces actives de deux types de corps de charrue fabriqués en Algérie	58
2.1 Description du matériel utilisé	58
2.1.1 Dispositif de mesure des coordonnées des points des surfaces actives des corps de charrue à soc	61
2.1.2 Le logiciel utilisé	62
2.2 Méthodologie	65
2.2.1 Méthode de caractérisation géométrique des surfaces actives	65
2.2.2 Méthode d'analyse du comportement mécanique des surfaces actives de la charrue à socs	66
2.3 Résultats de l'analyse du comportement mécanique des surfaces actives des charrues à socs	67

2.3.1 Création de surface	78
2.3.2 Création du solide	83
2.3.3 Méthode d'analyse du comportement mécanique des deux surfaces actives	85
2.4 Résultats de la simulation	91
2.4.1 Analyse de la contrainte de Von Mises (Re), coefficient de sécurité (K), déformation équivalente (ϵ_{equ}) et déplacement résultant (d) sur le corps de charrue à carrellet	92
2.4.2 Interprétation des résultats	102
Chapitre 3. Analyse du comportement physico-mécanique du sol sous l'action des pièces travaillantes de deux types de socs (à carrellet mobile et à bec de canard)	106
3.1 Description du site expérimental	108
3.2 Matériel et méthodes	109
3.2.1 Protocole expérimental	109
3.2.2 La technique de travail du sol étudiée	110
3.3 Mesures des propriétés physico-mécaniques du sol	110
3.4 Résultats et discussion	111
3.4.1 Analyse de la variation des indices physico-mécaniques du sol	111
Conclusion générale et perspectives	119
Références bibliographiques	121

Avant-propos:

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour continuer, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés et permis de mener à bien ce travail. Au nom du dieu le clément et le miséricordieux louange à ALLAH.

*Toute ma reconnaissance à mon Directeur de thèse, **Monsieur FEDDAL Mohamed Amine** Professeur à l'ENSA pour son soutien, sa disponibilité, ses conseils ainsi que sa patience qui ont été déterminatifs pour l'élaboration et la finalisation de ce travail.*

*Un grand respect à **Monsieur MOHAMMEDI Zekari** Maîtres de Conférences classe A à l'ENSA de m'avoir offert l'honneur de présider le jury.*

*Une profonde gratitude et des vifs remerciements vont également à **Monsieur KHEMISSI Houari** Maîtres de Conférences classe A à l'université de Boumerdes et **Monsieur BENCHEIKH Abdelaali** Maîtres de Conférences classe A à l'université d'Adrar, pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

Je remercie mes parents de m'avoir donné la vie et fait de moi ce que je suis.

Un très grand MERCI à mon épouse d'être à mes côtés et de m'avoir soutenu depuis toujours.

Enfin un grand merci à toute personne qui reconnaîtra son empreinte dans ce travail.

Je dédie ce travail à :
ma précieuse épouse adorée,
à mes petits anges Maram et Abderraouf,
à mes très chers parents,
à mes beaux-parents,
à ma sœur et mes frères,
à mes beaux-frères,
à mes neveux et nièce,
à mes cousins,
au groupe SunBull, à tous mes amis et collègues.
A la mémoire du Professeur AMARA Mahfoud.
Blm

Résumé

Étant donné la grande variabilité spatiale des sols agricoles en Algérie, le choix de la conception des outils aratoires destinés à la mise en place des cultures constitue un défi majeur. Une sélection inadaptée peut affecter la qualité du travail du sol et, par conséquent, impacter le rendement des cultures. Des études menées sur l'influence des formes des surfaces actives des corps de charrue à versoirs sur les critères qualitatifs du labour ont mis en évidence l'importance de ce paramètre. Ainsi, avant d'opter pour une configuration spécifique, il est essentiel de caractériser avec précision les surfaces actives des pièces travaillantes des outils aratoires. C'est dans ce contexte que ce travail a été réalisé. L'objectif de ce travail est l'analyse du comportement de la surface active de deux corps de charrue les plus fréquemment utilisés en Algérie (à carrelet mobile et bec de canard) par la méthode des éléments finis. Cette méthode permet la compréhension du comportement mécanique des surfaces complexes comme celles des corps de charrue à soc et ce au niveau de tous les points de la surface. Les résultats obtenus ont permis de constater que le soc à carrelet offre une meilleure résistance à l'usure et aux déformations plastiques grâce à la présence du carrelet, tandis que le soc à bec de canard est plus sensible aux efforts localisés sur la pointe. Les simulations sur les socs de charrue à carrelet et à bec de canard ont analysé la contrainte de Von Mises, le coefficient de sécurité, la déformation équivalente et le déplacement résultant sous différentes charges (200, 400 et 600 daN). Les résultats montrent que la pointe du soc à bec de canard est plus sollicitée, entraînant une déformation plastique dès 400 daN, tandis que le soc à carrelet reste majoritairement en domaine élastique grâce au carrelet, qui absorbe une partie des efforts. La contrainte de Von Mises diminue plus rapidement sur le soc à bec de canard en raison de sa surface plus grande. Le coefficient de sécurité devient critique à 600 daN pour les deux socs, bien que le soc à carrelet conserve une meilleure résistance. Le déplacement résultant indique une dissipation progressive des efforts, suivie d'une légère rotation du versoir sous la charge. Ainsi, le soc à carrelet présente une meilleure durabilité et résistance à l'usure que le soc à bec de canard. Par ailleurs, les résultats de cette thèse ont montré que le labour améliore la rétention d'eau et la porosité du sol, favorisant ainsi l'aération et la croissance racinaire. Il réduit la résistance mécanique, facilitant la pénétration des racines. La charrue à bec de canard travaille un volume de sol plus important, tandis que le carrelet mobile assure une meilleure structuration grâce à une profondeur et une largeur de labour supérieures. Un labour intermédiaire est recommandé pour optimiser la gestion de la matière organique et des adventices.

Mots clés : charrue, soc bec de canard, soc à carrelet mobile, méthode des éléments finis, propriétés du sol.

ABSTRACT

Given the spatial variability of algerian agricultural soils, selecting the appropriate shape of tillage tools for crop establishment is often a delicate task. a poor choice will impact the quality of soil tillage operations and, indirectly, crop yields. results on the effect of the active surface shapes of moldboard plow bodies on qualitative plowing indices have demonstrated the importance of this choice. before selecting the appropriate shape, it is essential to characterize the active surfaces of the working components of tillage tools. this study was conducted in this context.

the objective of this work is to analyze the behavior of the active surface of the two most commonly used plow bodies in algeria (duck-billed and square plow) using the finite element method. this method enables the understanding of the mechanical behavior of complex surfaces, such as those of moldboard plow shares, at all points of the surface.

the obtained results indicate that the chisel share provides better resistance to wear and plastic deformation due to the presence of the chisel, whereas the duckfoot share is more sensitive to localized forces at the tip. simulations on the duck-billed and square plow analyzed von mises stress, safety factor, equivalent strain, and resulting displacement under different loads (200, 400, and 600 dan). the results show that the tip of the duckfoot share is more stressed, leading to plastic deformation from 400 dan, whereas the chisel share remains mostly in the elastic domain thanks to square plow, which absorbs part of the forces. the von mises stress decreases more rapidly on the duckfoot share due to its larger surface. the safety factor becomes critical at 600 dan for both shares, although the square plow maintains better resistance. the resulting displacement indicates a gradual dissipation of forces, followed by a slight rotation of the moldboard under load. thus, the duck-billed and square plow exhibits better durability and wear resistance than the duckfoot share.

furthermore, the results of this study showed that plowing improves water retention and soil porosity, thereby promoting aeration and root growth. it reduces mechanical resistance, facilitating root penetration. the duckfoot plow tills a larger soil volume, while the square plow ensures better structuring due to its greater plowing depth and width. an intermediate plowing approach is recommended to optimize organic matter management and weed control.

KEYWORDS: duck-billed and square plow, finite element method, soil properties

الملخص

نظراً للتباين المكاني الكبير الذي يميز الترب الزراعية في الجزائر، فإن اختيار تصميم الأدوات الفلاحية المخصصة لتحضير التربة ووضع المحاصيل يمثل تحدياً مهماً. وقد يؤدي الاختيار غير الملائم لهذه الأدوات إلى التأثير سلباً في جودة خدمة التربة، ومن ثم في مردودية المحاصيل. وقد أظهرت الدراسات التي تناولت تأثير أشكال الأسطح الفعالة لأجسام المحاريث القلابية على المؤشرات النوعية للحرث أهمية هذا العامل. لذلك، وقيل اعتماد شكل معين، من الضروري توصيف الأسطح الفعالة للأجزاء العاملة للأدوات الزراعية توصيفاً دقيقاً. وفي هذا الإطار أنجز هذا العمل.

يهدف هذا البحث إلى تحليل السلوك الميكانيكي للسطح الفعال لنوعين من أجسام المحاريث الأكثر استعمالاً في الجزائر، وهما المحراث ذو الكارليت المتحرك والمحراث ذو المنقار البطي، وذلك باستخدام طريقة العناصر المحدودة. وتتيح هذه الطريقة فهماً دقيقاً للسلوك الميكانيكي للأسطح المعقدة، مثل الأسطح الفعالة لأجسام المحاريث ذات السكة، وفي مختلف نقاط السطح.

أظهرت النتائج أن السكة المزودة بالكارليت تتميز بمقاومة أفضل للتآكل وللتشوهات اللدنة بفضل وجود الكارليت، في حين أن سكة المنقار البطي أكثر حساسية للإجهادات الموضعية المطبقة عند الطرف. وشملت عمليات المحاكاة تحليل إجهاد فون ميزس، ومعامل الأمان، والتشوه المكافئ، والإزاحة المحصلة تحت تأثير ثلاثة مستويات من الأحمال، هي 200 و 400 و 600 دا. N

وأظهرت النتائج أن طرف سكة المنقار البطي يتعرض لإجهادات أكبر، مما يؤدي إلى ظهور تشوهات لدنة ابتداءً من حمولة 400 دا. N، بينما تبقى سكة الكارليت في معظم الحالات ضمن المجال المرن، وذلك بفضل قدرة الكارليت على امتصاص جزء من الجهود المطبقة. كما تبين أن إجهاد فون ميزس ينخفض بصورة أسرع في سكة المنقار البطي نتيجة اتساع سطحها. ويصبح معامل الأمان حرجاً عند حمولة 600 دا. N بالنسبة إلى النوعين، مع بقاء سكة الكارليت أكثر مقاومة. كما أظهرت قيم الإزاحة المحصلة تبديداً تدريجياً للجهود، يتبعه دوران طفيف للوحة القلابية تحت تأثير الحمل. وبذلك، تتميز سكة الكارليت بمتانة ومقاومة للتآكل أفضل مقارنة بسكة المنقار البطي.

ومن جهة أخرى، بينت نتائج هذه الأطروحة أن الحرث يساهم في تحسين احتفاظ التربة بالماء وزيادة مساميتها، مما يساعد على تحسين التهوية وتطور الجذور. كما يؤدي إلى تقليل المقاومة الميكانيكية للتربة، وبالتالي تسهيل اختراق الجذور. وأظهرت النتائج كذلك أن المحراث ذو المنقار البطي يؤثر في حجم أكبر من التربة، في حين يضمن الكارليت المتحرك بنية أفضل للتربة بفضل عمق وعرض حرث أكبر. وبناءً على ذلك، يُوصى باعتماد حرث متوسط من أجل تحقيق توازن أفضل بين إدارة المادة العضوية ومكافحة الأعشاب الضارة.

الكلمات المفتاحية: المحراث، سكة المنقار البطي، سكة الكارليت المتحرك، طريقة العناصر المحدودة، خصائص التربة.

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 : Effets directs et indirects des actions mécaniques liées au travail du sol	21
Figure 1.2 : Le principe de labour	26
Figure 1.3 : Charrue à soc réversible à six corps de charrue.....	28
Figure 1.4 : Vue éclatée d'une charrue à soc KVERNELAND	28
Figure 1.5 : Types de corps de charrue	31
Figure 1.6 : Détail d'un corps de charrue.....	32
Figure 1.7 : Types de socs	33
Figure 1.8 : Description d'une charrue à disque portée.....	35
Figure 1.9 : Les types de labour	36
Figure 1.10 : Profil obtenu pour le versoir hélicoïdal.....	39
Figure 1.11 : Profil obtenu pour le versoir cylindrique.....	39
Figure 1.12 : Profil obtenu pour le versoir universel.....	40
Figure 1.13 : Vue de profil d'un corps de charrue à soc éclaté dans le repère Oxyz.....	50
Figure 1.14 : Courbure moyenne suivant le plan XOY (forme SACRA).....	53
Figure 1.15 : Courbure moyenne suivant le plan XOZ (SACRA)	53
Figure 1.16 : Courbure moyenne suivant le plan YOZ (SACRA).....	54
Figure 1.17 : Courbure moyenne suivant le plan XOY (ENPMA).....	54
Figure 1.18 : Courbure moyenne suivant le plan XOZ (ENPMA).....	55
Figure 1.19 : Courbure moyenne suivant le plan XOZ (ENPMA).....	55

Chapitre 2

Figure 2.1 : (a) Dimensions de la charrue MAGI ; (b) angles les plus importants ; (c) vue de face d'un corps de charrue.....	60
Figure 2.2 : Caractéristiques dimensionnelles d'un corps de charrue à socs.....	61
Figure 2.3 : Dispositif de mesure des coordonnées (x, y, z) des deux corps de charrues.....	62
Figure 2.4 : Interface du logiciel AutoCAD Mechanical 2018 pour la création du nuage de points...	68
Figure 2.5 : Interface du logiciel AutoCAD Mechanical 2018 pour attacher le fichier SCR.....	68
Figure 2.6 : Vue de haut du nuage de points de la charrue à soc à carrel mobile	69
Figure 2.7 : Vue de bas du nuage de points de la charrue à soc à carrel mobile	69
Figure 2.8 : Vue de gauche du nuage de points.....	70
Figure 2.9 : Vue de droite du nuage de points.....	70
Figure 2.10 : Vue de face du nuage de points	71
Figure 2.11 : Vue arrière du nuage de points	71

Figure 2.12 : Transformation du nuage de points en spline	80
Figure 2.13 : Surfaçage du corps à carrelet mobile	81
Figure 2.14 : Surfaçage du corps à bec de canard.....	82
Figure 2.15 : Fin du surfaçage du corps à carrelet mobile	82
Figure 2.16 : Fin du surfaçage du corps à bec de canard	82
Figure 2.17 : Opération de solidification de la charrue à bec de canard.....	84
Figure 2.18 : Opération de solidification de la charrue à bec de canard.....	84
Figure 2.19 : Charrue à bec de canard solidifiée à une épaisseur de 7 mm	85
Figure 2.20 : Maillage du corps de charrue à carrelet.....	86
Figure 2.21 : Maillage du corps de charrue à bec de canard.....	87
Figure 2.22 : Propriétés des matériaux utilisés.....	90
Figure 2.23 : Application du choix du matériau pour les deux corps de charrue.....	90
Figure 2.24 : Fixation du point d'application de la force et des capteurs pour la charrue à carrelet mobile.....	91
Figure 2.25 : Variation du coefficient de sécurité de la contrainte de Von Mises max sous une force de 200 daN	93
Figure 2.26 : Variation du déplacement résultant sous une force de 200 daN.....	94
Figure 2.27 : Variation du coefficient de sécurité de la contrainte de Von Mises sous une force de 400 daN	94
Figure 2.28 : Variation du déplacement résultant sous une force de 400 daN	96
Figure 2.29 : Variation du coefficient de sécurité de la contrainte de Von Mises sous une force de 600 daN	97
Figure 2.30 : Variation de la contrainte de Von Mises sous une force de 600 daN.....	97
Figure 2.31 : Variation du déplacement résultant sous une force de 600 daN.....	97
Figure 2.32 : Variation du coefficient de sécurité de la contrainte de Von Mises max sous une force de 200 daN	98
Figure 2.33 : Variation du déplacement résultant sous une force de 200 daN.....	99
Figure 2.34 : Variation du coefficient de sécurité de la contrainte de Von Mises sous une force de 400 daN	100
Figure 2.35 : Variation du déplacement résultant sous une force de 400 daN.....	101
Figure 2.36 : Variation du coefficient de sécurité de la contrainte de Von Mises sous une force de 600 daN	101
Figure 2.37 : Variation de la contrainte de Von Mises sous une force de 600 daN.....	102
Figure 2.38 : Variation du déplacement résultant sous une force de 600 daN	102

Chapitre 3

<i>Figure 3.1 : Diagramme ombrothermique de la campagne d'étude.....</i>	109
<i>Figure 3.2 : Variation de la teneur en eau du sol pour les trois chaînes d'outils.....</i>	111
<i>Figure 3.3 : Variation de la porosité du sol avant et après labour pour les différentes chaînes</i>	113
<i>Figure 3.4 : Variation de la résistance pénétrométrique du sol avant et après le labour pour les trois chaînes d'outils.....</i>	114

Liste des tableaux

<i>Tableau 1.1 : Différences du taux de MO en surface (%) selon les pratiques, classées par ancienneté</i>	40
<i>Tableau 2.1 : Caractéristiques constructives des deux corps de charrue étudiés.....</i>	61
<i>Tableau 2.2 : Résultats sous 200 daN.....</i>	102
<i>Tableau 2.3 : Résultats sous 400 daN.....</i>	103
<i>Tableau 2.4 : Résultats sous 600 daN.....</i>	103

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'histoire du travail du sol remonte aux premières formes d'agriculture sédentaire, il y a environ 10 000 ans, lorsque les premières civilisations ont commencé à développer des techniques permettant d'enfouir et de recouvrir les graines. Ces pratiques se sont progressivement perfectionnées au cours des siècles, conduisant à l'apparition des premiers instruments de labour. La « charrue romaine », notamment mentionnée par Virgile aux environs du début de notre ère, constitue l'une des premières formes élaborées de cet outil. Plus tard, les principes de la charrue moderne ont été conceptualisés aux États-Unis par Thomas Jefferson en 1784, avant qu'un premier brevet ne soit déposé par Charles Newbold en 1796. L'amélioration progressive de sa conception et son adoption croissante ont ensuite contribué à faire de la charrue un outil fondamental de l'agriculture moderne (Lal et al., 2007).

À l'heure actuelle, le labour réalisé à l'aide de la charrue à versoirs demeure l'une des techniques de travail primaire du sol les plus utilisées à travers le monde (Pal et al., 2018 ; Bentahar et al., 2019 ; Shrestha et al., 2018). Cette opération joue un rôle important dans la préparation du lit de semences, l'enfouissement des résidus végétaux et la maîtrise des adventices. Elle peut également contribuer, lorsqu'elle est réalisée dans des conditions appropriées, à modifier favorablement certaines propriétés physiques du sol et à faciliter l'installation des cultures (Parlawar et al., 2017 ; Yachi et al., 2021).

Toutefois, la préparation du sol, qui constitue une étape déterminante dans la mise en place d'une culture, reste une opération complexe. Son efficacité dépend fortement des conditions climatiques, de la période d'intervention ainsi que de l'état physique du sol. Celui-ci peut présenter une forte variabilité spatiale, non seulement entre différentes parcelles, mais également à l'intérieur d'une même parcelle (Amara, 2007). Dans ce contexte, le choix de l'outil de travail du sol ne peut être effectué de manière systématique ; il doit au contraire reposer sur une démarche raisonnée prenant en considération plusieurs paramètres.

Parmi les principaux critères qui orientent ce choix figurent les exigences agronomiques de la culture à planter, la période d'intervention, elle-même largement conditionnée par les facteurs climatiques, ainsi que les conditions de travail liées à l'état du sol et aux performances des moyens mécaniques disponibles. Une bonne adéquation entre ces différents

paramètres permet d'améliorer la qualité du travail réalisé tout en limitant les dépenses énergétiques et les effets défavorables sur le sol. (Lal, 1980 ; Unger, 1984 ; FAO, 1993).

La consommation d'énergie constitue en effet un autre aspect essentiel à considérer dans les opérations de préparation du sol. Selon Amara (2014), celles-ci peuvent représenter plus de 60 % de l'énergie totale mobilisée pour la production d'une culture. Parmi ces opérations, le labour constitue généralement l'intervention la plus exigeante en matière d'énergie et de temps. La charrue à socs, qui reste l'un des instruments de labour les plus répandus, figure ainsi parmi les outils agricoles les plus consommateurs d'énergie de traction (Pal et al., 2018 ; Bentahar et al., 2019 ; Shrestha et al., 2020).

Dans ces conditions, l'amélioration des performances du labour repose non seulement sur une adaptation judicieuse des paramètres opératoires, tels que la profondeur et la vitesse de travail, mais également sur une conception appropriée des pièces travaillantes. La géométrie de la surface active du corps de charrue constitue à cet égard un paramètre déterminant, puisqu'elle conditionne les mécanismes de découpe, de soulèvement, de déplacement et de retournement de la bande de terre. Les caractéristiques géométriques du soc et du versoir influencent ainsi directement la qualité du travail du sol, les efforts de traction développés au cours du labour et, par conséquent, les besoins énergétiques de l'opération (Godwin et al., 2007 ; Ibrahmi et al., 2015). L'optimisation de ces paramètres géométriques peut donc contribuer à réduire la résistance à la traction tout en maintenant une qualité satisfaisante de fragmentation et d'inversion du sol (Sahu et Raheman, 2001 ; Ibrahmi et al., 2015).

L'étude de la géométrie et du comportement des pièces travaillantes des outils aratoires a fait l'objet de plusieurs recherches. Faure (1968) s'est notamment intéressé à l'action du versoir sur le sol en étudiant la cinématique de la bande de terre lors de son déplacement sur la surface active du corps de charrue. Ses travaux ont permis de mieux comprendre le mouvement du sol au contact du versoir, même si la détermination de la forme géométrique de celui-ci a été abordée principalement sous un angle théorique.

Les travaux de Dalleine (1962, 1964) ont, quant à eux, porté essentiellement sur les critères qualitatifs du labour. Cet auteur a proposé une classification des corps de charrue à socs reposant sur l'analyse de leur géométrie selon trois plans d'observation : la vue de face, la vue de profil et la vue de dessus. Cette approche a constitué une contribution importante à la

caractérisation des différentes formes de corps de charrue et à la compréhension de leur influence sur la qualité du travail réalisé.

Parallèlement, plusieurs recherches se sont intéressées aux performances énergétiques des outils de travail du sol. Néanmoins, une grande partie de ces études a été réalisée sur des pièces de géométrie relativement simple. Les corps de charrue à socs présentent, au contraire, des surfaces actives complexes, généralement non développables et caractérisées par des variations importantes de courbure. Cette complexité rend difficile l'analyse détaillée des interactions entre l'outil et le sol ainsi que la compréhension de la répartition des contraintes mécaniques auxquelles les pièces sont soumises. De ce fait, les travaux consacrés à l'optimisation mécanique et géométrique de ces surfaces restent relativement limités.

Parmi les contributions consacrées à cette problématique, Amara (2011) a montré que l'optimisation des surfaces actives à l'aide de la méthode de Bézier permet d'obtenir des géométries susceptibles de réduire à la fois la quantité de matière nécessaire à la fabrication et la surface sur laquelle s'exercent les pressions du sol. Cette optimisation peut ainsi conduire à une diminution significative de l'effort de traction requis lors du labour. L'étude des courbures moyennes à l'aide du modèle de Gauss a également mis en évidence des différences importantes entre les surfaces optimisées et les surfaces conventionnelles, suggérant que la géométrie du corps de charrue joue un rôle majeur dans le comportement du sol lors de son déplacement sur la surface active.

Le développement des outils de conception assistée par ordinateur et des logiciels de modélisation tridimensionnelle a profondément renouvelé les possibilités d'étude des outils agricoles. Ces technologies permettent aujourd'hui de reproduire avec une meilleure précision la géométrie des pièces travaillantes, de construire des modèles numériques tridimensionnels et d'étudier leur comportement mécanique dans des conditions proches de celles rencontrées en situation réelle. L'utilisation de la méthode des éléments finis constitue à cet égard une approche particulièrement intéressante pour analyser la répartition des contraintes, des déformations et des déplacements sur des surfaces de géométrie complexe.

Amara et Taib (2007) ont notamment utilisé la méthode des éléments finis afin d'analyser les contraintes appliquées aux surfaces actives projetées à l'aide du logiciel AutoCAD Mechanical. De leur côté, Saks et Heinloo (2001) ont utilisé le logiciel ANSYS 5.6 pour générer les maillages nécessaires à l'analyse numérique. Hoyou (1998) a également étudié,

par la méthode des éléments finis, des prototypes de socs de type SONACOME réalisés à différentes échelles, notamment 1/4, 1/3 et 1/2.

Ces différents travaux ont contribué à montrer l'intérêt de la simulation numérique pour l'étude des pièces travaillantes des outils aratoires. Néanmoins, plusieurs de ces analyses ont été réalisées à partir de représentations bidimensionnelles et reposaient principalement sur l'application d'efforts concentrés en certains points de la surface. Par ailleurs, les maillages utilisés étaient généralement relativement grossiers. Ces simplifications peuvent limiter la précision de la représentation des contraintes réelles, particulièrement dans le cas de surfaces tridimensionnelles complexes telles que celles des corps de charrue à socs.

L'évolution actuelle des logiciels de conception, de maillage et de simulation numérique offre désormais la possibilité de dépasser certaines de ces limites. La représentation tridimensionnelle des surfaces actives, associée à des maillages plus fins et à une description plus réaliste des sollicitations mécaniques, permet d'analyser avec davantage de précision le comportement des corps de charrue. Une telle approche constitue également un outil pertinent pour identifier les zones de concentration des contraintes et orienter la conception vers des formes mieux adaptées aux exigences mécaniques et énergétiques du labour.

Parallèlement à l'analyse mécanique de l'outil, la compréhension du comportement du sol sous l'action des pièces travaillantes constitue un autre élément essentiel. En effet, l'interaction sol-outil ne peut être appréhendée uniquement à partir des contraintes subies par l'équipement. Le passage successif des différentes pièces aratoires modifie également l'état structural du sol, sa résistance mécanique, sa porosité, sa fragmentation ainsi que certaines de ses propriétés physiques. La nature et l'intensité de ces modifications dépendent notamment de la forme des pièces travaillantes, de leur profondeur d'intervention, des conditions initiales du sol et des caractéristiques du travail effectué.

Dans ce contexte, l'étude comparative de différentes formes de socs peut contribuer à mieux comprendre leurs effets respectifs sur le comportement physico-mécanique du sol et à identifier les configurations permettant d'obtenir un compromis satisfaisant entre qualité du labour, réduction des sollicitations mécaniques et maîtrise de la consommation énergétique.

La présente thèse s'inscrit dans cette problématique et poursuit un **double objectif**.

Le premier objectif consiste à analyser, par la méthode des éléments finis, le comportement mécanique des surfaces actives de deux types de corps de charrue largement utilisés en Algérie : le corps à **carrelet mobile** et le corps à **bec de canard**. L'utilisation de cette approche numérique vise à caractériser la distribution des contraintes et des déformations sur l'ensemble de la surface active et à mieux comprendre le comportement mécanique de ces géométries complexes. Cette analyse doit également permettre d'identifier les zones les plus sollicitées et de fournir des éléments pouvant contribuer à l'optimisation de la conception de ces pièces.

Le second objectif porte sur l'étude du comportement du sol sous l'action des différentes pièces travaillantes constituant une chaîne classique de travail du sol. Il s'agit plus particulièrement d'évaluer l'effet des deux types de socs étudiés, à carrelet mobile et à bec de canard, sur l'évolution des propriétés physico-mécaniques du sol. Cette démarche vise ainsi à établir des relations entre la géométrie des pièces travaillantes, leur action mécanique et les modifications induites dans le sol au cours du travail.

Afin de répondre à ces objectifs, la thèse est organisée autour de deux grandes parties complémentaires.

La première partie, consacrée à la synthèse bibliographique, traite principalement :

- de la place et de l'importance des techniques de travail du sol, avec une attention particulière portée au labour ;
- des principes de fonctionnement de la charrue à socs et des caractéristiques de ses principales pièces travaillantes ;
- de l'impact des pièces travaillantes sur le comportement physico-mécanique du sol ;
- des méthodes de caractérisation géométrique et de projection des corps de charrue ;
- des approches de modélisation et d'analyse mécanique appliquées aux outils aratoires.

La seconde partie, à caractère expérimental et numérique, porte sur :

- la caractérisation et l'analyse du comportement mécanique des surfaces actives des pièces travaillantes de la charrue à socs à l'aide de la méthode des éléments finis, dans une perspective d'optimisation ;
- l'étude comparative du comportement des deux types de corps de charrue retenus ;

- l'analyse du comportement physico-mécanique du sol sous l'action des différentes pièces travaillantes des outils aratoires ;
- l'évaluation de l'influence des socs à carrelet mobile et à bec de canard sur les propriétés du sol après leur passage.

Cette approche combinant caractérisation géométrique, simulation numérique et expérimentation sur le sol doit ainsi permettre de mieux comprendre les mécanismes intervenant dans l'interaction sol-outil et de contribuer à l'amélioration des performances mécaniques, énergétiques et agronomiques des corps de charrue utilisés dans les conditions agricoles algériennes.



Chapitre 1. Revue bibliographique

1.1 Place et importance des techniques de travail du sol

1.1.1 Importance du travail du sol

Le travail du sol, qui regroupe l'ensemble des interventions mécaniques visant à fragmenter la terre, occupe une place particulière dans les systèmes de culture. Par rapport aux autres pratiques agricoles, son influence sur les propriétés des sols cultivés est bien plus étendue. Son premier effet réside dans l'altération de la structure du sol : les actions des outils (fragmentation et déplacement) et des engins agricoles (tassement) modifient rapidement, parfois de manière significative, cette structure. Or, celle-ci conditionne de nombreux processus internes au sol, tels que la circulation de l'eau et de l'air, l'intensité et la nature des réactions biogéochimiques, l'activité de la faune et de la flore du sol, ainsi que la croissance des adventices. Ainsi, les propriétés organiques, chimiques, biologiques et hydriques des couches superficielles sont indirectement influencées par le travail du sol et le passage des machines. À ces effets indirects s'ajoutent des impacts directs sur ces mêmes composantes du sol. Le mode de travail du sol – qu'il s'agisse d'un labour profond ou superficiel, réalisé avec des outils animés ou traînés – détermine notamment la répartition verticale des graines d'adventices, des éléments minéraux peu mobiles, des résidus de culture et des amendements. De plus, le passage des outils modifie directement les populations et la diversité des organismes vivant dans ou sur le sol. Par ailleurs, la méthode de travail du sol, en particulier l'usage du labour, influe sur la présence d'un mulch, cette couverture de surface constituée de résidus végétaux ou de plantes vivantes. Le mulch joue un rôle clé dans la lutte contre l'érosion, le contrôle des adventices, la régulation des flux d'eau et de chaleur, ainsi que la préservation de la faune du sol. (Roger-Estrade *et al*, 2014)

Dans les systèmes agricoles visant à optimiser le rendement en exploitant au maximum la photosynthèse, l'usage accru des intrants de synthèse a progressivement réduit le rôle du travail du sol à une fonction corrective, permettant d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des ressources (eau, éléments minéraux) et de créer des conditions favorables à la germination et à la levée des cultures. En revanche, dans l'agriculture biologique ou dans les zones sujettes à l'érosion, le travail du sol conserve une importance capitale. Il constitue un levier essentiel pour la gestion des adventices et la maîtrise du ruissellement.

Quel que soit le système agricole, le travail du sol a un impact significatif sur la rentabilité des exploitations. Les opérations, en particulier celles impliquant un travail en profondeur,

nécessitent une consommation importante d'énergie fossile et entraînent des coûts élevés de mécanisation. De plus, ces interventions influencent l'organisation du travail au cours de l'année, ce qui pousse parfois les agriculteurs à limiter les travaux profonds afin de mieux répartir les périodes de forte activité.

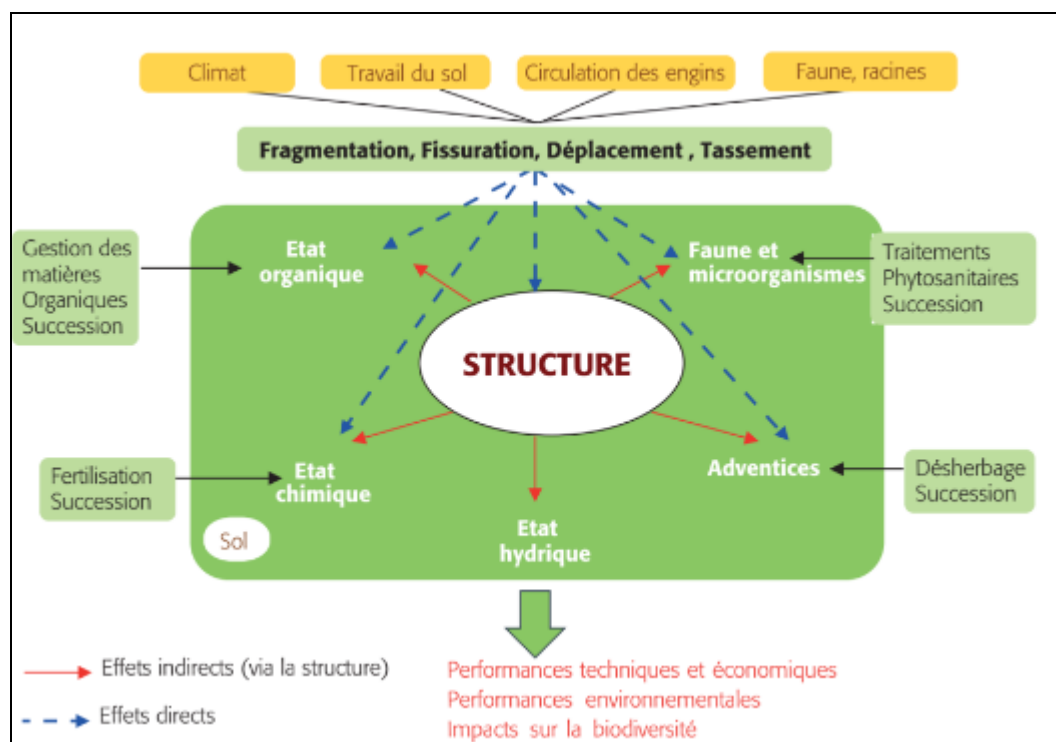


Figure 1.1 : Effets directs et indirects des action mécanique liées au travail du sol

Source : (Roger-Estrade et al, 2014)

1.1.2 Objectifs des opérations de travail du sol

- Préparer une structure de sol adaptée à la mise en place d'un lit de semences ou d'un lit racinaire, approprié à différents types de cultures. (Une structure granulaire est souhaitable pour permettre une infiltration rapide et une bonne rétention des précipitations, assurer une capacité et un échange d'air adéquats dans le sol, et minimiser la résistance à la pénétration des racines. Un bon lit de semences est généralement caractérisé par des particules fines et une fermeté optimale autour de la graine.)
- Contrôler les mauvaises herbes ou éliminer les plantes indésirables (éclaircissage).
- Gérer les résidus végétaux. (Le mélange des résidus est souhaitable pour améliorer la structure du sol et favoriser la décomposition, tandis que leur maintien en surface permet de réduire l'érosion.)

- Minimiser l'érosion du sol. (Grâce au travail du sol en courbes de niveau, au listage et au positionnement adéquat des résidus.)
- Mettre en place des configurations spécifiques de surface pour les opérations de semis, d'irrigation, de drainage et de récolte.
- Incorporer et mélanger les engrais, les pesticides et les amendements dans le sol.

1.1.2.1 Classification du travail du sol

Les opérations de travail du sol destinées à la préparation du lit de semences sont classées en deux catégories :

- **Le travail du sol primaire**
- **Le travail du sol secondaire**

✓ Travail du sol primaire

Le travail du sol primaire est la première opération majeure qui consiste à labourer profondément le sol pour réduire sa résistance, enfouir les matières végétales et réorganiser les agrégats.

Les objectifs du travail du sol primaire sont :

- a. Réduire la résistance du sol.
- b. Réorganiser les agrégats du sol.
- c. Enfouir les résidus végétaux et les mauvaises herbes.
- d. Éliminer les insectes et les ravageurs.

Les outils utilisés pour le travail du sol primaire sont appelés "outils de travail du sol primaire". Ils incluent des équipements tractés par des animaux tels que les charrues traditionnelles et les charrues à versoirs, ainsi que des équipements tractés par tracteurs tels que les charrues à versoirs, les charrues à disques, les herse lourdes à disques, les sous-soleuses et les charrues à ciseau.

✓ Travail du sol secondaire

Le travail du sol secondaire consiste en des opérations plus légères et plus fines, réalisées après le travail primaire, afin d'améliorer la structure du sol et de préparer une surface adéquate pour le semis et la plantation.

Les objectifs du travail du sol secondaire sont :

- Casser les grosses mottes et niveler la surface du sol pour obtenir un lit de semences uniforme.
- Détruire les herbes et les mauvaises herbes présentes sur le terrain.
- Incorporer les résidus de culture dans la couche superficielle du sol.

Les outils de travail du sol secondaire comprennent différents types de herbes, cultivateurs, houes, ...ect.

1.1.2.2 Description des Systèmes du travail du sol

Un système de travail du sol est une succession d'opérations visant à manipuler le sol en vue d'installer une culture. Ces opérations comprennent le travail du sol, le semis, la fertilisation, l'application de pesticides, la récolte et le broyage des résidus. Le mode d'exécution de ces opérations influence les propriétés physiques et chimiques du sol, et par conséquent, la croissance des plantes.

On distingue deux types de systèmes de travail du sol :

- **Les systèmes de conservation**, qui comprend les systèmes de semis direct, de travail en billons et de travail en mulch.
- **Les systèmes conventionnelles**, qui incluent le travail du sol réduit et le travail conventionnel.

Les systèmes de conservation (au moins 30 % de résidus de culture après le semis)

Tout système de travail du sol qui maintient au moins 30 % de résidus végétaux en surface après le semis, afin de réduire l'érosion hydrique, ou qui conserve au minimum 1 120 kg/ha de résidus de céréales sur la surface pendant la période critique d'érosion éolienne, est qualifié de "travail du sol de conservation".

Ces systèmes sont divisés en trois catégories :

- **Semis direct (no-till)** : Le sol reste intact entre la récolte et le semis, à l'exception des apports d'engrais. Le semis se fait dans un sillon étroit à l'aide de disques ouvreurs, de coutres ou de dents. Le désherbage est principalement assuré par des herbicides, et le travail mécanique est limité aux situations d'urgence.

- **Travail en billons (ridge-till)** : Le sol est laissé intact entre la récolte et le semis, sauf pour les apports d'engrais. Le semis est réalisé sur des billons préformés, les résidus étant maintenus entre les billons. Le désherbage se fait par herbicides et/ou par des interventions mécaniques, les billons étant recréés au cours de la culture.
- **Travail en mulch (mulch-till)** : Le sol est travaillé avant le semis à l'aide d'outils tels que le chisel ou cultivateurs légers. Le désherbage est réalisé par herbicides et/ou travail mécanique. Le mulch-till regroupe toutes les pratiques de travail du sol de conservation autres que le semis direct et le travail en billons. Il comprend notamment le travail en bandes (strip-till) et le travail en zones (zone-till).

Les systèmes conventionnelles

- **Travail réduit (reduced-till)** : Laisse entre 15 et 30 % de résidus de culture en surface ou 560 à 1 120 kg/ha de résidus végétaux pendant la période critique d'érosion éolienne.
- **Travail conventionnel (conventional-till)** : Laisse moins de 15 % de résidus de culture en surface ou moins de 560 kg/ha de résidus végétaux. Ce système implique généralement un labour intensif.

1.1.2.3 L'effet du travail du sol sur la compaction du sol

La compaction du sol, généralement caractérisée par la densité apparente et la résistance à la pénétration, est l'une des propriétés physiques les plus importantes du sol. Elle modifie l'architecture des pores du sol et est connue pour réduire la porosité, l'aération, l'infiltration de l'eau et la conductivité hydraulique du sol, ce qui limite la croissance des racines et l'absorption de l'eau par celles-ci (Shengping Li, 2020).

De plus, ces modifications peuvent entraîner une diminution des rendements des cultures et une augmentation des risques de perte d'eau et de nutriments du sol, des émissions de gaz à effet de serre et de la pollution des ressources en eau (Shengping Li, 2020).

Les résultats concernant l'effet de l'agriculture de conservation (AC) sur la compaction du sol sont contradictoires. Certaines études indiquent que le travail réduit du sol et le semis direct augmentent la compaction du sol (densité apparente et résistance à la pénétration) par rapport au travail conventionnel du sol. En revanche, d'autres études montrent que l'AC n'a pas d'effet significatif sur la compaction du sol (Shengping Li, 2020).

1.1.2.4 Effet du travail du sol sur la disponibilité en eau du sol

La disponibilité en eau du sol est l'un des facteurs les plus importants influençant la croissance des cultures en particulier pour les cultures pluviales dans les zones semi-arides et arides où le manque d'eau constitue la principale limitation à la croissance des cultures.

Il existe différentes méthodes pour déterminer l'eau disponible dans le sol. L'approche la plus courante est celle de l'eau facilement disponible pour les plantes, qui est utilisée depuis de nombreuses années pour décrire l'eau du sol située entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent. Cependant, cette approche simple ne prend en compte que le potentiel hydrique du sol et ne considère pas d'autres propriétés physiques du sol qui influencent l'absorption de l'eau par les racines des cultures. (Shengping Li, 2020).

De plus, étant donné que la croissance des cultures résulte d'interactions complexes entre les racines, le sol et l'eau, les propriétés physiques individuelles du sol ne suffisent pas à expliquer pleinement l'environnement physique optimal du sol ni à offrir une compréhension claire de la relation sol-culture. (Shengping Li, 2020).

1.1.3 Objectifs des labours et leurs classifications

1.1.3.1 Définition du labour

Le labour constitue une séquence très importante dans la série des travaux effectués. Il consiste à découper successivement toute la terre à travailler en **bandes** qui sont retournées plus ou moins complètement, de façon à ce que leur partie inférieure soit ramenées à la surface, ameublie et soumise ainsi à l'action des agents atmosphériques et des outils de reprise: par la même opération, la végétation de surface est enterrée.

L'exécution du labour mobilise une part non négligeable du temps et des moyens de traction dont dispose l'agriculteur ; il pose avec acuité le problème de l'adhérence du tracteur à roues.

La qualité du labour dépend des caractéristiques du sol, de son état et des versoirs utilisés; elle a une influence directe sur la facilité d'exécution des travaux de préparation superficielle du sol qui font suite au labour et une certaine influence sur le rendement des récoltes ultérieures.

1.1.3.2 Le principe du labour

Le principe du labour est de découper une bande de terre de section rectangulaire verticalement par un coutre et horizontalement par le soc, de la soulever par le soc et la partie antérieure du versoir. Le long de la partie postérieure du versoir, elle subit une rotation et un déport latéral qui l'amène en appui sur la bande précédemment retournée.

La rasette découpe en surface un petit volume de sol qui, projeté en fond de raie avant le passage du corps principal, se retrouve sous la bande retournée par le versoir. Suivant son type et sa position, la rasette permet ainsi d'enfouir plus ou moins profondément les résidus organiques et les mauvaises herbes.

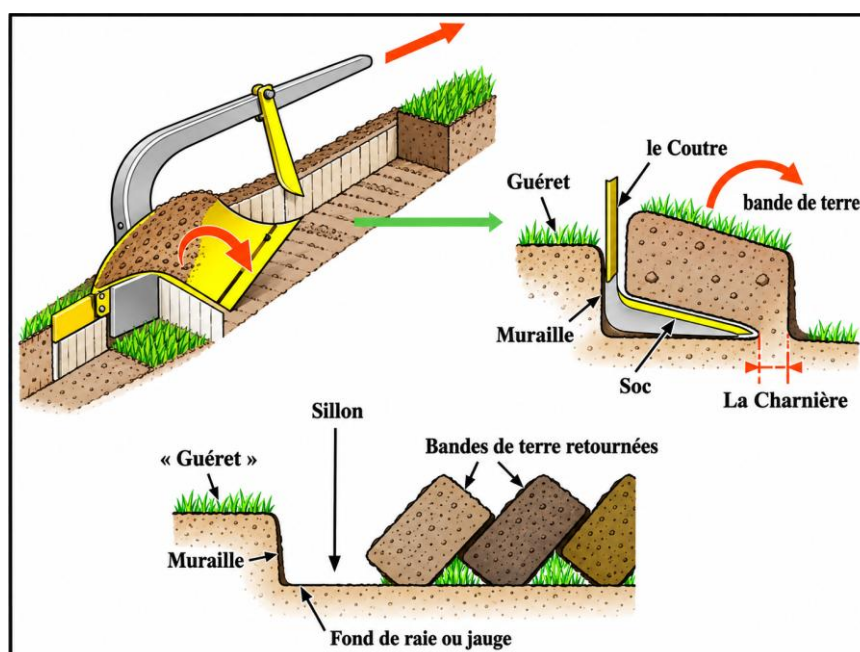


Figure 1.2 : le principe de labour

Source : (Feddal, 2020)

1.1.4 Le matériel de labour

1.1.4.1 La charrue à socs et versoirs

La charrue à versoir, également appelée charrue à socs, a été initialement développée en Europe du Nord et de l'Ouest, dans des régions au climat frais et humide. Son principal atout réside dans sa capacité à enfouir les adventices, contribuant ainsi à leur contrôle efficace. De plus, elle permet un travail du sol plus intensif, caractérisé par l'ouverture de sillons et un retournement marqué de la terre.

Les premiers modèles de charrues à socs, conçus pour la traction animale, étaient largement inspirés de l'araire. À l'origine, l'âge, les mancherons et une partie du corps de charrue étaient en bois, tandis que seuls le soc et éventuellement certaines autres pièces étaient fabriqués en fer. Le retournement du sol et son déplacement latéral exerçant une pression sur les parois de la charrue, l'ajout d'un contre-sep, parfois équipé d'un talon, permettait de stabiliser la profondeur de labour. Le point d'attelage situé à l'avant de l'âge devait être ajusté afin d'optimiser la traction.

Avec le temps, l'évolution des techniques a conduit à la fabrication de charrues entièrement en fer ou en acier, rendant ces outils plus robustes et largement utilisés dans les régions tempérées occidentales. Contrairement aux premiers modèles entièrement équilibrés, ces charrues modernes sont désormais soutenues à l'avant par un patin ou, plus fréquemment, par une roue de guéret. L'innovation a également conduit à l'introduction de coutres et au développement de corps réversibles.

Aujourd'hui, de nombreux modèles de charrues à socs sont adaptés aux tracteurs, bien que seuls les principaux types soient généralement mentionnés.

- **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.



Figure 1.3 : Charrue à soc réversible à six corps de charrue

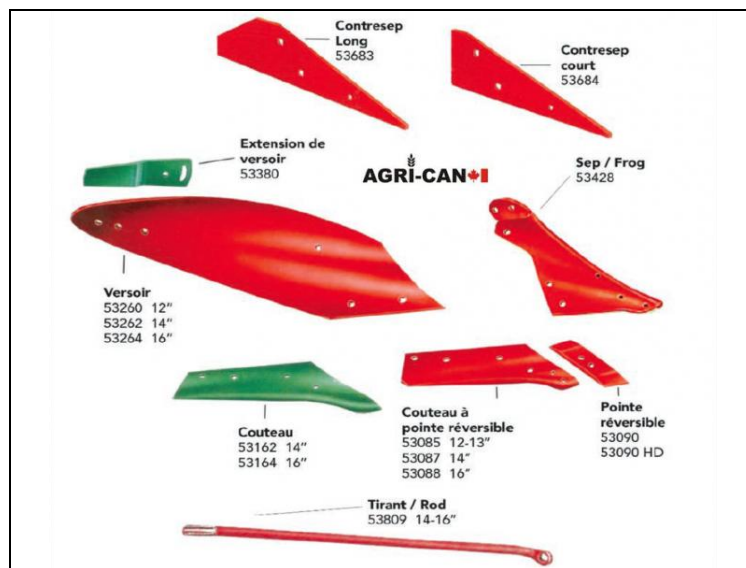


Figure 1.4 : Vue éclatée d'une Charrue à soc KVERNELAND

Source : (Kverneland Base, 2020)

1.1.4.1.1 Description détaillée de la charrue à soc

Le corps de charrue est l'ensemble des pièces principales d'une charrue, assurant la découpe, le soulèvement, le retournement et l'émiettement d'une bande de terre.

- **Corps déchiquetant** : Ce type de corps possède une surface de travail cylindrique, générée par une droite plus ou moins horizontale (génératrice) se déplaçant le long d'une directrice en forme de cercle ou d'arc de parabole.

- **Corps universel** : Il présente une surface de travail similaire à celle d'un cylindre, mais une partie de cette surface est engendrée par une courbe spécifique (génératrice).
- **Corps renversant** : Sa surface de travail est créée par une génératrice, qui pivote dans le plan vertical le long d'une directrice, permettant ainsi un retournement efficace de la terre.

Les composants du corps de charrue

- **Étançon** : Élément reliant le corps de charrue à son bâti. Dans certains modèles, la haie à crochet du bâti remplit cette fonction.
- **Palette** : Support sur lequel sont fixés le soc, le versoir et le sep.
- **Soc** : Composant qui effectue la coupe de la bande de terre dans le plan horizontal. Il existe plusieurs types de socs : trapézoïdal, en bec de canard, à carret, en équerre, à pointe amovible, ou encore à pointe roulante.
- **Versoir** : Pièce responsable du retournement et de l'émiettement de la bande de terre. Ses principales parties sont :
 - *Étrave du versoir* : Partie avant, souvent amovible.
 - *Aile du versoir* : Partie arrière, qui peut également être amovible.
 - *Prolonge du versoir* : Élément additionnel ajustable, fixé à l'aile du versoir pour améliorer le retournement de la terre et son dépôt dans la raie.
- **Sep** : Composant permettant de transmettre la charge latérale du corps à la muraille de la raie. Ses variantes incluent :
 - *Talon du sep* : Partie fixée à l'arrière du sep, transmettant la charge verticale au fond de la raie.
 - *Contre-sep à roulette* : Élément rotatif qui remplace le sep traditionnel pour transmettre la charge latérale.

Accessoires et organes de travail auxiliaires

- **Défecteur** : Pièce auxiliaire, fixée au-dessus de l'étrave du versoir, qui dirige un coin de la partie supérieure de la bande de terre vers le fond de la raie.
- **Rasette (ou avant-corps)** : Outil supplémentaire placé devant le corps de charrue, permettant de découper et projeter une partie de la couche supérieure de la bande de terre dans la raie.

- **Coutres** : Outils destinés à découper la bande de terre dans le plan vertical, disponibles sous plusieurs formes :
 - *Coutre circulaire* : Disque plat et rotatif placé à l'avant du corps.
 - *Coutre droit* : Lame plate verticale positionnée à l'avant du corps.
 - *Coutre-aileron* : Lame fixée sur le bord du soc ou du versoir, assurant une coupe verticale efficace.

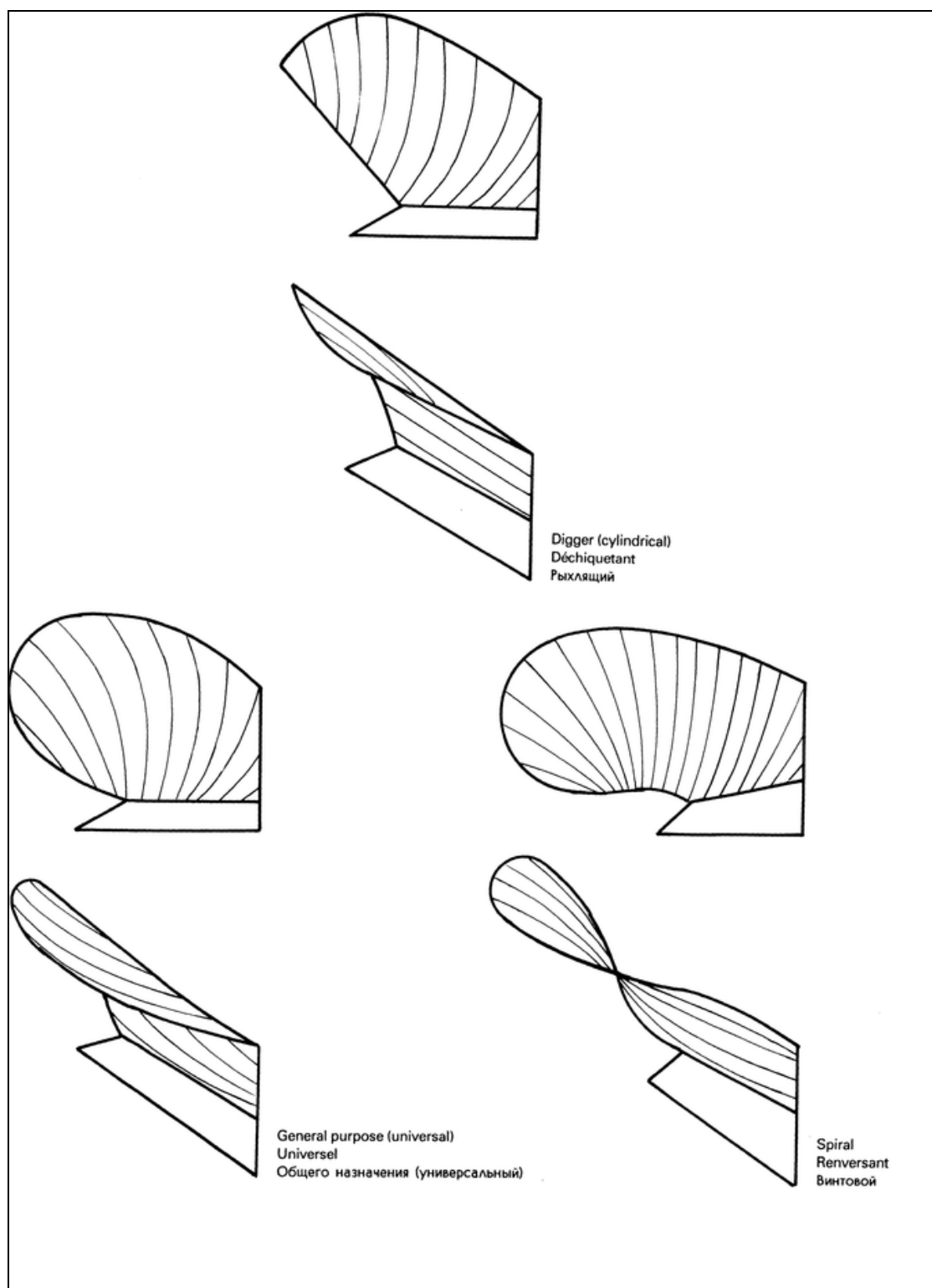


Figure 1.5 : Types de corps de charrue

(Source : ISO, 2020)

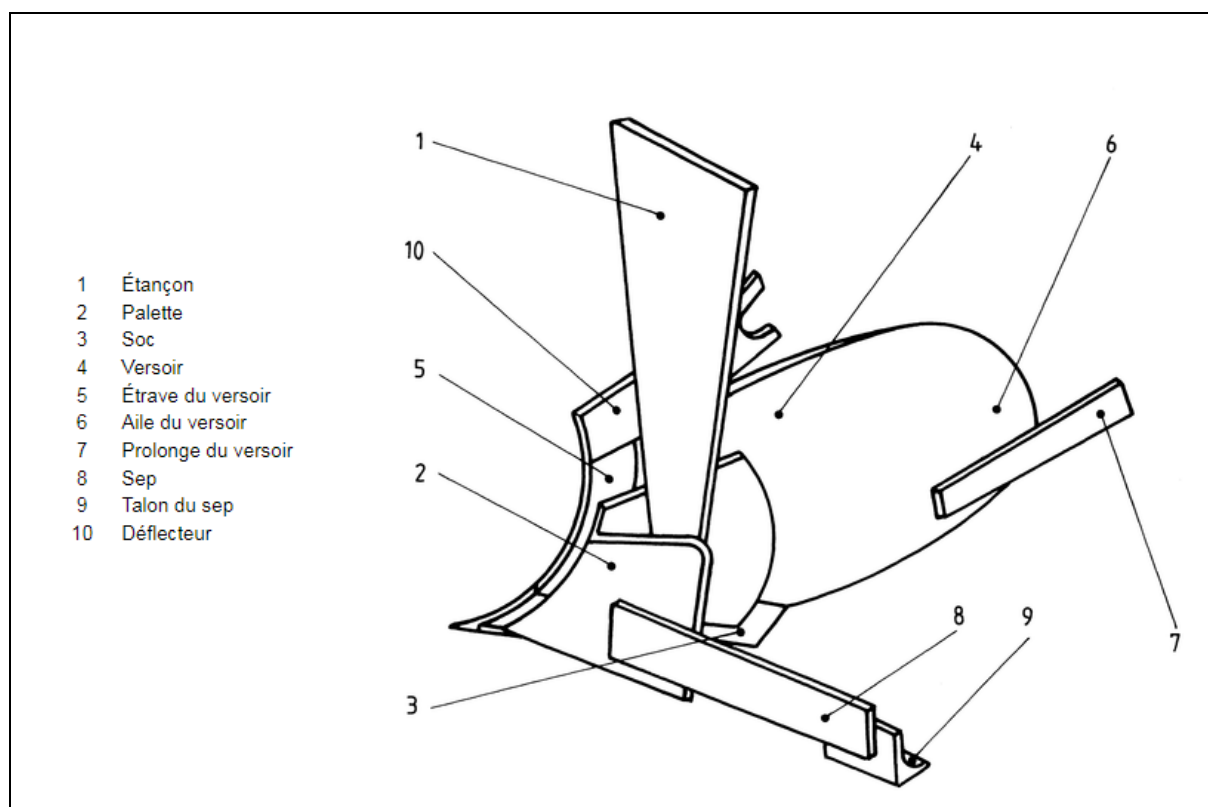


Figure 1.6 : Détail d'un corps de charrue

(Source : ISO, 2020)

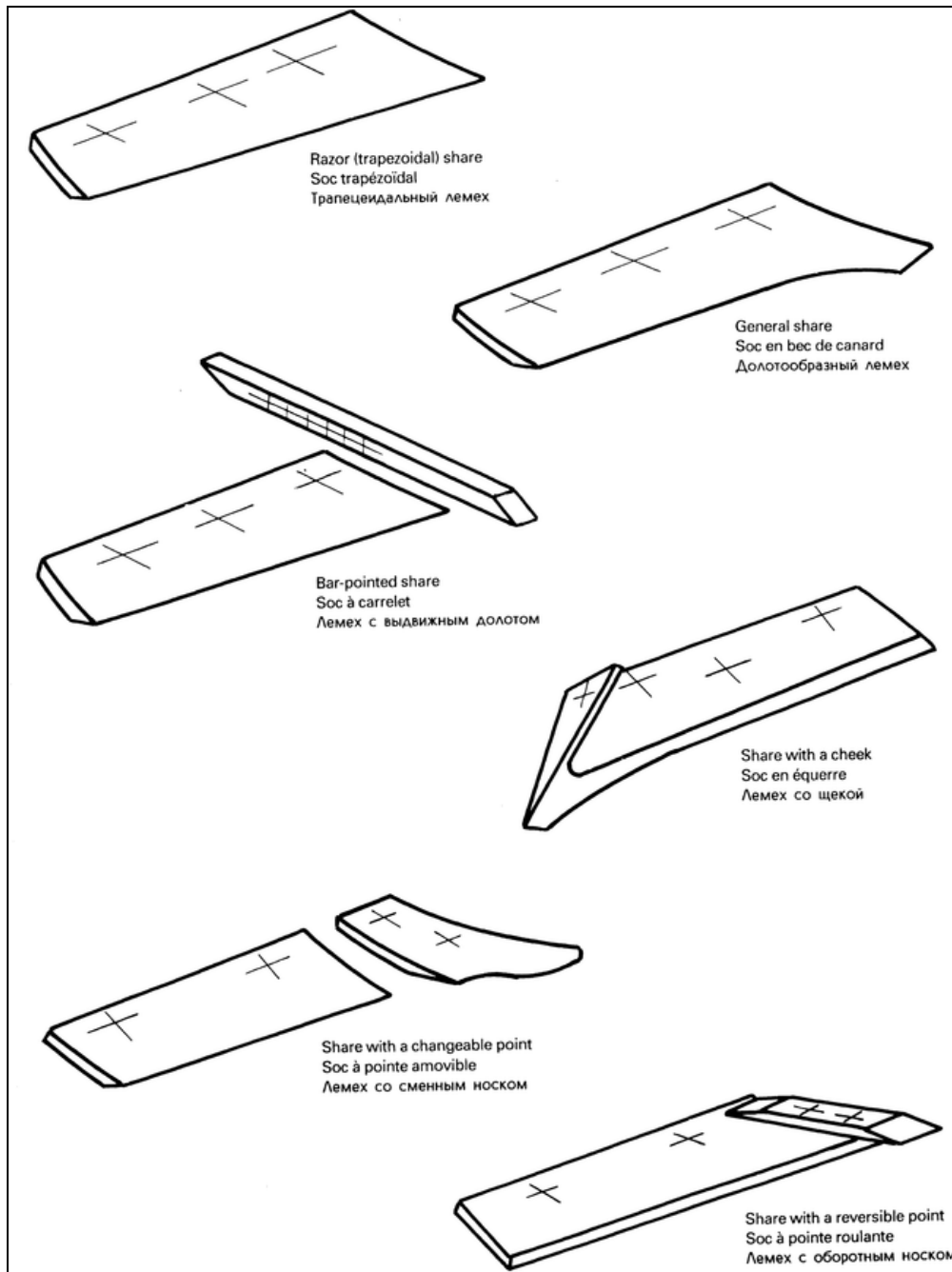


Figure 1.7 : Types de socs

(Source : ISO, 2020)

Il existe plusieurs systèmes de liaison entre la charrue et le tracteur, chacun présentant des caractéristiques spécifiques en termes d'utilisation et de performance.

1.1.4.1.1 Les charrues traînées

Ces charrues sont équipées de roues permettant de contrôler la profondeur de travail et sont attelées à la barre de traction du tracteur, sans être reliées au relevage hydraulique. Elles exercent donc une faible charge supplémentaire sur l'essieu arrière du tracteur, ce qui limite leur impact sur la répartition des masses. Leur principal avantage réside dans la facilité et la rapidité d'attelage et de dételage. Cependant, leur transport sur route est contraignant, car elles ne peuvent être déplacées qu'à faible vitesse. Cette limitation peut poser problème, notamment sur de petites parcelles ou en zones irriguées, où l'espace pour les manœuvres est restreint. Aujourd'hui, ces charrues ne sont plus fabriquées, car les tracteurs modernes sont tous équipés d'un relevage hydraulique et offrent une puissance accrue.

1.1.4.1.2 Les charrues portées

Ces charrues, généralement constituées de plusieurs corps, sont fixées directement au système d'attelage trois points du tracteur. Elles peuvent être équipées de systèmes de liaison rapide pour faciliter leur attelage. Contrairement aux charrues traînées, elles ne nécessitent pas de roues de guéret, car la profondeur de travail est contrôlée directement par le relevage hydraulique.

L'un des principaux avantages de ce système est le transfert des forces vers l'essieu arrière du tracteur, ce qui réduit le patinage et améliore l'adhérence. Toutefois, le levage de la charrue exige une force équivalente à environ trois fois son poids, ce qui limite le nombre de corps pouvant être utilisés en fonction de la puissance du tracteur.

Enfin, plusieurs configurations de socs, de versoirs et d'éléments complémentaires comme les coutres sont disponibles afin de s'adapter aux conditions spécifiques du sol, aux pentes et aux besoins des cultures.

1.1.4.2 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.

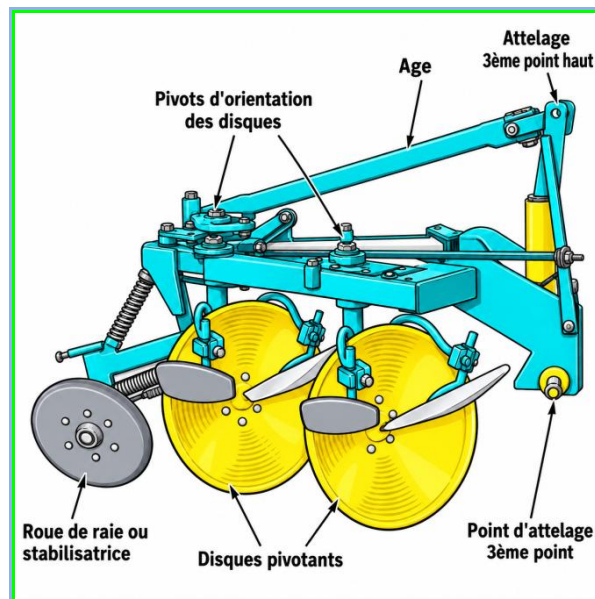


Figure 1.8 : Description d'une charrue à disque portée

1.1.5 Classification des labours

1.1.5.1 Les différents types de labour

Le labour en planche : Il s'effectue en versant la terre toujours du même côté par rapport au sens d'avancement en adossant ou en refendant avec une charrue simple.

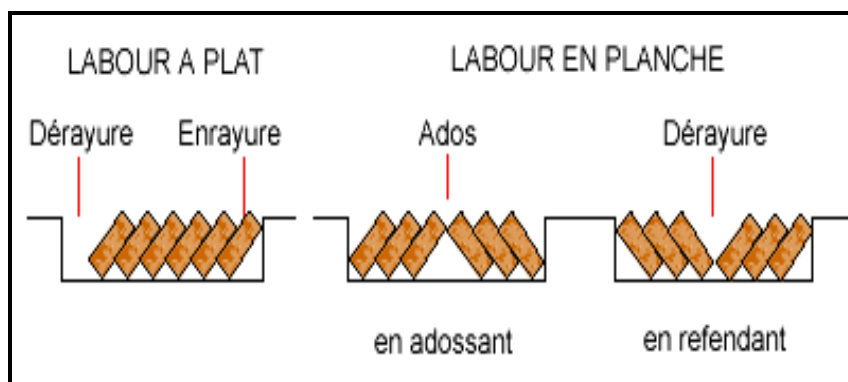


Figure 1.9 : Les types de labour

Le labour à plat: la charrue réversible verse la terre à droite puis à gauche par rapport à l'avancement, de manière à labourer sans discontinuité, du bord d'un champ à l'autre, en donnant au labour un aspect plat, d'un seul tenant et sans dérayures, sauf en fin de travail.

1.1.6 Place et importance des labours dans l'itinéraire technique

Le travail du sol occupe une place essentielle dans l'itinéraire technique des cultures, car il modifie l'ensemble des propriétés du sol, qu'elles soient physiques, organiques, chimiques ou biologiques. Ces transformations influencent directement la croissance des plantes ainsi que les processus de transfert de composés vers l'hydrosphère et l'atmosphère. Le choix des outils et des périodes d'intervention revêt donc une importance stratégique, non seulement pour optimiser la production végétale, mais aussi pour réduire l'impact environnemental des pratiques agricoles.

Parmi les différentes techniques de travail du sol, le labour se distingue par son action sur un volume important de terre et l'inversion des horizons, ce qui en fait l'une des méthodes les plus influentes sur les différentes composantes du sol. Dans une perspective d'agriculture multi-performante, il est essentiel de mieux comprendre ces effets afin d'optimiser l'usage des intrants et de maîtriser les conséquences environnementales des pratiques culturales.

Dans le prochain chapitre, nous nous intéresserons aux études portant sur l'impact des techniques culturales sur les propriétés physico-mécaniques du sol.

1.2 Impact des pièces travaillantes de la charrue à soc sur le comportement physico-mécanique du sol

1.2.1 Mode d'action des pièces travaillantes de la charrue à soc et le profil obtenu

En raison de la géométrie complexe de sa surface active, la charrue à socs, appelée aussi charrue à versoirs, par son mode d'action, excelle dans les sols lourds et humides.

La bande de terre est découpée verticalement par le coutre et horizontalement par le soc, ce qui, en consistance semi plastique, entraîne un lissage important du soc en fond de raie. Elle est ensuite soulevée par le soc et la partie antérieure du versoir. Le long de la partie postérieure du versoir, elle subit une rotation et une translation latérale pour arriver en appui sur la bande précédente. Par ailleurs, on peut observer :

- Une adhérence de la terre le long du versoir responsable de bourrage et de mauvais retournement de la bande de labour à la consistance du sol semi plastique.
- Une retombée de terre en fond de raie si la profondeur est excessive par rapport à la hauteur du versoir.
- Un frottement le long du versoir responsable de la formation de terre fine à la consistance friable. A la consistance semi plastique, il produit des lissages, inconvénient principal des labours quand l'humidité du sol n'est pas respectée, c'est-à-dire à sa valeur, capacité au champ.

Les charrues récentes dont la largeur du sillon est réglable jusqu'à plus de 50 cm peuvent effectuer un labour beaucoup trop plat. Les débris végétaux sont alors emprisonnés au fond du sillon et se décomposent mal en raison du manque d'oxygène. Pour éviter ce problème, il faut que la largeur du sillon fasse tout au plus le double de la profondeur de travail. Autrement dit, une largeur de sillon égale ou inférieure à 40 cm doit correspondre à un labour de 20 cm de profondeur, de façon à obtenir un labour dressé mieux aéré. **(Amara, 1983).**

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 ainsi qu'une cohésion donnée, le corps de charrue, par sa forme, agit de différentes façons suivant trois phases successives qui sont respectivement :

- **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. **(Amara, 2007)**

- **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. **(Amara, 2007)**

- **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, bien répartis sur la profondeur 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. **(Amara, 2007)**

1.2.2 Profil obtenu

Les profils ci-dessous ne tiennent compte que de l'effet du type de versoir. Les profils varient beaucoup avec la consistance du sol et la vitesse d'avancement.

Les profils obtenus varient beaucoup selon le type du versoir. L'emploi du versoir universel se justifie par l'état du profil qu'il produit (terre fine en surface assurant une bonne levée, base motteuse favorisant l'infiltration de l'eau, l'aération et la croissance des racines).

VERSOIR HELICOÏDAL

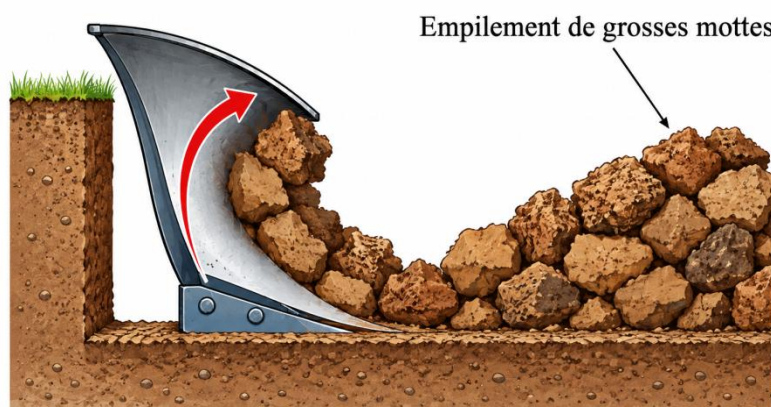


Figure 1.10 : profil obtenu pour le versoir hélicoïdal.

Source : Feddal (2011)

VERSOIR CYLINDRIQUE

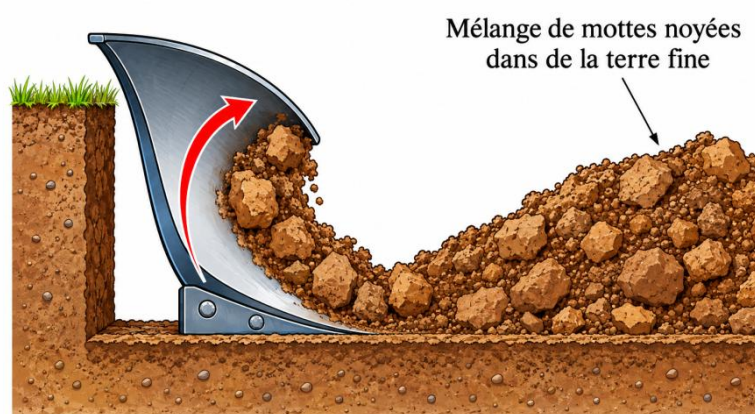


Figure 1.11 : profil obtenu pour le versoir cylindrique.

Source : Feddal (2011)

VERSOIR UNIVERSEL

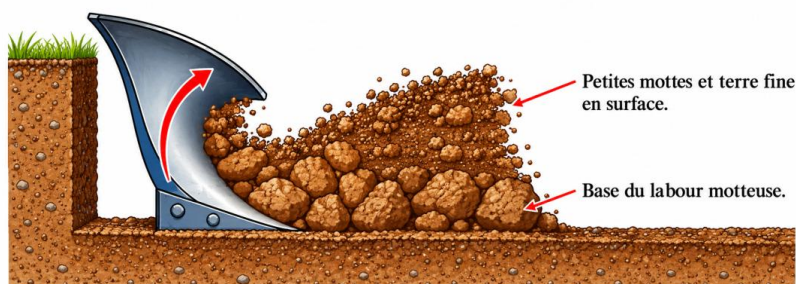


Figure 1.12 : profil obtenu pour le versoir universel.

Source : Feddal (2011)

Selon Rhoton et al. (2002), l'un des principaux inconvénients du labour réside dans la dilution de la matière organique sur toute l'épaisseur du sol travaillé. Cette dispersion entraîne une réduction de la teneur en matière organique (MO) en surface, ce qui peut affecter la fertilité et la structure du sol.

Comme mentionné précédemment, l'une des motivations majeures du non-labour a été d'augmenter la teneur en MO en limitant les perturbations du sol. De nombreuses études confirment que cette technique permet effectivement d'atteindre cet objectif (voir tableau ci-dessous). Cependant, cet effet n'est perceptible qu'à long terme (Tebrugge et During, 1999) et demeure réversible : un seul passage de charrue peut suffire à réduire considérablement le taux de matière organique accumulé.

Tableau 1.1 : Différences du taux de MO en surface (%) selon les pratiques (classées par ancienneté)

Référence	Période étudiée	Rotations	Texture	Conventionnel	TSL	SD
(Labreuche <i>et al.</i> , 2005)	35 ans	4 types (blé/maïs)	LA	2.0	2.7	3.1
(Mahboudi <i>et al.</i> , 1993)	28 ans	Maïs	LL	1.0	1.5	2.3
(Mahboudi <i>et al.</i> , 1993)	28 ans	Maïs	LL	0.9	1.2	2.7
(Arshad <i>et al.</i> , 1999)	28 ans	Orge	LL	3.3		4.4
(Arshad <i>et al.</i> , 1999)	15 ans	Orge	LS	2.2		2.4
(Rhoton <i>et al.</i> , 2002)	15 ans	Maïs	LL	1.9		3.7
(Tebrugge et During, 1999)	08 ans	Maïs/céréales	LA	0.7		1.1
Armand	05 ans	Maïs	LL	1.56		2.2

Source : **Rhoton et Al. (2002)**

1.2.3 Comportement du sol sous l'action des outils aratoires

Le travail du sol consiste en la manipulation des matériaux qui le composent, et ces derniers déterminent les besoins, les possibilités et le choix des techniques de préparation. Il est donc essentiel de bien connaître les propriétés du sol avant toute intervention.

La formation des sols est le résultat de nombreux processus géologiques (désagrégation, lessivage, éluviation, podzolisation, calcification, formation de gley), influencés par divers facteurs tels que la roche mère, le climat, les organismes vivants, le relief et le temps. Bien que ces processus évoluent lentement, certaines pratiques de travail du sol peuvent impacter leur dynamique, notamment lorsque les mouvements de l'eau sont fortement perturbés (lessivage excessif) ou lorsque des quantités importantes de sol sont déplacées, comme dans le cas du labour en pente ou des phénomènes d'érosion hydrique et éolienne liés aux interventions mécaniques.

Avant d'analyser le comportement physico-mécanique du sol sous l'action d'un outil aratoire, il est primordial de rappeler ses principales propriétés physiques et mécaniques.

1.2.3.1 Effet du travail du sol sur les propriétés physiques du sol

Le travail du sol est l'une des opérations agro-techniques fondamentales en agriculture en raison de son influence sur les propriétés du sol, l'environnement et la production végétale (Kishor, 2013). Parmi les facteurs de production végétale, le travail du sol contribue jusqu'à 20 % (Hammel, 1989). Pour assurer une croissance normale des plantes, le sol doit être préparé dans des conditions telles que les racines puissent avoir suffisamment d'air, d'eau et de nutriments. La méthode de travail du sol affecte l'utilisation durable des ressources du sol par son influence sur les propriétés du sol (Hammel, 1989). Par conséquent, (Wang et al., 2007) ont rapporté que les pratiques conventionnelles de gestion des sols entraînent des pertes de sol, d'eau et de nutriments dans le champ, et dégradent le sol avec une faible teneur en matière organique et une structure physique fragile, ce qui à son tour conduit à de faibles rendements des cultures et faible efficacité d'utilisation de l'eau et des engrais.

– Densité apparente

La densité apparente est presque toujours modifiée par les opérations de travail du sol. Un sol idéal contient environ 50 % de particules solides et 50 % d'espace poreux en volume. L'ampleur de la densité apparente des sols agricoles varie généralement de 0,9 à 1,8 Mg m⁻³ (Erbach, 1987). La densité apparente d'un sol minéral typique est d'environ 1,3 Mg m⁻³ (Singh et al., 1992). La densité apparente est inversement proportionnelle à la porosité totale, qui

fournit une mesure de l'espace poreux laissé dans le sol pour le mouvement de l'air et de l'eau. Husnjak et al. (2002) ont rapporté que parmi les propriétés physiques du sol, une forte dépendance réciproque a été trouvée entre le rendement des cultures et la densité apparente du sol, et une forte dépendance directe entre le rendement des cultures et la porosité totale. Bhattacharya et al. (2008) ont signalé que le non-labour augmente la densité apparente du sol. Anazodo et Onwuala (1984) ont également constaté que le système de non-labour présente une densité apparente significativement plus élevée, une résistance plus élevée du sol à la pression pénétrométrique et une porosité plus faible que le labour à la charrue et d'autres méthodes de travail du sol. Le système de labour à la charrue diminue la densité apparente du sol (Olaniyan, 1990). Osuji et Babalola (1982) ont signalé que la densité apparente augmentait d'avantage avec le temps dans les systèmes avec labour et sans labour.

– Porosité et aération

Le travail du sol affecte la porosité totale du sol ainsi que la distribution de la taille des pores. Le travail du sol augmente la macroporosité tandis que le compactage augmente la microporosité. Les systèmes de travail du sol de conservation entraînent des systèmes de pores plus continus (Bhattachariya et al., 2008), tandis que le travail minimum et le non travail du sol diminue la porosité du sol pour l'aération, mais augmente la porosité capillaire et, par conséquent, améliore la capacité en eau du sol avec une mauvaise aération du sol (Wang et Wen, 1994). Un apport limité en oxygène limitera également le développement du système racinaire même dans un sol non compacté et un travail minimal du sol pourrait augmenter la quantité de porosité (Allen et Fenster, 1997).

– Taux d'infiltration

Une des fonctions importantes du sol est la transmission de l'eau, qui affecte directement la productivité des plantes et l'environnement. L'infiltration de l'eau fait augmenter le stockage de l'eau pour les plantes et la recharge des eaux souterraines et réduit l'érosion. La conversion du labour conventionnel au zéro labour augmente généralement la capacité en eau disponible et le taux d'infiltration (McGarry et al., 2000; Bhattacharya et al., 2008) et diminue le ruissellement (Wright et al., 1999). Il a été rapporté que le sol non labouré par rapport au sol labouré avait des taux d'infiltration plus élevés et plus faibles (McGarry et al., 2000).

– L'humidité du sol

L'eau dans la zone non saturée du sol est appelée humidité du sol. Bien que l'humidité du sol corresponde à 0,005% de l'eau sur Terre, elle joue un rôle important dans le cycle de l'eau (Tran, 2010). L'humidité du sol est un facteur important qui influence la germination des graines, la levée et la croissance des plantes. Une connaissance précise de l'humidité de surface est également importante pour la reconstruction des champs de précipitations, d'évaporation et d'infiltration afin d'améliorer la prédiction du ruissellement (Kerr et Cabot, 2009). La structure du sol et les changements d'élimination de l'humidité dépendent des propriétés du sol, des types de travail du sol et des conditions climatiques. Les modèles d'élimination de l'humidité sont de la plus haute importance pour les régions semi-arides, car l'humidité est généralement le facteur limitant du rendement des cultures (Lindwall, 1984). Le travail du sol exerce également des effets néfastes sur le sol lorsqu'il est effectué dans des conditions d'humidité inadéquates ou lorsque des outils de travail du sol inadéquats sont utilisés. Cependant, d'autres études ont montré que le travail du sol est l'une des opérations les plus essentielles réalisées pour améliorer la structure du sol, augmenter la capacité d'infiltration et d'aération (Lio, 2006). La teneur en eau du sol est affectée par le travail du sol en raison des changements produits dans le ruissellement de surface et l'évaporation (Zhai et al., 1990). L'augmentation du stockage de l'eau dans le sol sous le travail du sol de conservation peut être attribuée à une évaporation réduite, à une plus grande infiltration et à la protection du sol contre l'impact des précipitations (Sarauskis et al., 2009). L'adoption du non-labour permet des séquences de culture plus intensives (Halvorson et al., 2000), car le non-labour entraîne une infiltration accrue d'eau de pluie et retient plus d'eau dans la racine potentielle par rapport au labour conventionnel. Selon Farhani et al. (1998) le non-labour conserve plus de résidus de surface, ce qui entraîne moins de pertes par évaporation. Le résultat est que les cultures utilisent l'eau du sol plus efficacement en semis direct (Peterson et al., 2001) et ainsi la période de croissance est augmentée (Farhani et al., 1998). Farhani et al. (1998) ont conclu que les pratiques de non-labour ont permis d'améliorer les conditions du sol, telles qu'une meilleure teneur en eau du sol, moins de fluctuations de la température du sol et une réduction de l'érosion du sol.

– Effet sur la résistance pénétrométrique

La résistance à la pénétration est une mesure indirecte de la résistance du sol au cisaillement (Osunbitan et al., 2005). Selon plusieurs auteurs, La résistance pénétrométrique

du sol doit être mesurée avec la masse volumique apparente et l'humidité du sol car ces facteurs affectent significativement résistance à la pénétration (Unger et Jones, 1998).

(Abbache et Benosmane, 2016), affirment que la résistance pénétrométrique est plus importante sur les parcelles en semis direct que sur les parcelles labourées. Toutefois ils ont pu constater que la teneur en eau a plus d'effet que la porosité sur la résistance pénétrométrique. $R_p (TC) = 95,13 - 1,76 * n (TC) - 0,86 * H (TC)$.

La résistance à la pénétration augmente avec la profondeur en raison de l'augmentation du frottement de la tige du pénétromètre (Bradford, 1986 ; Campbell et O'Sullivan, 1991 ; Franzen *et al.*, 1994), et les valeurs des différentes profondeurs sont corrélées entre elles (Stelluti *et al.*, 1988 ; Campbell et O'Sullivan, 1991). Yasin *et al.* (1993) ont trouvé une relation polynomiale entre l'indice du cône et la profondeur.

Dans plusieurs études comparant des sols labourés et non labourés, une plus grande résistance à la pénétration a été constatée dans les sols sans labour, en particulier dans les premiers 10 cm (Ehlers *et al.*, 1983 ; Radcliffe, 1988 ; Hammel, 1989 ; Hill, 1990 ; Pelegri *et al.*, 1990 ; Agenbag et Maree, 1991 ; Grant et Lafond, 1993 ; López *et al.*, 1996 ; Wander et Bollero, 1999 ; Ferreras *et al.*, 2000). Franzen *et al.* (1994) ont observés des valeurs d'indice de cône significativement plus faibles sans travail du sol jusqu'à une profondeur de sol de 10 cm en raison du paillage. En ce qui concerne la densité apparente, les différences entre le non-labour et les méthodes plus conventionnelles de travail du sol avec perturbation du sol sont importantes peu de temps après les opérations de travail du sol, mais diminuent rapidement pendant la saison de croissance et peuvent disparaître à la fin (Pelegri *et al.*, 1990 ; Franzen *et al.*, 1994 ; Lopez *et al.*, 1996).

1.2.3.2 Effet sur les 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.

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:

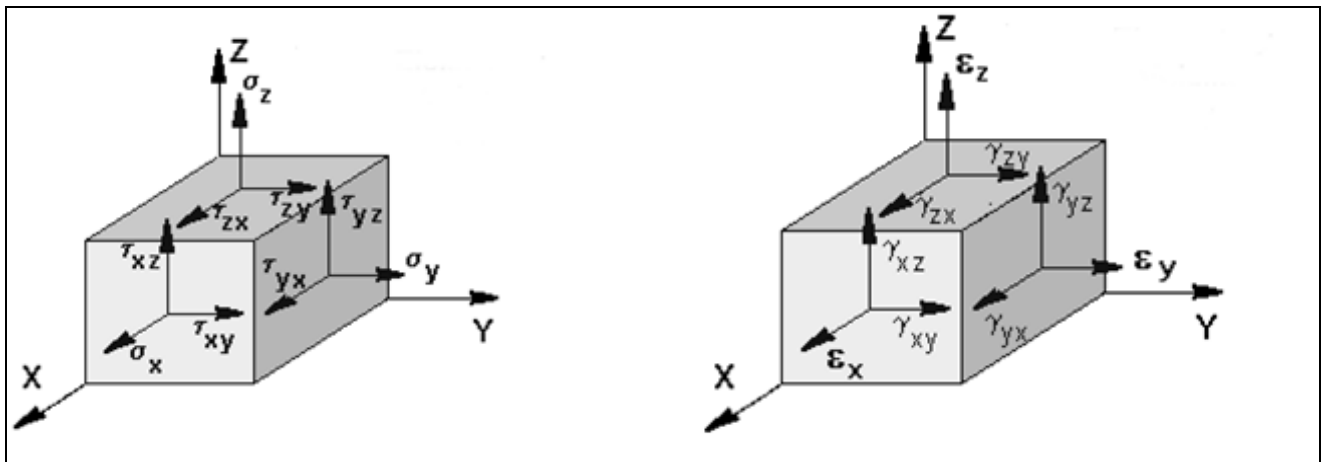


Figure 1 Contraintes et déformations normales et tangentielles

Contrainte normales (σ), contrainte tangentielle (τ)

Déformation normale (ε), déformation tangentielle (γ)

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)

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

Contrainte tangentielle (cisaillement)

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

Avec: E = module de Young ou module d'élasticité longitudinale qui est une propriété mécanique du matériau (daN / cm²).

G = module de Coulomb ou module d'élasticité transversale qui est également une propriété mécanique du matériau (daN / cm²).

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

Les deux contraintes σ et τ sont reliées par la loi de Coulomb comme suit :

$$\tau = C + \sigma.\operatorname{tg}\phi$$

Où : C = cohésion du sol (dan / cm²)

ϕ = angle de frottement interne du sol.

Cette relation est déterminé expérimentalement est plus pratique pour l'analyse des contraintes dans le sol, cela nécessite cependant des appareils appropriés tels que le Share-graphe 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.

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. Ce qui fera l'objet du prochain chapitre qui s'intéressera aux méthodes de caractérisation et de projections des corps de charrues.

1.3 Méthodes de caractérisation et de projection des corps de charrue

Pour analyser la géométrie de la surface active, le corps de charrue à socs est positionné dans un repère cartésien orthogonal Oxyz (fig.10), dont l'origine est située à la pointe du soc. L'axe Ox représente la direction du déplacement, avec un sens positif orienté à l'opposé de celui-ci. Le plan xOy correspond à un plan horizontal qui délimite le fond du labour, tandis que le plan xOz est un plan vertical longitudinal, également appelé muraille du sillon. Enfin, le plan yOz est un plan vertical transversal, aussi désigné sous le terme de plan frontal.

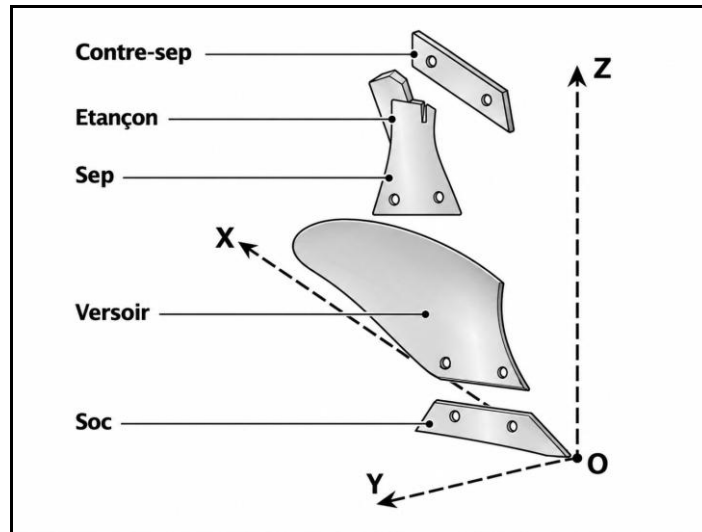


Figure 1.13 : Vue de profil d'un corps de charrue à soc éclaté dans le repère Oxyz

1.3.1 Caractérisation des outils aratoires

De nombreuses recherches ont été menées sur la caractérisation des outils aratoires, chacune adoptant une approche spécifique.

La première grande approche, proposée par Dalleine et Faure (1970), repose sur le mode d'action de l'outil étudié. Elle s'appuie sur l'évolution de la structure du sol avant et après le passage des pièces travaillantes. Cette approche est particulièrement pertinente pour les agriculteurs, qui doivent choisir la forme des outils en fonction des conditions d'intervention et des objectifs à atteindre.

La seconde approche concerne la conception des outils aratoires et se focalise sur les caractéristiques géométriques des surfaces actives, ainsi que sur leur amélioration en vue d'optimiser leur performance sur le terrain.

Les méthodes d'analyse des surfaces actives prennent en compte ces deux approches complémentaires, essentielles pour l'agronome qui doit répondre à deux problématiques majeures :

- Assurer aux plantes un environnement optimal pour leur développement, en recherchant les meilleurs critères qualitatifs de labour.
- Minimiser la consommation énergétique lors des opérations de préparation du sol, notamment durant le labour.

1.3.2 Méthode des coordonnées

Cette méthode consiste à relever les coordonnées des différents points de la surface active. Elle se distingue par sa précision et sa simplicité, ne nécessitant pas d'équipements sophistiqués. Cependant, son principal inconvénient réside dans le temps requis, particulièrement lorsque la surface étudiée est complexe et étendue.

1.3.3 Méthode des projections

Cette technique permet une visualisation directe de la forme de la surface active sur les trois plans de l'espace. Elle est utile pour une classification préliminaire des outils et leur sélection en fonction des conditions du sol. La méthode repose sur l'utilisation d'un profilographe, un mécanisme quadrilatère articulé. Toutefois, sa précision dépend fortement de l'état du dispositif, notamment des jeux aux articulations, ainsi que de la qualité de la manipulation.

1.3.4 Méthode photographique ou optique

Cette approche consiste à placer le corps de charrue selon différents plans de travail sur un support. Une plaque munie de fentes parallèles est interposée entre la surface à photographier et une source lumineuse, permettant aux rayons de traverser et de projeter une image. Des photos sont alors prises sous plusieurs angles et analysées afin de mieux comprendre la forme de la surface active.

1.3.5 Autres méthodes

Avec les avancées technologiques en informatique et les capacités graphiques des micro-ordinateurs, les limitations des méthodes traditionnelles sont largement surmontées grâce à la numérisation et au traitement d'images.

Ces progrès permettent l'introduction de nouvelles méthodes plus précises et facilement quantifiables, parmi lesquelles :

- **L'utilisation de revêtements spéciaux** appliqués sur les surfaces actives des outils complexes, tels que les versoirs. Ces revêtements permettent une analyse des surfaces par des moyens optiques (réfractométrie) ou magnétiques.

- **La modélisation assistée par ordinateur (CAO)** et la méthode des éléments finis, qui facilitent l'analyse des propriétés mécaniques des surfaces actives. Tandis que la méthode des revêtements permet une caractérisation géométrique, l'analyse par éléments finis offre une compréhension approfondie des contraintes exercées sur l'outil aratoire.

1.3.6 Modélisation de la trajectoire de la bande de terre

La modélisation de la trajectoire de la bande de terre sur les surfaces actives des pièces travaillantes apporte une compréhension théorique du comportement du sol sous l'effet des outils. Amara (2007) a proposé une approche basée sur l'analyse corrélative des caractéristiques géométriques des surfaces actives de deux types de versoirs, aboutissant à des équations de trajectoire dont les résultats sont présentés dans les figures suivantes.

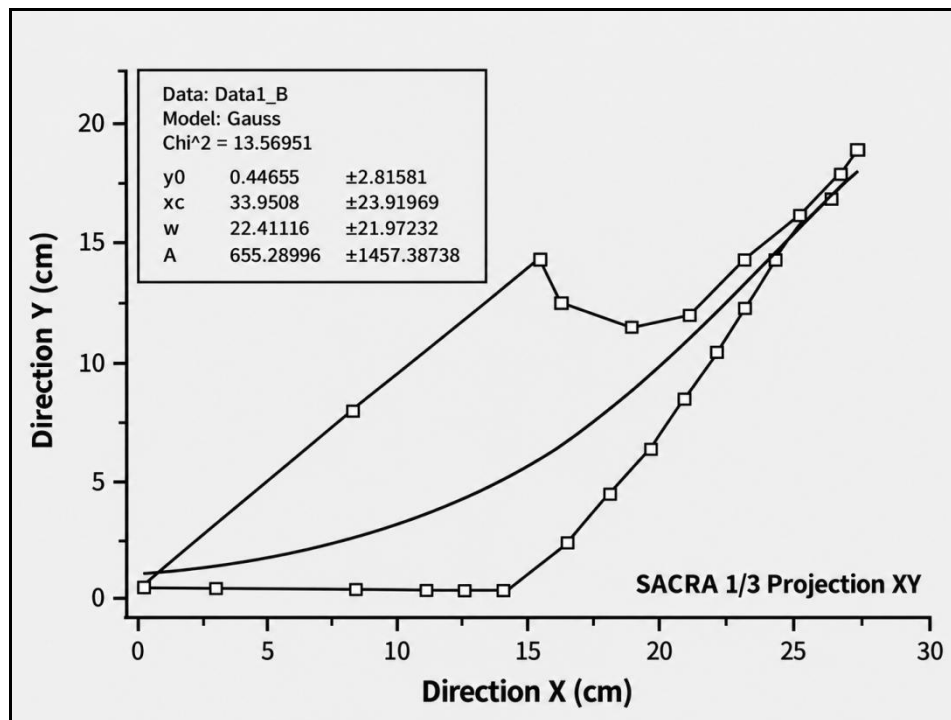


Figure 1.14 : Courbure moyenne suivant le plan XOY (forme SACRA)

(Source : Amara, 2007)

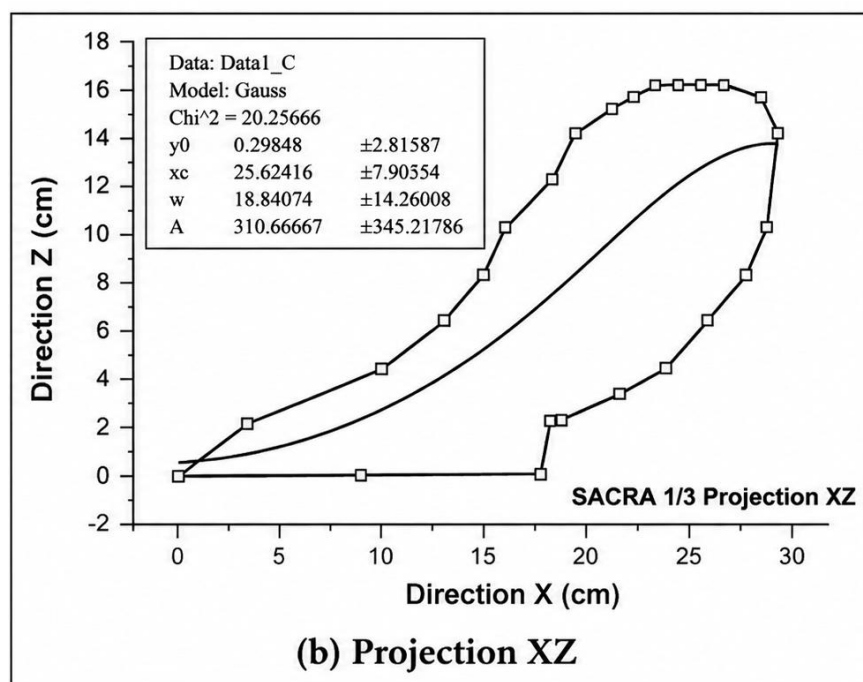


Figure 1.15 : Courbure moyenne suivant le plan XOZ (SACRA)

(Source : Amara, 2007)

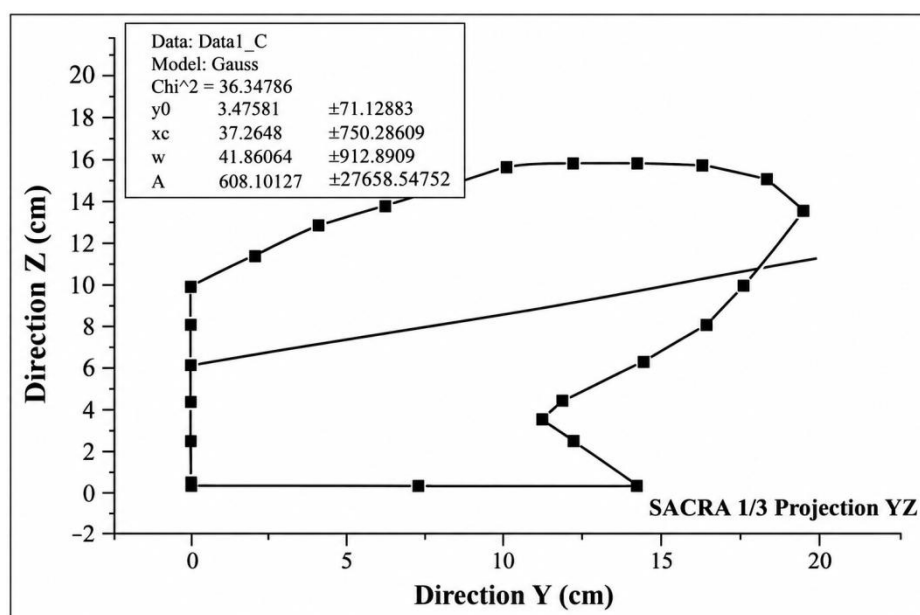


Figure 1.16 : Courbure moyenne suivant le plan YOZ (SACRA)

(Source : Amara, 2007)

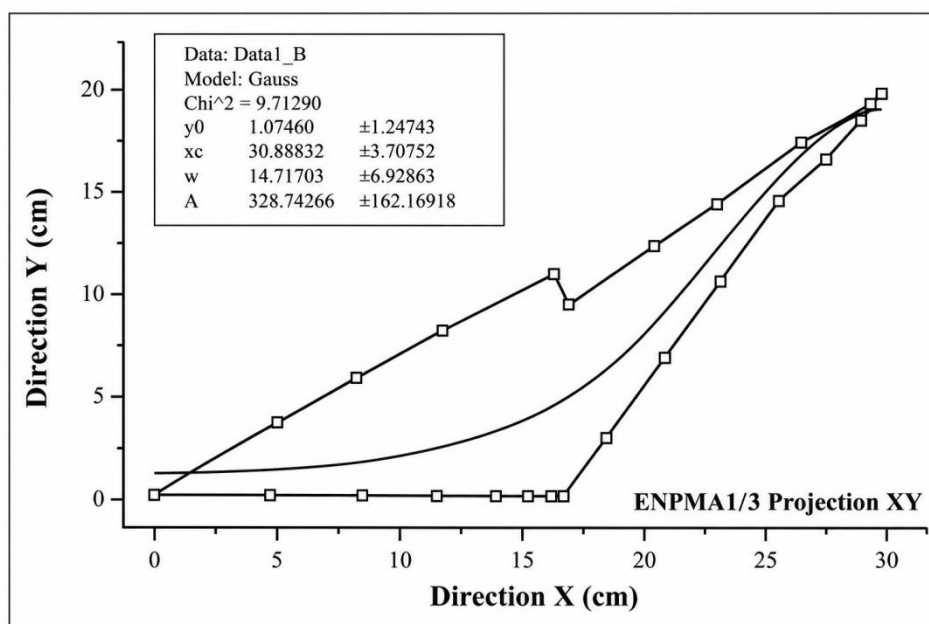


Figure 1.17 : Courbure moyenne suivant le plan XOY (ENPMA)

(Source : Amara, 2007)

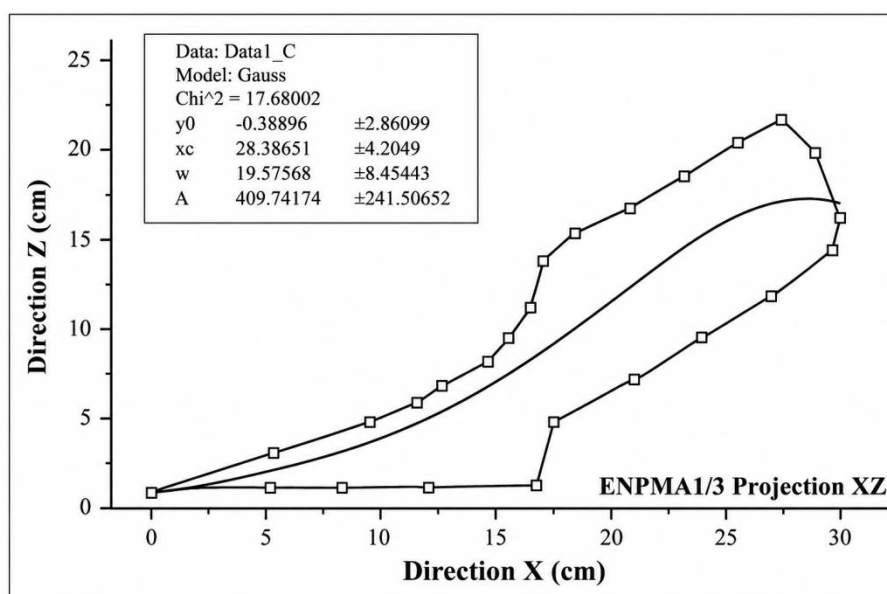


Figure 1.18 : Courbure moyenne suivant le plan XOZ (ENPMA)

Source: (Amara, 2007)

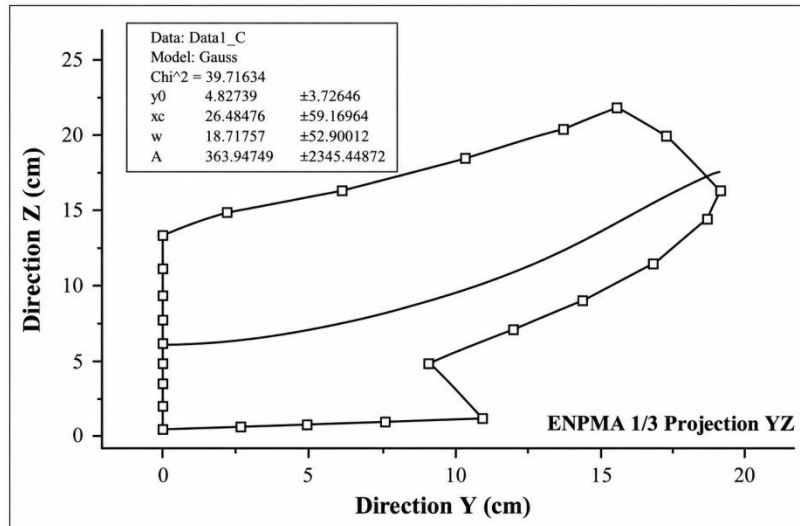


Figure 1.19 : courbure moyenne suivant le plan XOZ (ENPMA)

Source (Amara, 2007)

D'après cette étude, (Amara, 2007) a conclu que Cette représentation a permis 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. On se base sur la même approche et on établissant des équations de trajectoire, on peut prévoir d'une façon théorique le déplacement de la bande de terre sur l'outil aratoire, afin de fondé des hypothèses sur le comportement du sol vis-à-vis de l'outil.

1.4 Conclusion bibliographique et orientations de la recherche

Cette première partie de notre travail a permis de mettre en évidence l'importance des techniques de préparation du sol pour la mise en place des cultures. Les principaux enseignements à retenir concernent les interactions complexes entre les caractéristiques physico-mécaniques du sol, les exigences agronomiques pour la mise en place optimale des cultures, les caractéristiques géométriques des outils aratoires utilisés.

Problématique des charrues à socs et limites des recherches actuelles

Compte tenu de la complexité de la surface active d'un corps de charrue à socs, la majorité des recherches menées en Algérie sur cet outil se sont concentrées sur l'évaluation qualitative des labours. En revanche, peu d'études ont abordé la quantification de la géométrie des surfaces actives et leur impact sur l'effort de traction. À ce jour, les modèles mathématiques proposés pour estimer l'effort de résistance à la traction n'intègrent pas les caractéristiques géométriques de la surface active des corps de charrue à socs. Cette lacune a freiné l'amélioration de la conception géométrique de ces

outils, au profit de l'optimisation des dispositifs de sécurité et des dimensions des charrues.

En Algérie, les fabricants de charrues à socs n'ont apporté aucune innovation significative à ces équipements. Les modèles importés et ceux produits localement ne répondent pas toujours aux exigences techniques, notamment en termes de rendement énergétique.

Malgré l'essor des techniques simplifiées de préparation du sol, qui offrent des avantages économiques à court terme, le labour demeure incontournable sur les sols moyens à lourds. Il joue un rôle crucial dans :

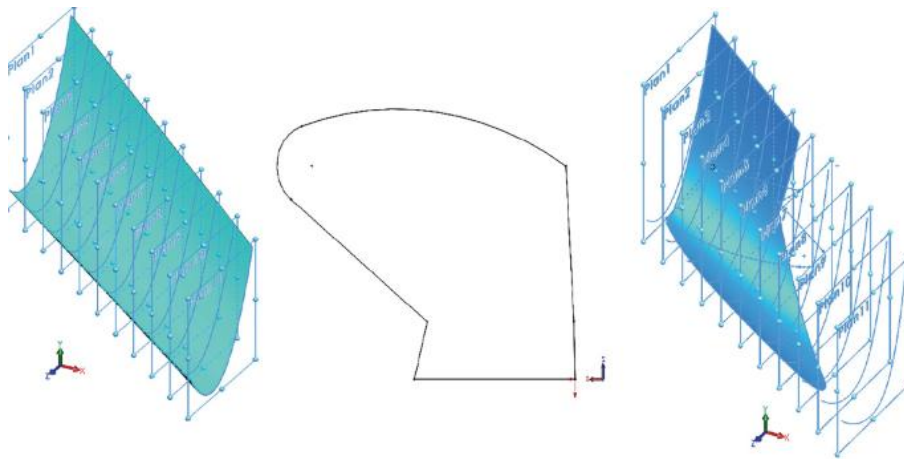
- La régénération de la structure du sol, souvent dégradée par les passages répétés des machines agricoles,
- L'enfouissement des résidus végétaux et la lutte contre les mauvaises herbes.

À partir de ces constats, notre travail s'oriente vers les objectifs suivants :

Analyse du comportement mécanique de la surface active de deux types de corps de charrue couramment utilisés en Algérie : Corps à carret mobile et Corps à bec de canard. Cette analyse sera réalisée à l'aide de la méthode des éléments finis, qui permet d'étudier avec précision le comportement mécanique des surfaces complexes, comme celles des corps de charrue à socs.

Évaluation de l'impact des outils aratoires sur le comportement physico-mécanique du sol : Étude des modifications de certaines propriétés physiques du sol (porosité, teneur en eau). Analyse de l'évolution des propriétés mécaniques du sol (résistance pénétrométrique) sous l'action des outils de deux chaînes classiques de travail du sol. L'objectif final est de démontrer comment chaque chaîne de préparation du sol influence la structure initiale du sol, afin d'optimiser les pratiques agricoles en fonction des objectifs agronomiques et environnementaux.

Chapitre 2. Analyse du comportement mécanique des surfaces actives de deux types de corps de charrue fabriqués en Algérie



Ce chapitre a pour objectif de caractériser deux types de socs de corps de charrue fabriqués et largement utilisés en Algérie : le soc à carrelet mobile et le soc à bec de canard. La première partie sera consacrée à la description du matériel utilisé, tandis que la méthodologie adoptée sera présentée conjointement avec les résultats de la caractérisation des deux types de corps de charrue.

2.1 Description du matériel utilisé

La caractérisation géométrique des corps de charrue à socs fréquemment rencontrés sur champ en Algérie, à savoir les charrues fabriquées par MAGI ROUIBA. Historiquement, elle a vu le jour en 1932 sous l'appellation de "L'Entreprise de Construction Mécanique PONS Raphael". Le 21 août 1963, elle a été intégrée au patrimoine de l'État. Entre 1963 et 1972, l'entreprise a fonctionné en tant qu'Entreprise autogérée, avant d'être rattachée à la "SONACOME" en 1973, prenant alors le nom de "Unité Ben Badis".

En 1982, elle a été intégrée à l'"ENPMA" (l'Entreprise Nationale de Production de Matériel Agricole) puis, en 1997, restructurée sous la forme de "EPE EURL MAGI". Le 15 avril 2014, l'EPE MAGI a adopté le statut de société par actions, devenant ainsi une filiale du Groupe Mécanique. En 2015, un transfert d'activité a été opéré de l'ancien site de Rouïba vers un nouveau site situé dans la Zone Industrielle de Reghaia.

En 2017, à la suite du redéploiement des activités de l'entreprise vers d'autres secteurs, sa dénomination a été modifiée en "Manufacture d'Activités Générales Industrielles" (abrégié "MAGI SPA"), remplaçant l'ancienne dénomination "Matériels Agricoles et Industriels" (abrégié "MAGI"). Parallèlement et après le déploiement de MAGI vers d'autres secteur, GALUCHO ALGERIE SPA (Société de Fabrication & Commercialisation de Matériels Agricole de Travail du Sol et de Transport Agraire) a été créé en joint-venture par résolution n° 08/143/06/11/2014 du conseil des participations de l'état portant sur le projet de partenariat entre Epe CMA spa, Epe PMAT spa et la société portugaise GALUCHO industries Metalomecanics. Cette dernière a pour objet social la fabrication d'une large gamme de matériels agricole d'accompagnement et de travail du sol.

Les deux types de corps de charrue analysés dans cette étude présentent des conceptions similaires en ce qui concerne le versoir, mais se distinguent par la forme du soc.

- **Le soc à bec de canard** : Ce type de soc est particulièrement adapté aux sols abrasifs et est couramment utilisé en raison de sa pointe plate qui favorise la pénétration dans le sol. Grâce à sa conception épaisse, il permet des opérations de rabattage une fois la

pointe usée. De plus, la pointe est légèrement déportée du côté du guéret, ce qui améliore la stabilité de la charrue et lui confère une meilleure tendance à suivre le sillon.

- **Le soc à pointe amovible et à carret** : Conçu pour résister aux conditions de sols difficiles et usants, ce type de soc est de plus en plus répandu. Il est doté d'une pointe en acier de section carrée, offrant une meilleure durabilité face à l'usure. Toutefois, en raison de sa conception, il nécessite une force de traction plus élevée par rapport aux autres types de socs. Certaines charrues modernes, comme celles produites par HUARD, sont équipées de socs à aileron jouant le rôle du couteau, offrant une grande résistance à l'usure et améliorant l'efficacité du travail du sol.

Caractéristiques dimensionnelles du corps de charrue

Les formes des pièces travaillantes du corps de charrue sont nombreuses et complexes. Pour les différencier, l'utilisation des angles seule ne suffit pas ; une analyse des dimensions (longueurs) est indispensable.

Ces dimensions sont importantes car elles influencent la taille des mottes produites lors des labours, ce qui a un impact direct sur les opérations culturales suivantes (pseudo-labours et travaux superficiels), ainsi que sur la stabilité structurale du sol. Elles sont également essentielles pour la conception et la projection des corps de charrue à socs.

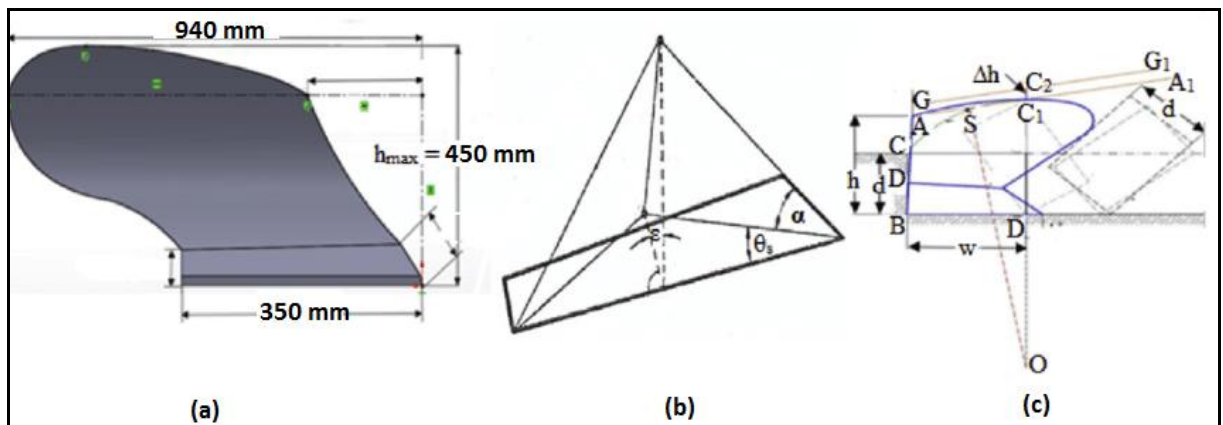


Figure 2.1 : (a) Dimensions de la charrue MAGI; (b) angles les plus importantes (Hadi Azimi-Nejadian et al., 2019) et (c) vue de face d'un corps de charrue (Hadi Azimi-Nejadian et al., 2019).

Les caractéristiques géométriques des deux corps de charrue étudiés sont mentionnées dans tableau suivant :

Tableau 2.1 : Caractéristiques constructives des deux corps de charrues étudiés

Corps de charrue	MAGI	
	carrelet	bec de canard
Forme du soc		
Hauteur du corps h (mm)	390	390
Longueur du corps L (mm)	900	900
Largeur de labour b (mm)	305	315
Longueur du versoir l_2 (mm)	800	800
Largeur du versoir d_1 (mm)	550	550
Angle d'entrure (α_0)	35	27
Angle d'attaque (γ_0)	45	50
Angle d'inclinaison (θ_0)	36	35

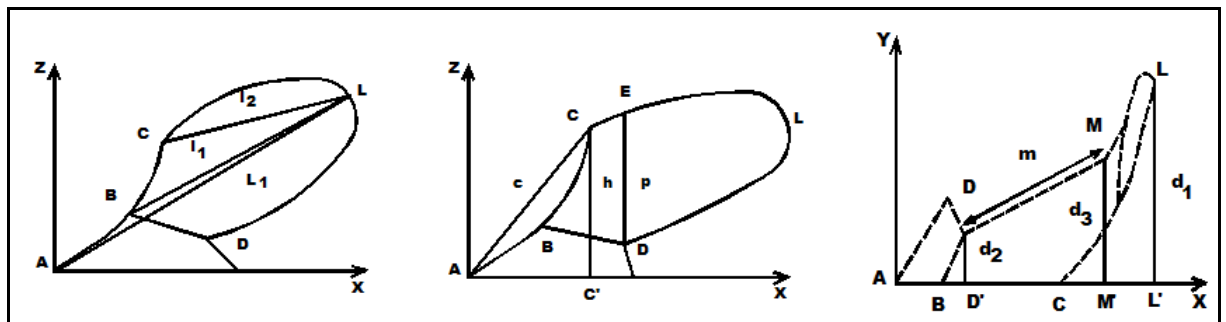


Figure 2.2 : Caractéristiques dimensionnelles d'un corps de charrue à socs

Source : Autodesk 2012.

2.1.1 Dispositif de mesure des coordonnées des points des surfaces actives des corps de charrue à soc

En l'absence d'un scanner tridimensionnel permettant une acquisition directe de la géométrie des surfaces étudiées, nous avons eu recours à un dispositif de mesure de type pantographe, conçu par le regretté Pr Amara Mahfoud au laboratoire de machinisme agricole du Département de Génie Rural de l'École Nationale Supérieure Agronomique d'Alger. Ce dispositif avait déjà été utilisé dans plusieurs travaux antérieurs, notamment ceux de Taïb (2007, 2012), Nourani (2010) et Zerkani (2012).

Le pantographe est constitué de deux plaques en bois disposées perpendiculairement l'une par rapport à l'autre. La plaque verticale comporte un ensemble de perforations régulièrement espacées, à travers lesquelles sont introduites des baguettes graduées permettant de déterminer les coordonnées des différents points de la surface étudiée. La procédure de mesure et la consignation des valeurs étant réalisées manuellement, cette méthode peut néanmoins être affectée par certaines incertitudes liées à la manipulation du dispositif ainsi qu'à la transcription des données.

Les coordonnées utilisées dans le cadre de ce travail correspondent aux points relevés par Zerkani et Amara (2013) sur deux types de corps de charrue, à savoir le corps à bec de canard et le corps à carrelet mobile. L'ensemble de ces données est présenté dans les annexes 9 et 10 et a servi de base à la reconstruction géométrique et aux analyses réalisées dans la suite de l'étude.

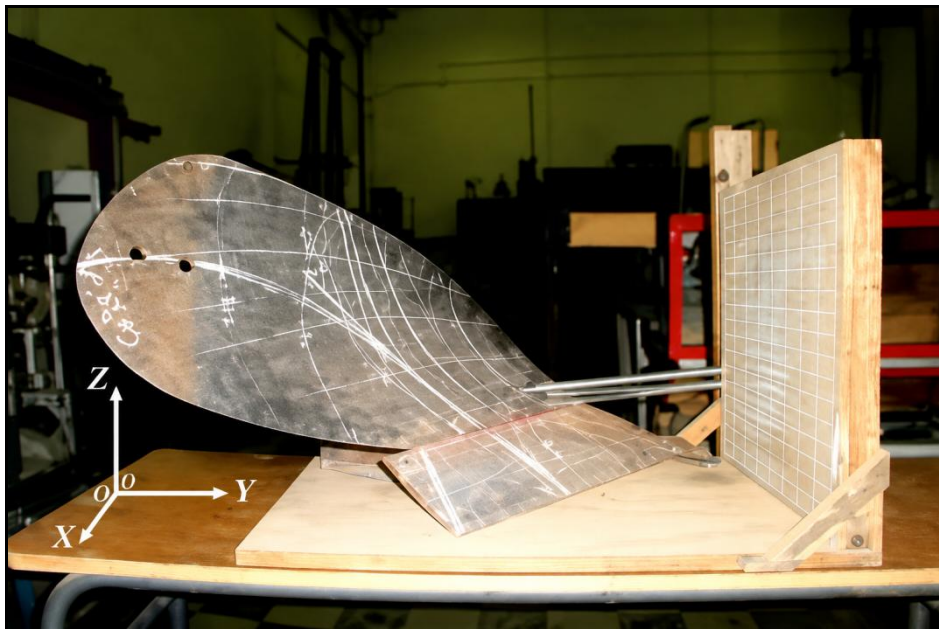


Figure 2.3 : Dispositif de mesure des coordonnées (x,y,z) des deux corps de charrues

Source : Zerkani et Amara, 2013

2.1.2 Le logiciel utilisé pour la conception

La méthode adoptée pour la conception et l'analyse des corps de charrue à soc repose sur l'utilisation d'outils avancés de modélisation et d'analyse numérique, intégrés dans le logiciel AutoCAD Mechanical 2018. Cette approche permet de concevoir avec précision les formes des surfaces actives de la charrue en s'appuyant sur les fonctionnalités spécifiques du logiciel. Pour cela, nous avons introduit les coordonnées des différents points géométriques

représentant la surface active, ce qui a permis de définir de manière détaillée et précise la forme et les dimensions de chaque partie de l'outil. AutoCAD Mechanical a ainsi facilité la création de modèles 3D réalistes, en permettant une représentation exacte des formes complexes tout en optimisant la conception.

D'autre part, pour évaluer le comportement mécanique des corps de charrue sous l'action des forces appliquées, nous avons intégré l'utilisation du module FEA (Finite Element Analysis - Analyse par éléments finis). Ce module est essentiel pour simuler les contraintes et déformations que subissent les composants de la charrue, notamment le soc, sous des charges variées. L'analyse par éléments finis permet de diviser l'objet en petits éléments (maillage), sur lesquels les calculs sont réalisés afin d'obtenir une vue d'ensemble du comportement mécanique global. Cela nous permet d'identifier les zones de faiblesse, de prévoir les risques de défaillance et de définir les meilleures configurations pour une efficacité maximale sous des conditions de travail réelles.

La méthode des éléments finis (MEF), ou Finite Element Method (FEM) en anglais, est une méthode numérique utilisée pour résoudre des problèmes complexes en ingénierie et en physique, notamment ceux qui concernent le comportement mécanique, thermique, ou dynamique de structures. Cette méthode est largement utilisée pour analyser les contraintes, déformations, vibrations, et autres phénomènes physiques dans des objets ou des systèmes.

2.1.3 Principe de base de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis repose sur une succession d'étapes permettant de représenter numériquement le comportement d'une structure complexe. Dans un premier temps, le domaine étudié est subdivisé en un grand nombre de petites entités appelées éléments finis, reliées entre elles par des nœuds. Cette opération, appelée maillage, permet de discrétiser la géométrie de la structure. Selon la nature et la complexité du problème, les éléments peuvent prendre différentes formes, telles que des triangles ou des quadrilatères en deux dimensions, ainsi que des tétraèdres ou des hexaèdres en trois dimensions. Chaque élément est ensuite associé à un modèle mathématique décrivant son comportement physique. Dans le cas d'une analyse mécanique, les équations de la mécanique des solides sont utilisées afin de déterminer la réponse de l'élément aux sollicitations appliquées. Les contributions de l'ensemble des éléments sont alors assemblées pour former un système global représentant le comportement de toute la structure. À cette étape sont introduites les conditions aux limites, telles que les

appuis, les blocages ou les déplacements imposés, ainsi que les différentes charges extérieures, comme les forces, les pressions ou éventuellement les sollicitations thermiques. Le système global d'équations ainsi obtenu est ensuite résolu numériquement afin de déterminer les inconnues du problème, généralement les déplacements nodaux. À partir de ces déplacements, il est possible de calculer les déformations, les contraintes et d'autres grandeurs mécaniques caractéristiques. Enfin, une phase de post-traitement permet de visualiser et d'interpréter les résultats obtenus sous forme de cartes de contraintes, de déformations ou de déplacements. Cette analyse permet notamment d'identifier les zones les plus sollicitées, d'évaluer les risques de défaillance, de comparer différentes configurations et d'orienter l'optimisation de la conception avant la réalisation ou l'utilisation réelle de la structure.

2.1.2.1 Avantages de la méthode des éléments finis

- **Flexibilité géométrique** : La méthode permet de traiter des géométries très complexes, y compris des formes irrégulières et des objets tridimensionnels.
- **Polyvalence** : Elle est utilisée dans de nombreux domaines : mécanique, thermique, dynamique, électromagnétisme, etc.
- **Précision** : En augmentant le nombre d'éléments (en raffinant le maillage), la précision des résultats peut être améliorée.
- **Analyse dans des conditions réelles** : Elle permet d'analyser le comportement d'une structure dans des conditions variées (charges dynamiques, thermiques, etc.) avant sa fabrication.

2.1.2.2 Limitations de la méthode des éléments finis

- **Complexité du modèle** : Plus la géométrie et le comportement physique sont complexes, plus la modélisation et la résolution deviennent coûteuses en termes de temps de calcul.
- **Dépendance au maillage** : Les résultats sont fortement influencés par le choix du maillage. Un maillage trop grossier peut mener à des erreurs, tandis qu'un maillage trop fin peut augmenter considérablement le temps de calcul.
- **Connaissance des matériaux** : La précision des résultats dépend de la qualité des propriétés des matériaux utilisés dans le modèle (par exemple, les propriétés élastiques, thermiques, etc.).

2.1.2.3 Applications typiques de la méthode des éléments finis

- **Analyse des structures** : Comme des ponts, des bâtiments, des avions, des automobiles, où l'on étudie la résistance des matériaux, les déformations, et les contraintes.
- **Simulation thermique** : Pour étudier la répartition de la température dans un objet ou un système, en particulier dans les dispositifs électroniques ou les moteurs.
- **Analyse dynamique** : Pour analyser les vibrations, les chocs ou les comportements dans des situations d'impact ou de charge variable.
- **Conception de produits** : La MEF est utilisée pour optimiser des produits avant leur fabrication, en testant différents matériaux, formes et configurations.

En résumé, la méthode des éléments finis est un outil puissant permettant de simuler, analyser et prédire les comportements physiques des structures dans divers domaines de l'ingénierie. Grâce à sa capacité à résoudre des problèmes complexes, elle est devenue incontournable dans de nombreuses applications industrielles et scientifiques.

Ainsi, cette méthode combinée de modélisation géométrique et d'analyse mécanique par éléments finis assure une conception optimisée, permettant à la fois de garantir la solidité et la performance des charrues à soc dans des conditions variées d'utilisation.

2.2 Méthodologie

2.2.1 Méthode de caractérisation géométrique des surfaces actives

Avant de procéder à la prise des mesures, plusieurs précautions techniques et méthodologiques ont été scrupuleusement prises en compte afin de garantir la précision et la fiabilité des données collectées. Il était essentiel, tout d'abord, de vérifier la perpendicularité des planches du dispositif utilisé, afin d'assurer que les mesures seraient effectuées dans un repère orthogonal précis. La tige devait être maintenue parfaitement droite, et la pointe du soc devait être positionnée avec exactitude au point d'origine (0,0,0) du repère cartésien.

Il était également crucial de s'assurer que le corps de charrue soit correctement posé sur la planche, et qu'il reste bien stable et fixe tout au long de la manœuvre. Cette stabilité garantit que les déplacements et les mesures ne soient pas perturbés par des mouvements involontaires. De plus, il a fallu s'assurer que l'ensemble des points de mesure sur le dispositif coïncide avec la totalité de la surface active du corps de charrue. Une attention particulière a été portée à la vérification qu'aucune zone de la surface n'était omise, en s'assurant qu'il n'y avait pas de surfaces non balayées, ce qui pourrait fausser les résultats.

Une fois ces vérifications effectuées et validées, la procédure de mesure a pu commencer. Pour ce faire, une tige graduée a été insérée dans les trous situés sur la planche perpendiculaire. Ces trous ont permis de déterminer avec précision la hauteur Z et l'ordonnée Y de chaque point de la surface active. Grâce à la graduation de la tige, l'abscisse X du point en question a pu être relevée. Chaque coordonnée ainsi collectée a ensuite été soigneusement enregistrée et introduite dans le programme informatique destiné à traiter les données. Cela a permis de créer une base de données géométriques fiable et précise, essentielle pour les étapes ultérieures de modélisation et d'analyse de la charrue.

2.2.2 Méthode d'analyse du comportement mécanique des surfaces actives de la charrue à socs

À partir de nos calculs, nous obtenons différentes contraintes mécaniques qui s'exercent sur la surface active de la charrue à soc. Ces contraintes se répartissent en deux catégories : les contraintes normales selon les axes X, Y et Z, ainsi que les contraintes de cisaillement dans les plans XY, XZ et YZ.

Cependant, dans la plupart des cas, nous ne disposons que d'une seule valeur de référence pour évaluer la résistance du matériau constituant la charrue : la limite d'élasticité, qui est déterminée lors d'un essai de traction.

Pour analyser la résistance de cette surface active soumise aux efforts du travail du sol, nous devons comparer les six contraintes obtenues à cette limite d'élasticité. Toutefois, ces contraintes étant de natures différentes, il est impossible de les comparer directement. C'est pourquoi nous faisons appel à la contrainte équivalente de von Mises, qui permet de regrouper ces six valeurs en une seule grandeur représentative.

La contrainte de von Mises est formulée de manière à ce que sa valeur puisse être directement comparée à la limite d'élasticité du matériau. Ainsi, elle nous donne une indication claire sur la capacité de la surface active de la charrue à résister aux sollicitations mécaniques qu'elle subit lors du labour.

Par exemple, si nous obtenons une contrainte de von Mises de 100 MPa pour une zone spécifique de la surface active, cela signifie que cette zone subit un état de contrainte équivalent à une contrainte de traction pure de 100 MPa, comme si elle était soumise à un essai de traction standard.

Cette approche nous permet donc d'évaluer plus précisément la tenue mécanique du soc de charrue face aux efforts du sol. Si la contrainte de von Mises dépasse la limite d'élasticité du matériau, cela signifie que des déformations plastiques ou une rupture peuvent survenir, compromettant ainsi la performance et la durabilité de l'outil de travail du sol.

Afin d'atteindre l'objectif de quantifier ces contraintes, nous avons varié l'effort de (200 daN à 600 daN) sur le soc des différents corps, selon la direction d'avancement de la charrue. Le point d'application de la force sera la pointe du soc sur l'axe des abscisses. En effet, le soc a une influence directe sur la valeur de l'effort de résistance à la traction car selon (Binesse 1970), 70% de l'effort total consommé par une charrue est utilisé par le soc.

2.3 Résultats de l'analyse du comportement mécanique des surfaces actives des charrues à socs

Création du nuage de points

Pour introduire des coordonnées x , y , z dans AutoCAD Mechanical 2018 pour créer un nuage de points, nous avons généré un fichier RCP (ReCap Project) à partir de nos coordonnées, nous avons suivi plusieurs étapes. Nous avons d'abord converti nos coordonnées en un fichier compatible avec AutoCAD, tel qu'un CSV ou un TXT, en respectant le format standard des points (x , y , z). Ensuite, nous avons importé ces points dans AutoCAD en utilisant un script en fichier .scr, "_POINT x,y,z ". Ce script a été enregistré avec l'extension .scr et exécuté via Tools → Run Script dans AutoCAD.

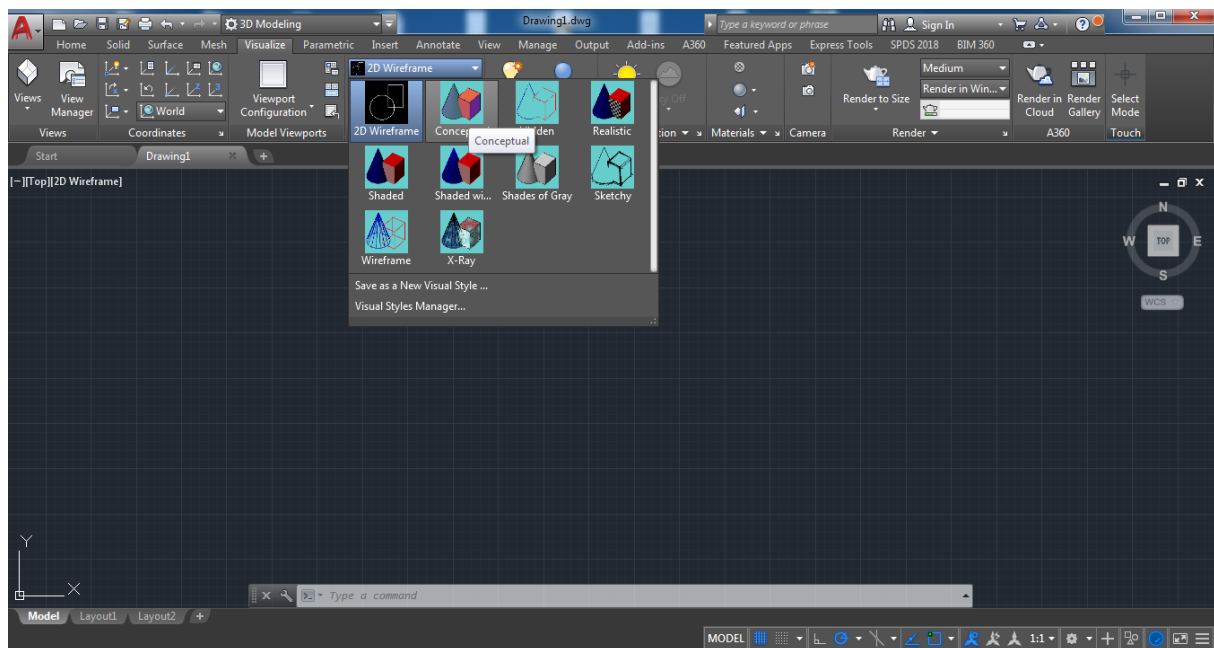


Figure 2.4 : l'interface du logiciel Autocad Mechanical 2018 pour la création du nuage de points

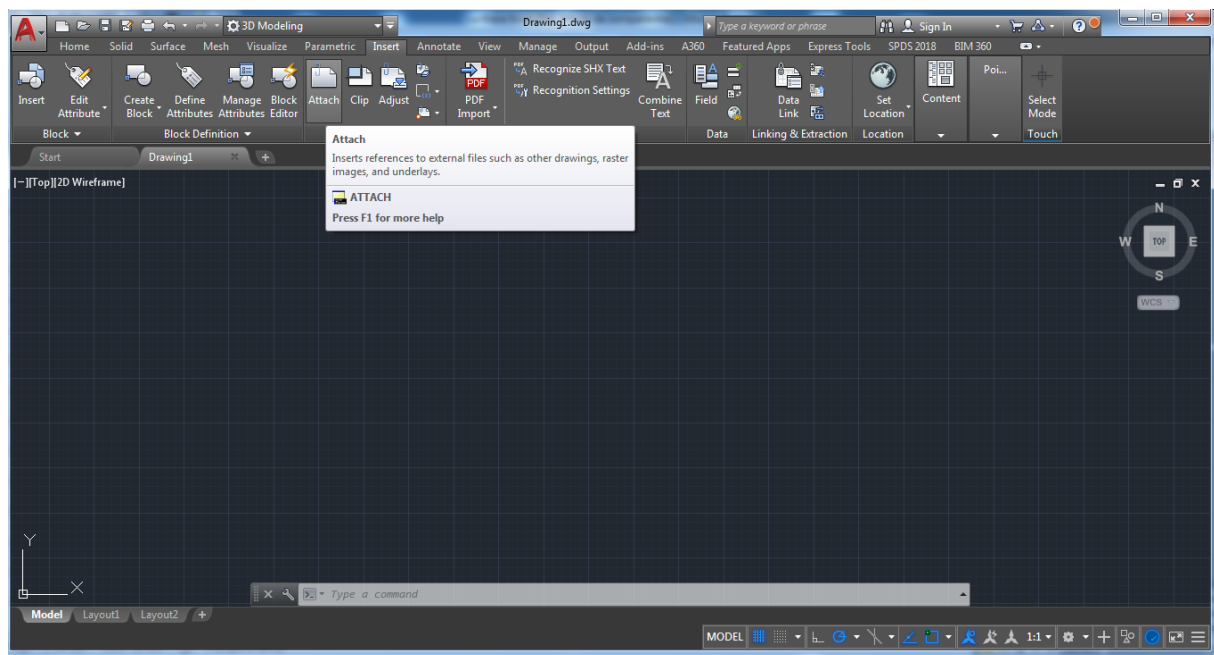


Figure 2.5 : l'interface du logiciel Autocad Mechanical 2018 pour attacher fichier SCR

Une fois les points importés, nous les avons exportés au format XYZ en utilisant la commande EXPORT ou des outils de conversion. Enfin, nous avons importé ce fichier dans Autodesk ReCap pour créer le nuage de points au format RCP.

Les figures suivantes représente le nuage de points des deux types de corps de charrues dans les différentes dimensions :

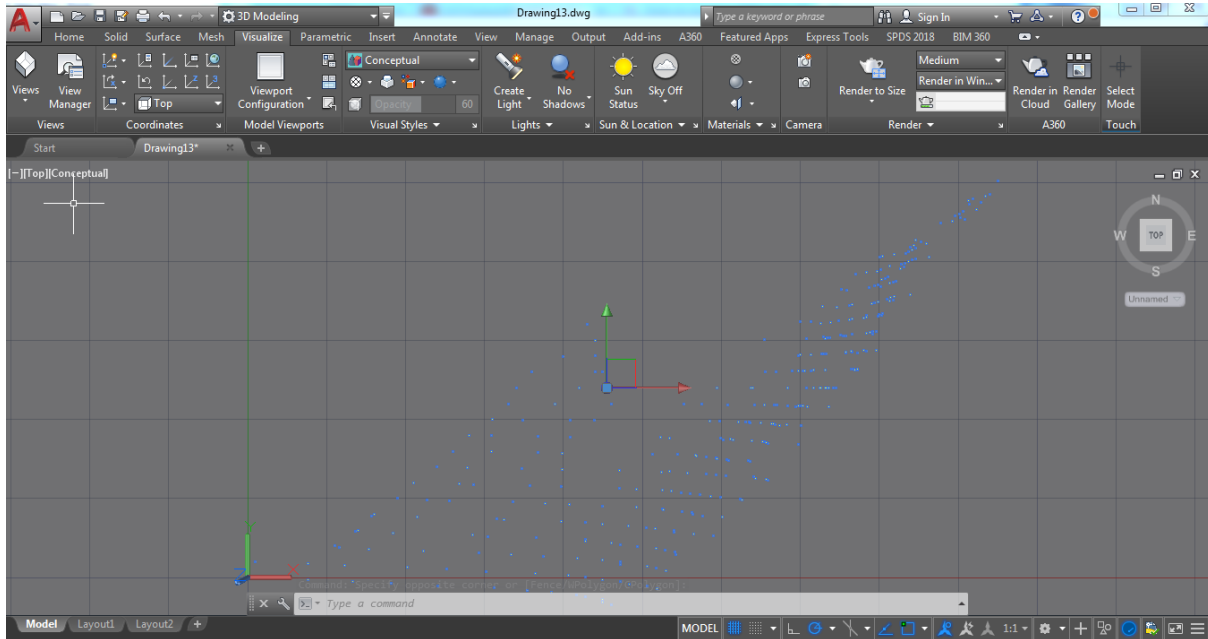


Figure 2.6 : vue de haut du nuage de points de la charrue à soc carrelet mobile

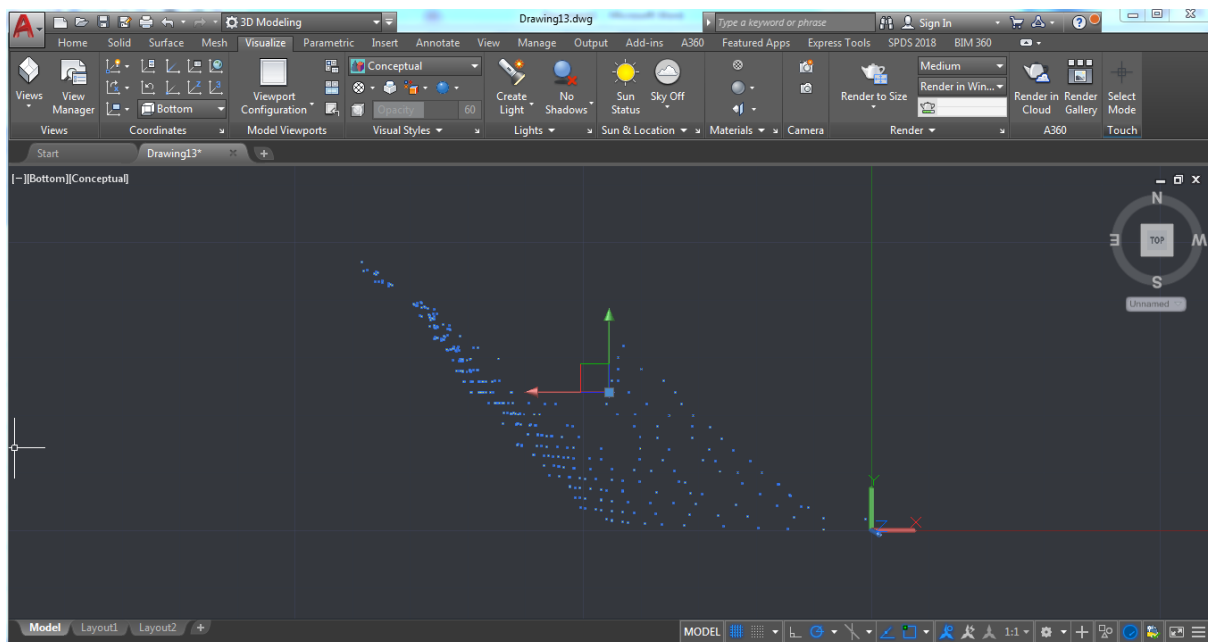


Figure 2.7 : vue de bas du nuage de points de la charrue à soc carrelet mobile

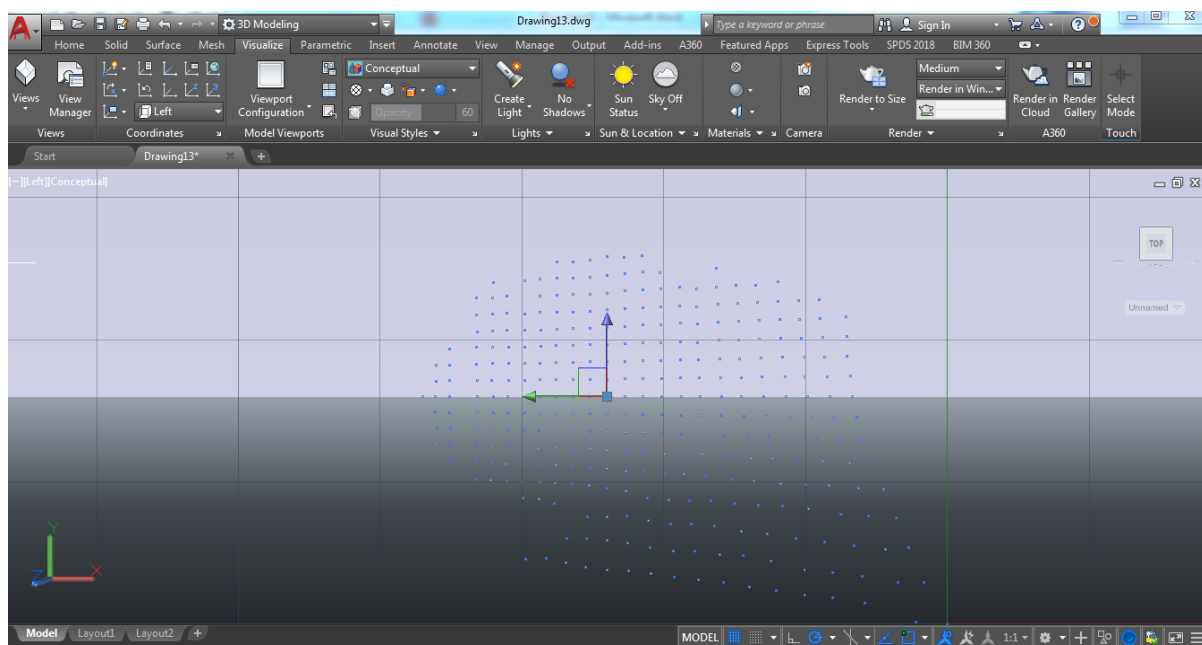


Figure 2.8 : vue de gauche du nuage de points de la charrue à soc carrelet mobile

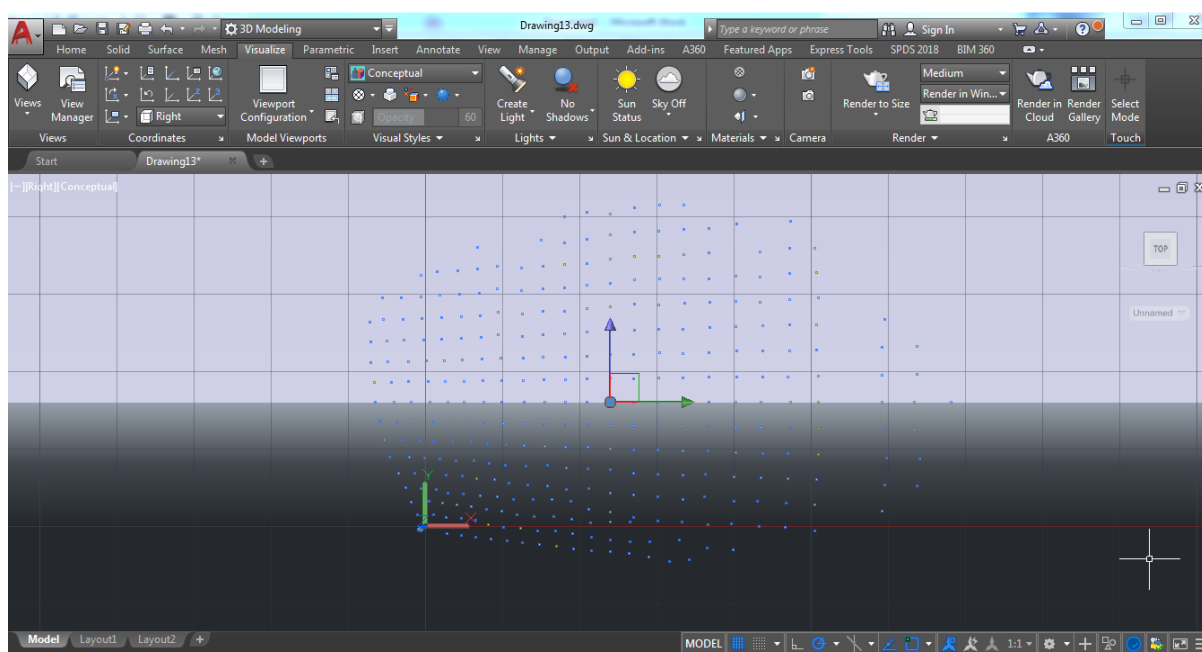


Figure 2.9 : vue de droite du nuage de points de la charrue à soc carrelet mobile

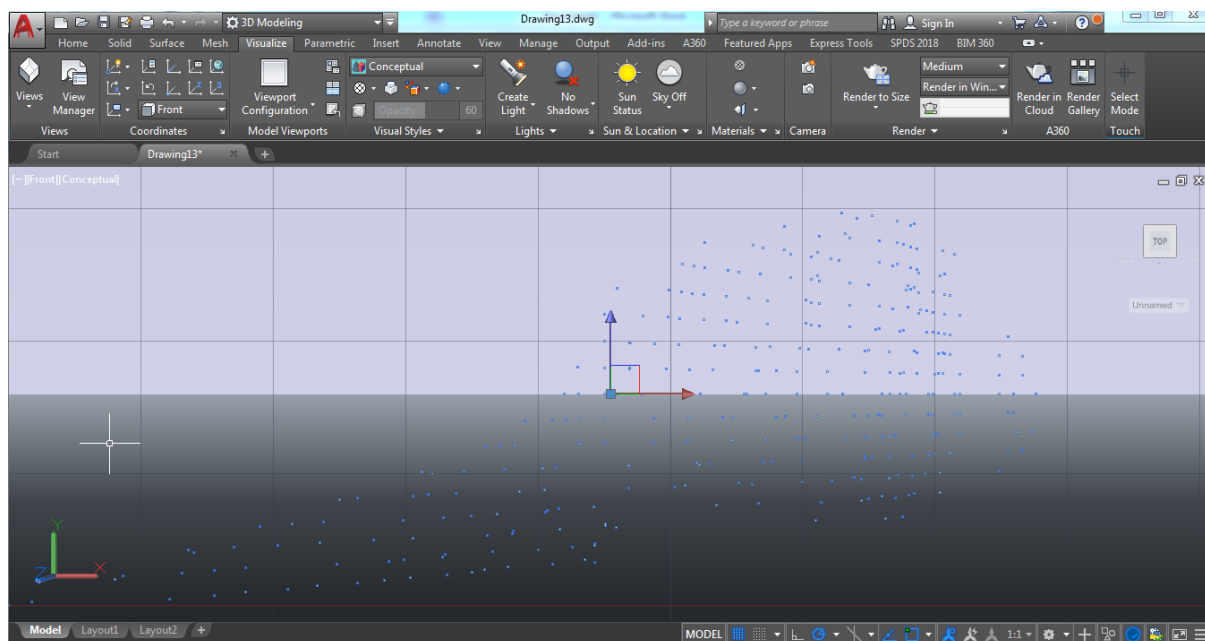


Figure 2.10 : vue de face du nuage de points de la charrue à soc carrelet mobile

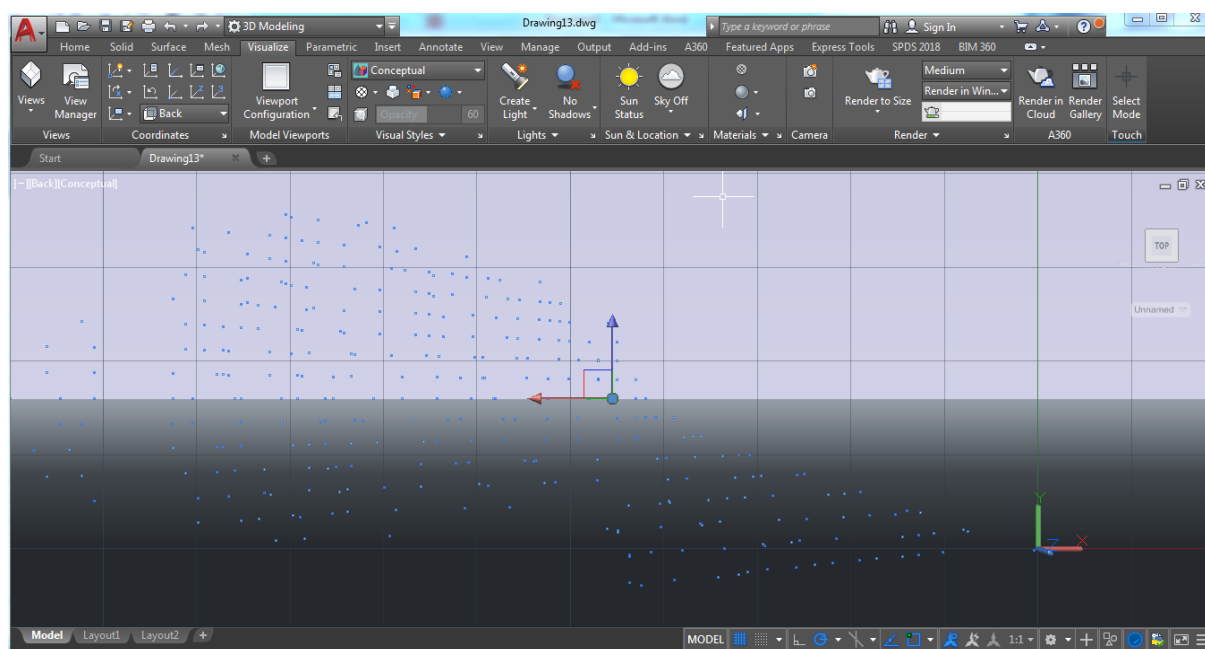


Figure 2.11 : vue arrière du nuage de points de la charrue à soc carrelet mobile

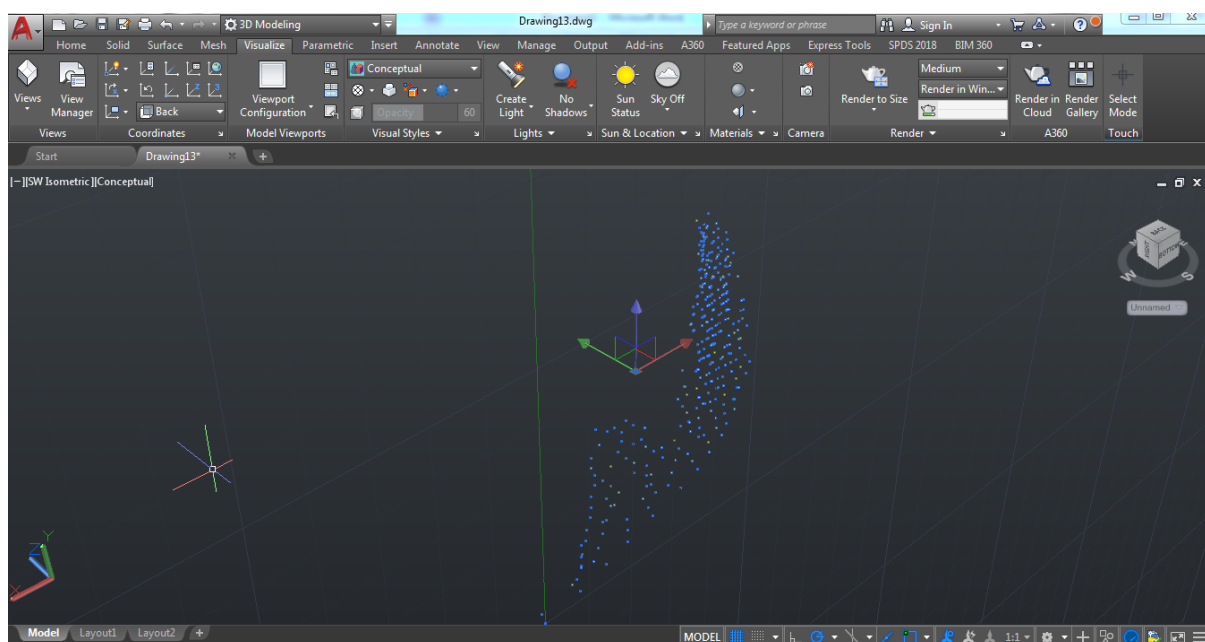


Figure 2.12 : vue SW du nuage de points de la charrue à soc carrelet mobile

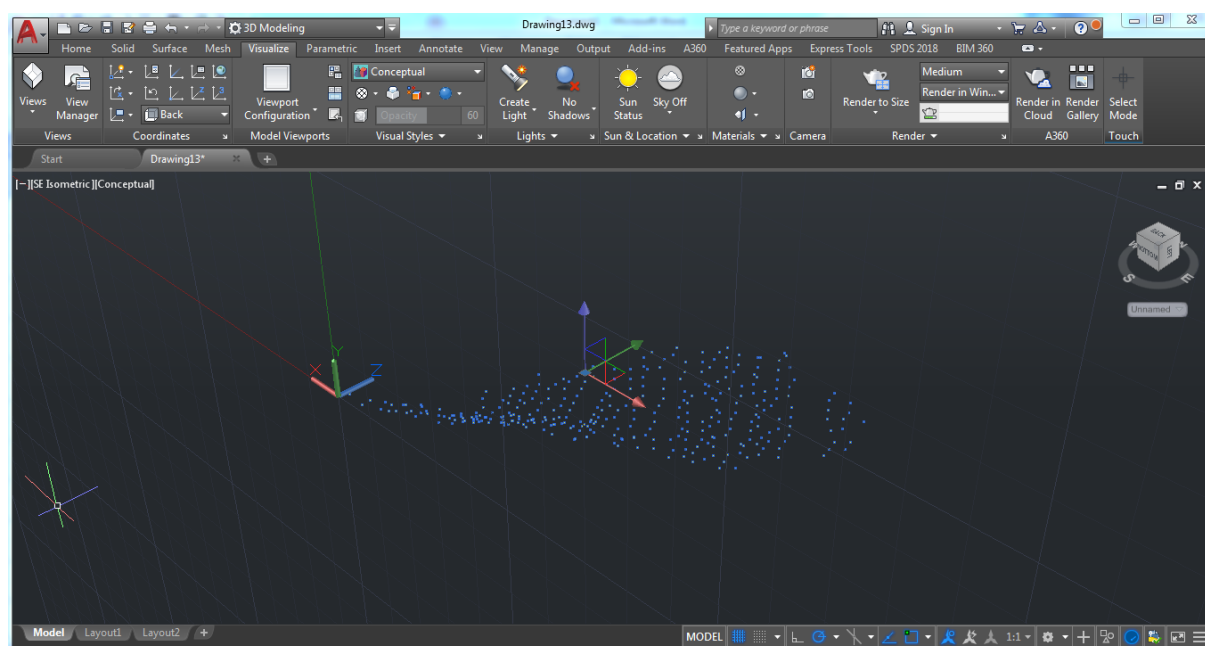


Figure 2.13 : vue SE du nuage de points de la charrue à soc carrelet mobile

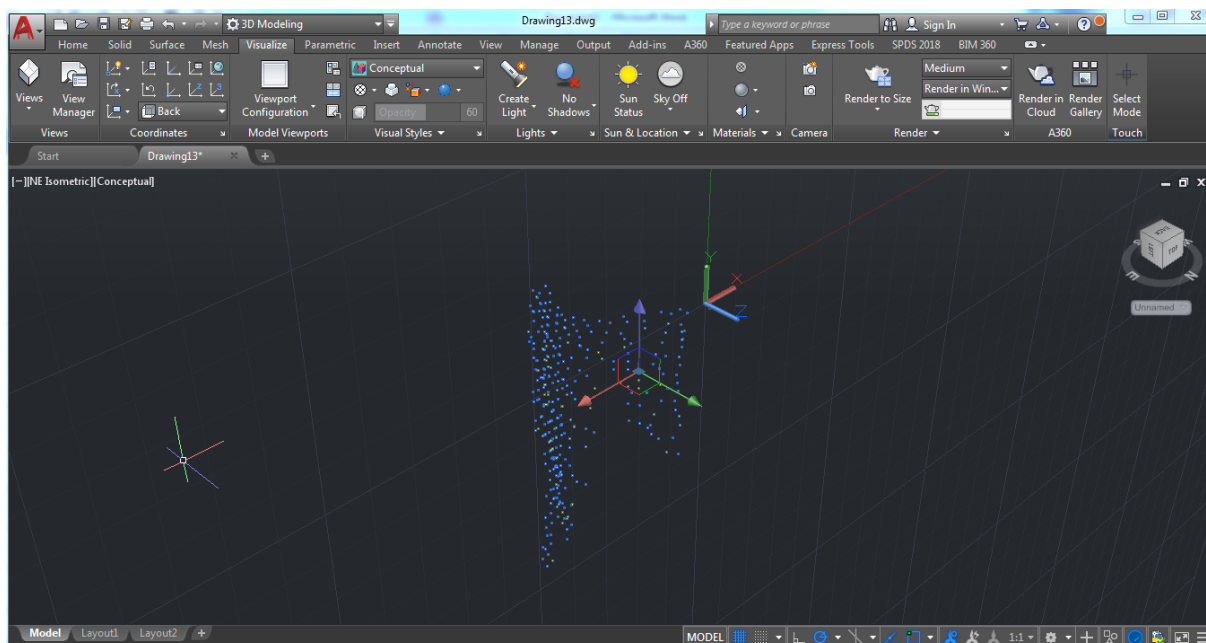


Figure 2.14 : vue NE du nuage de points de la charrue à soc carrelet mobile

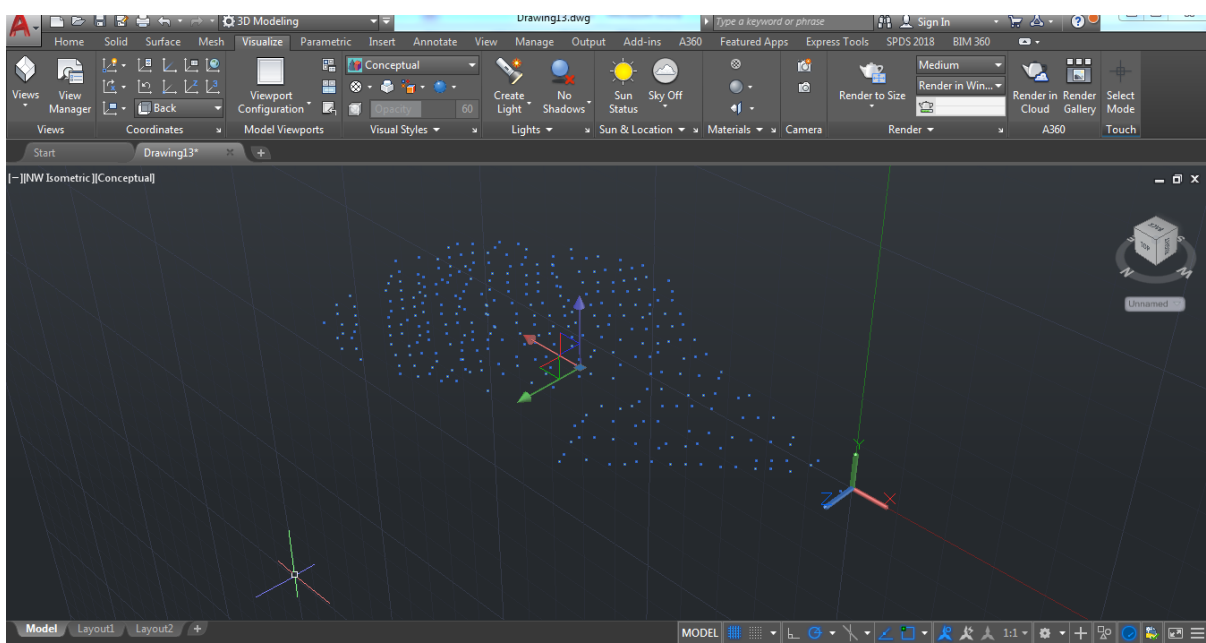


Figure 2.15 : vue NW du nuage de points de la charrue à soc carrelet mobile

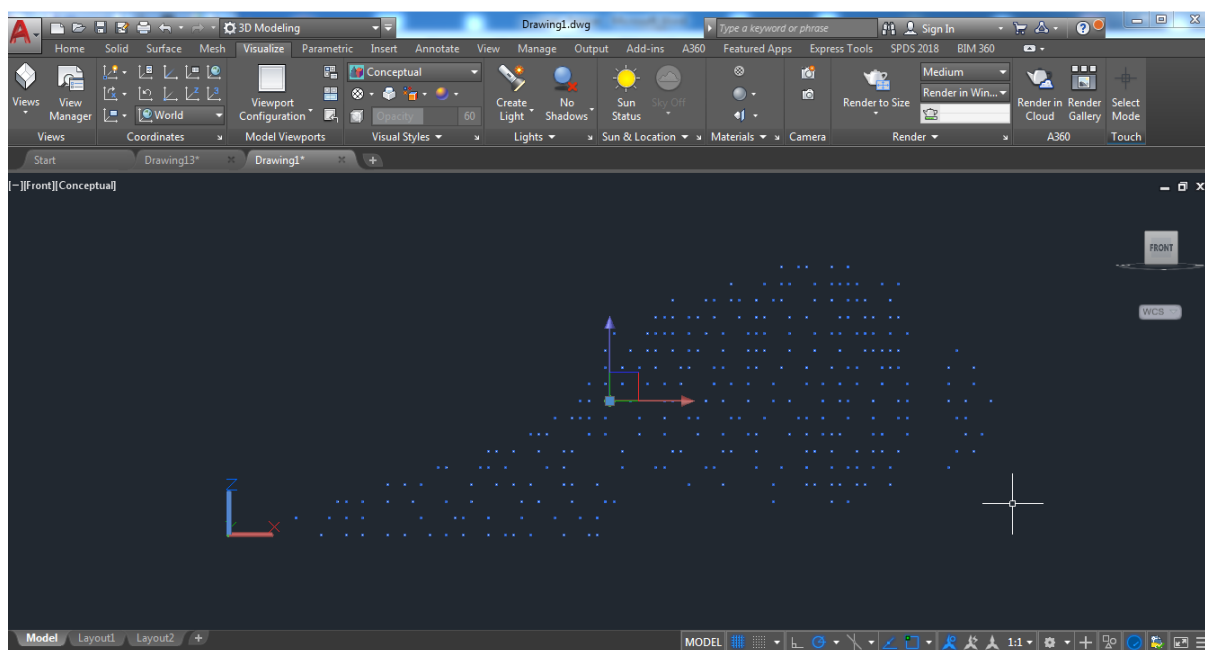


Figure 2.16 : vue de face du nuage de points de la charrue à soc bec de canard

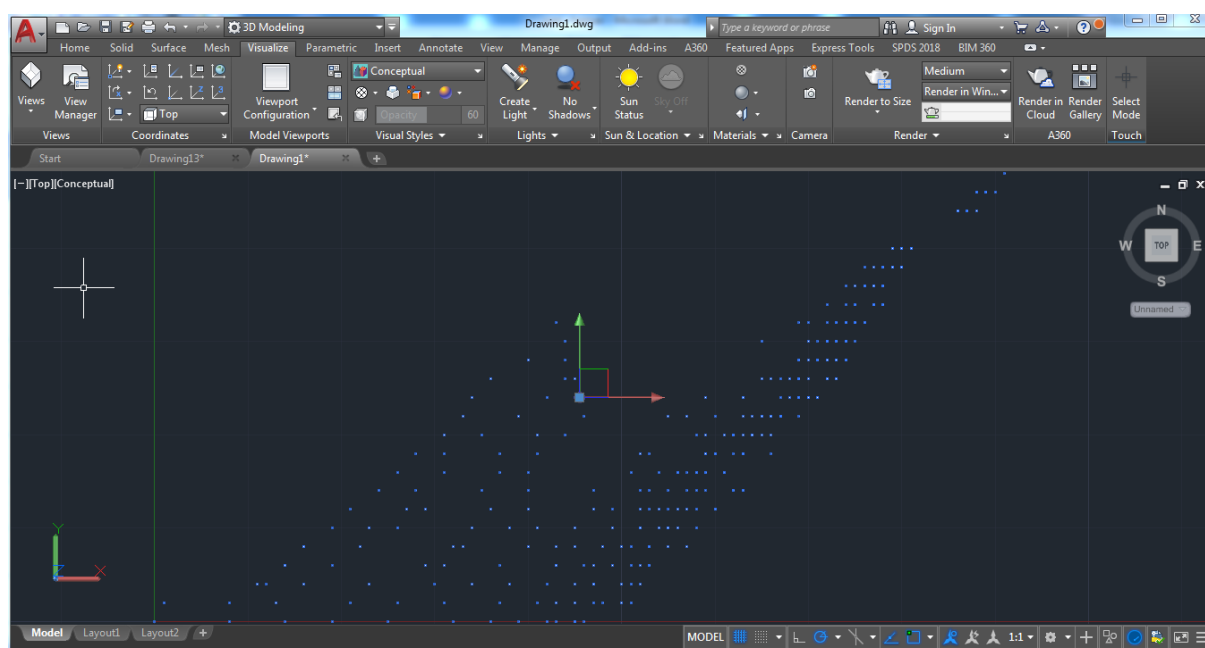


Figure 2.17 : vue de haut du nuage de points de la charrue à soc bec de canard

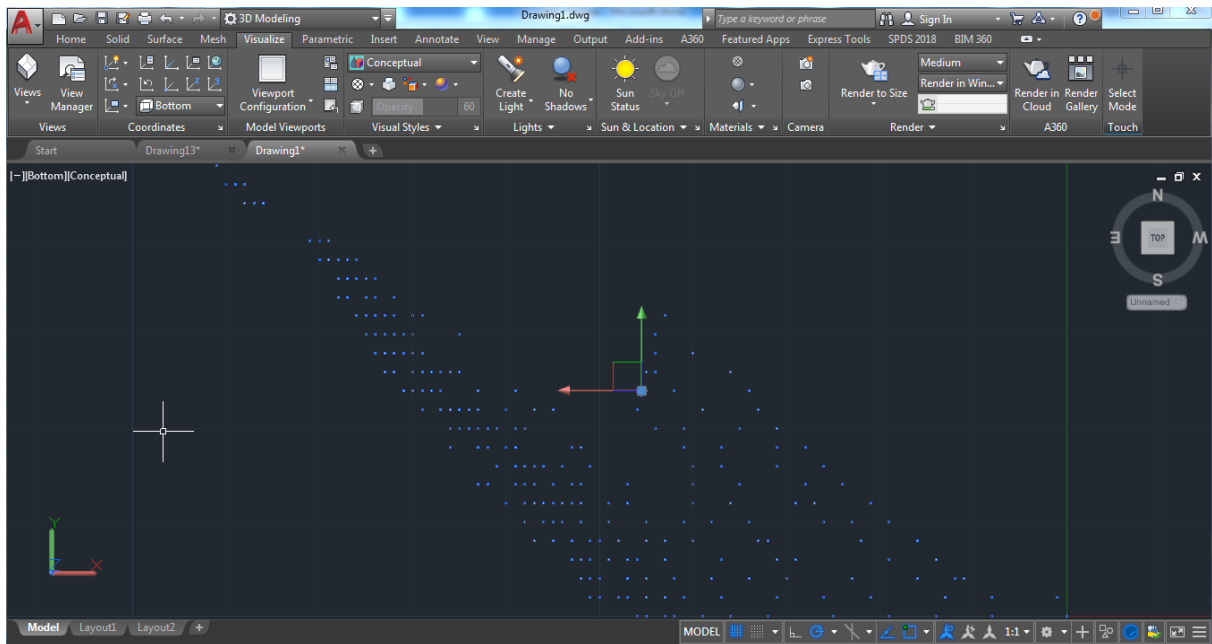


Figure 2.18 : vue de bas du nuage de points de la charrue à soc bec de canard

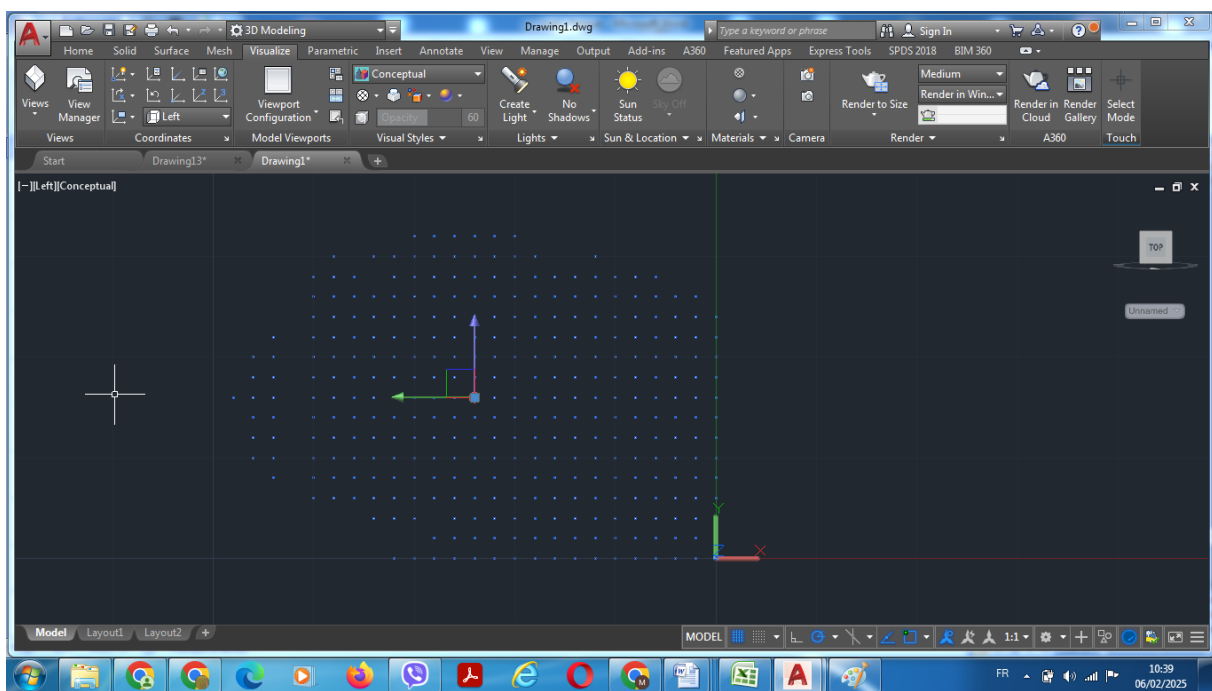


Figure 2.19 : vue de gauche du nuage de points de la charrue à soc bec de canard

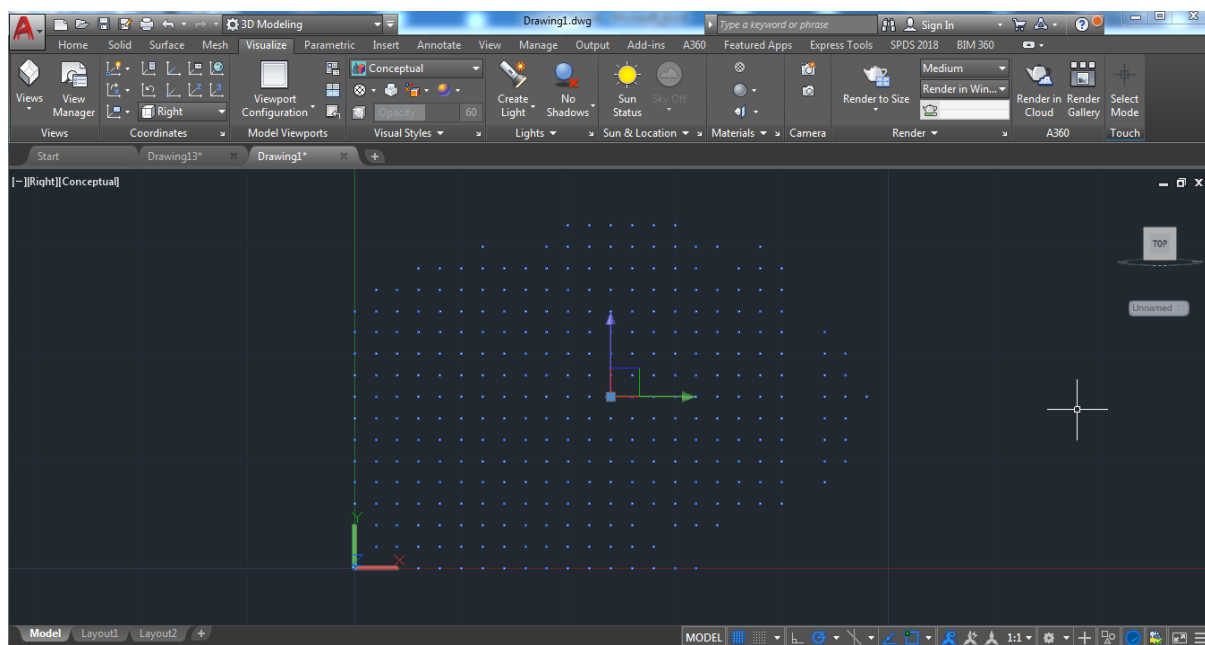


Figure 2.20 : vue de droite du nuage de points de la charrue à soc bec de canard

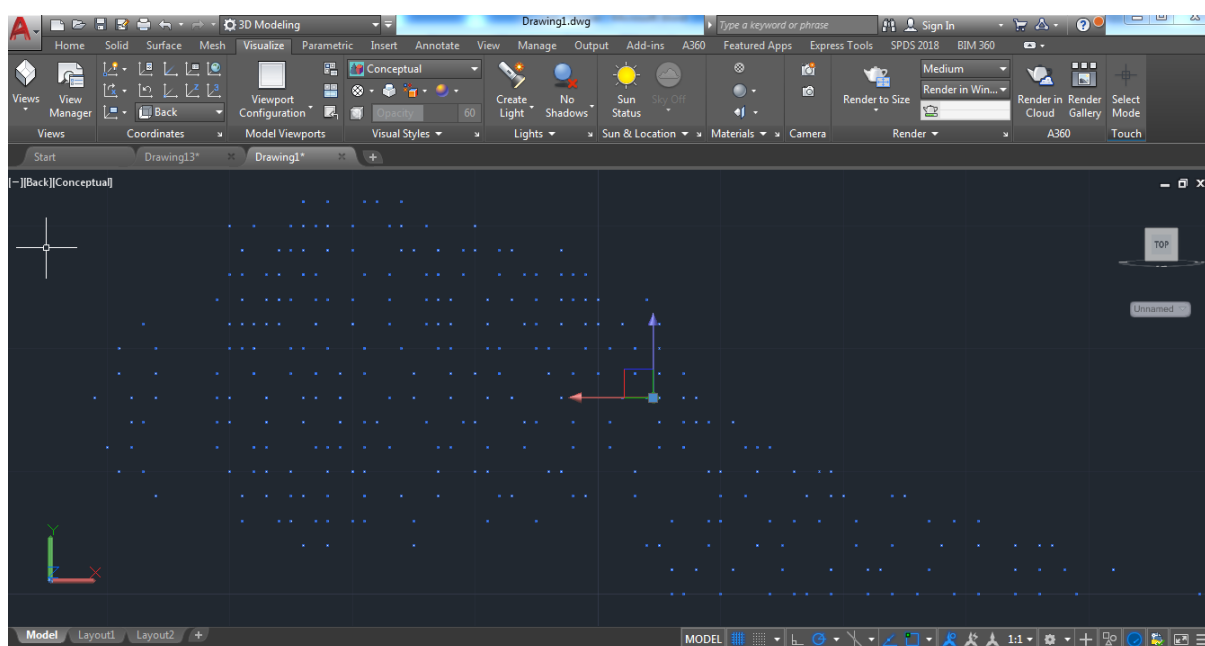


Figure 2.21 : vue arrière du nuage de points de la charrue à soc bec de canard

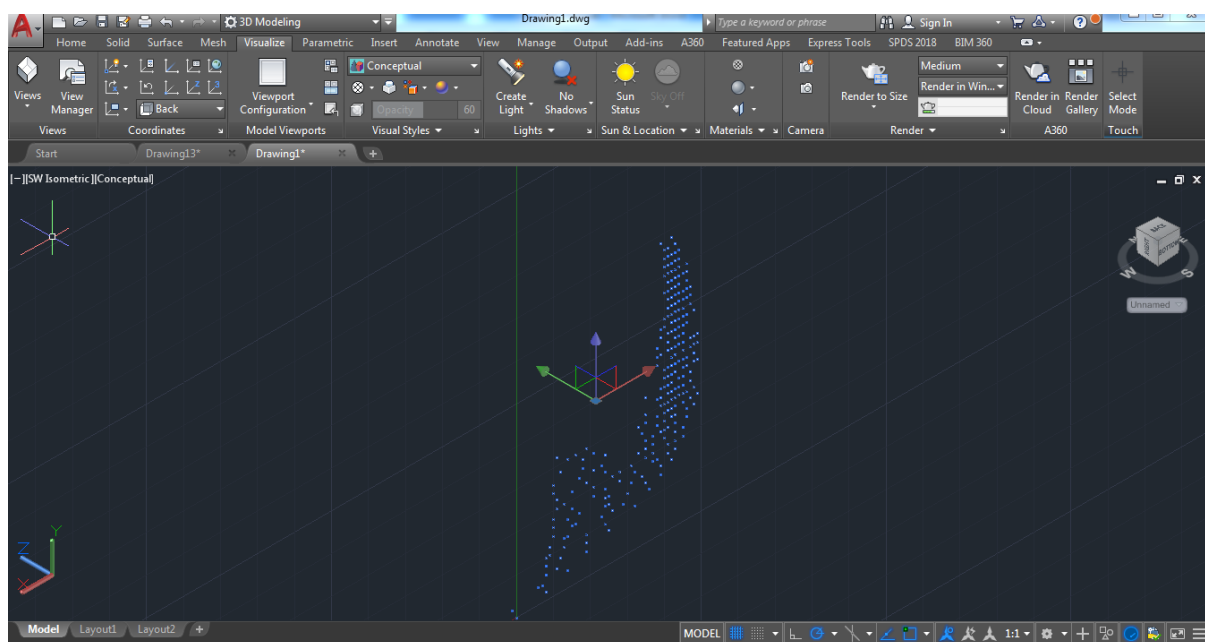


Figure 2.22 : vue SW du nuage de points de la charrue à soc bec de canard

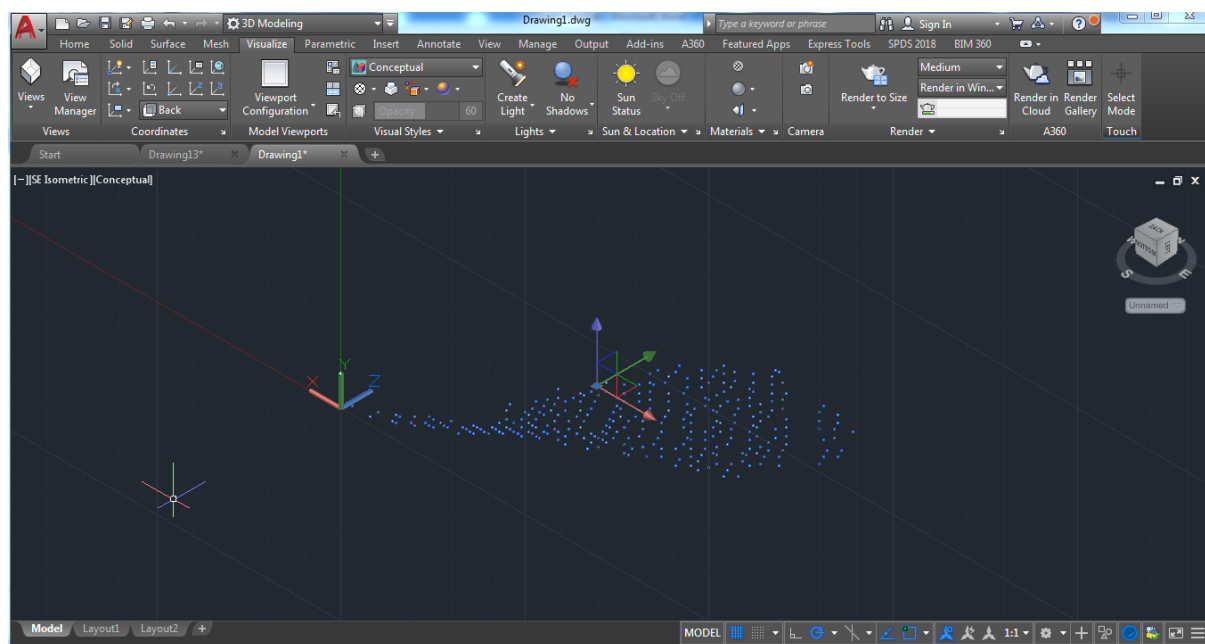


Figure 2.23 : vue SE du nuage de points de la charrue à soc bec de canard

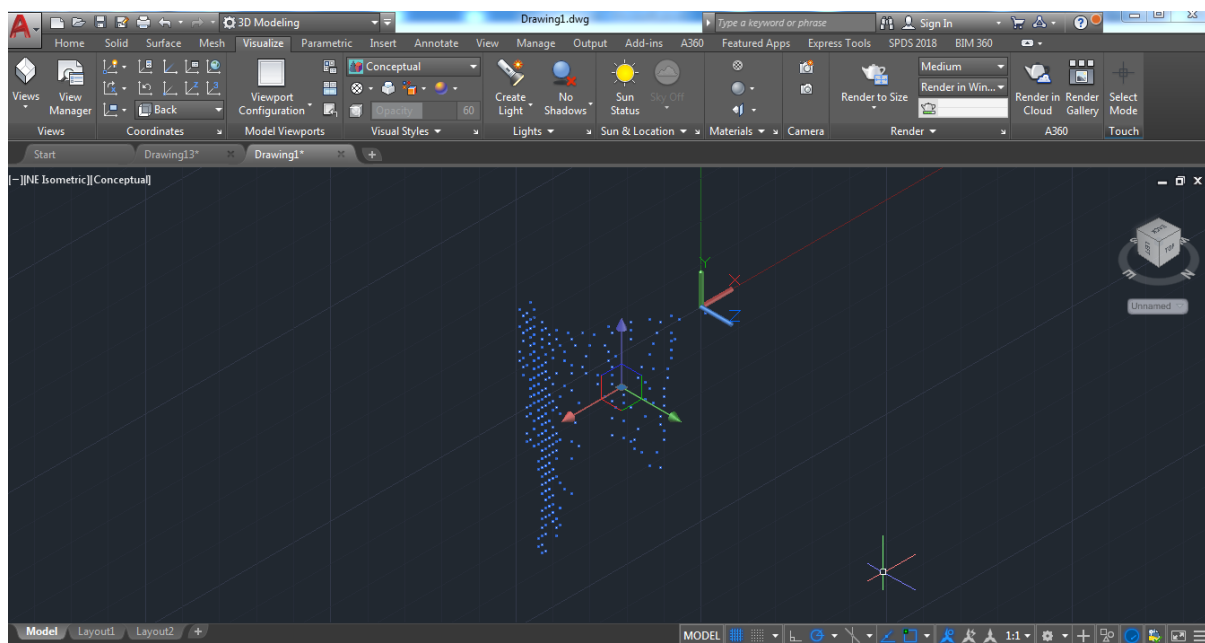


Figure 2.24 : vue NE du nuage de points de la charrue à soc bec de canard

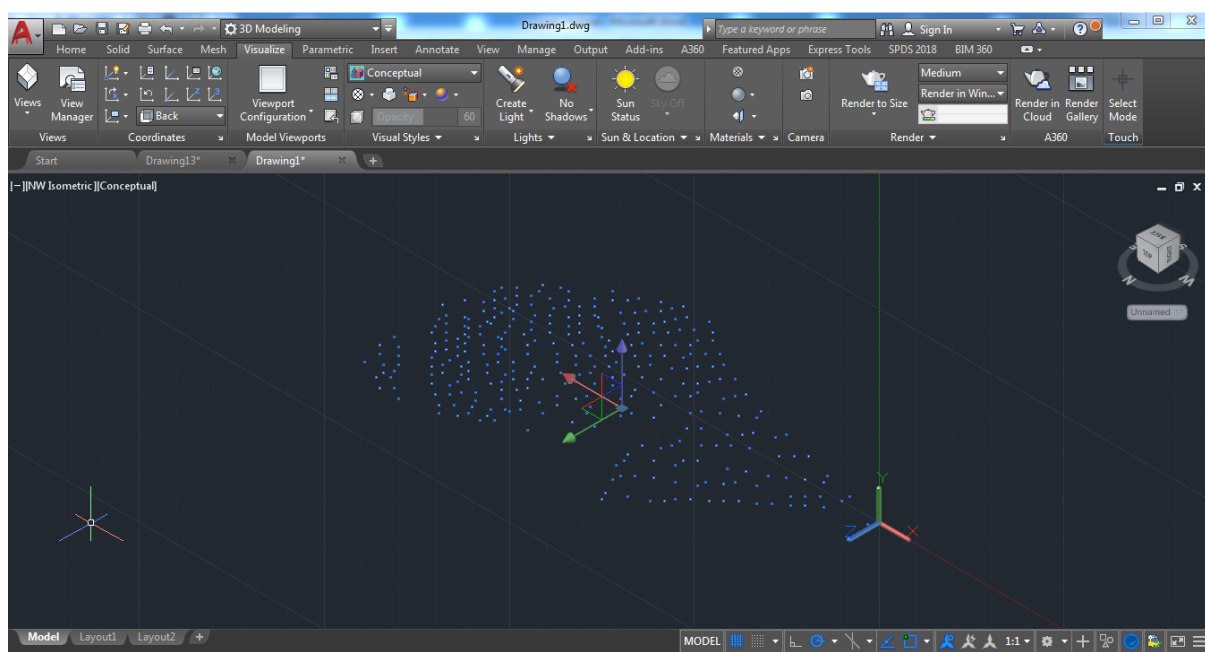


Figure 2.25 : vue NW du nuage de points de la charrue à soc bec de canard

2.3.1 Création de surface

La création de la surface active du corps de charrue repose sur la conversion d'un nuage de points en une surface précise. Ce processus est essentiel pour obtenir une représentation géométrique fidèle des objets à analyser, mais il présente également des défis importants. En effet, cette opération est particulièrement sensible aux erreurs susceptibles de survenir lors de la mesure des coordonnées. Ces erreurs peuvent provenir de diverses sources, telles que des imprécisions dans l'alignement des capteurs, des erreurs de calibration des équipements de mesure, ou encore des limitations des instruments utilisés. Lorsque de telles erreurs surviennent dans la phase de collecte des données, elles peuvent se répercuter sur la génération de la surface active, entraînant des résultats non désirés. Par exemple, si les erreurs ne sont pas corrigées, elles peuvent se traduire par des surfaces irrégulières, avec des contours « mats » ou mal définis, ce qui compromet la précision de la modélisation.

Afin de pallier ce problème, le logiciel AutoCAD offre un outil puissant : l'option Spline. Une spline est une courbe régulière qui passe par un ensemble de points donnés ou qui s'en approche de manière à minimiser l'erreur. Ces courbes sont particulièrement adaptées lorsque l'on souhaite modéliser des formes complexes ou non linéaires, telles que celles que l'on retrouve dans la surface active de la charrue dont la forme n'est pas simplement rectiligne. Le principal avantage des splines est qu'elles permettent de créer des transitions douces et régulières entre les points, ce qui est crucial pour éviter les irrégularités de contours et obtenir des surfaces bien lisses.

La commande SPLINE d'AutoCAD permet de créer des courbes NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines), qui sont des courbes définies par des fonctions mathématiques de degré élevé. Les NURBS sont extrêmement flexibles et peuvent décrire des formes complexes avec une grande précision. Dans la pratique, ces courbes sont souvent de degré 3, c'est-à-dire des splines cubiques, qui sont les plus couramment utilisées. Les splines cubiques sont particulièrement efficaces car elles permettent de modéliser des courbes qui passent par les points de données avec des transitions fluides et continues. Elles sont dérivées des premières techniques de modélisation, où des fines lattes en bois étaient utilisées pour créer des courbes en appliquant des poids à des points spécifiques sur la surface, une méthode ancestrale qui visait à créer des formes aussi régulières et douces que possible.

Pour donner un exemple plus concret, la commande SPLINE a été utilisée pour la création de la limite d'une allée en béton qui relie un passage à une maison. Dans ce cas, les splines ont permis de définir la forme de l'allée de manière fluide, en assurant que les bords soient réguliers et sans angles abrupts. C'est également grâce aux splines que des solides et des surfaces peuvent être créés dans le cadre de la modélisation 3D. Les splines permettent ainsi de générer des formes complexes, telles que des courbes, des bords ou des contours, qui sont essentiels pour créer des modèles réalistes en trois dimensions.

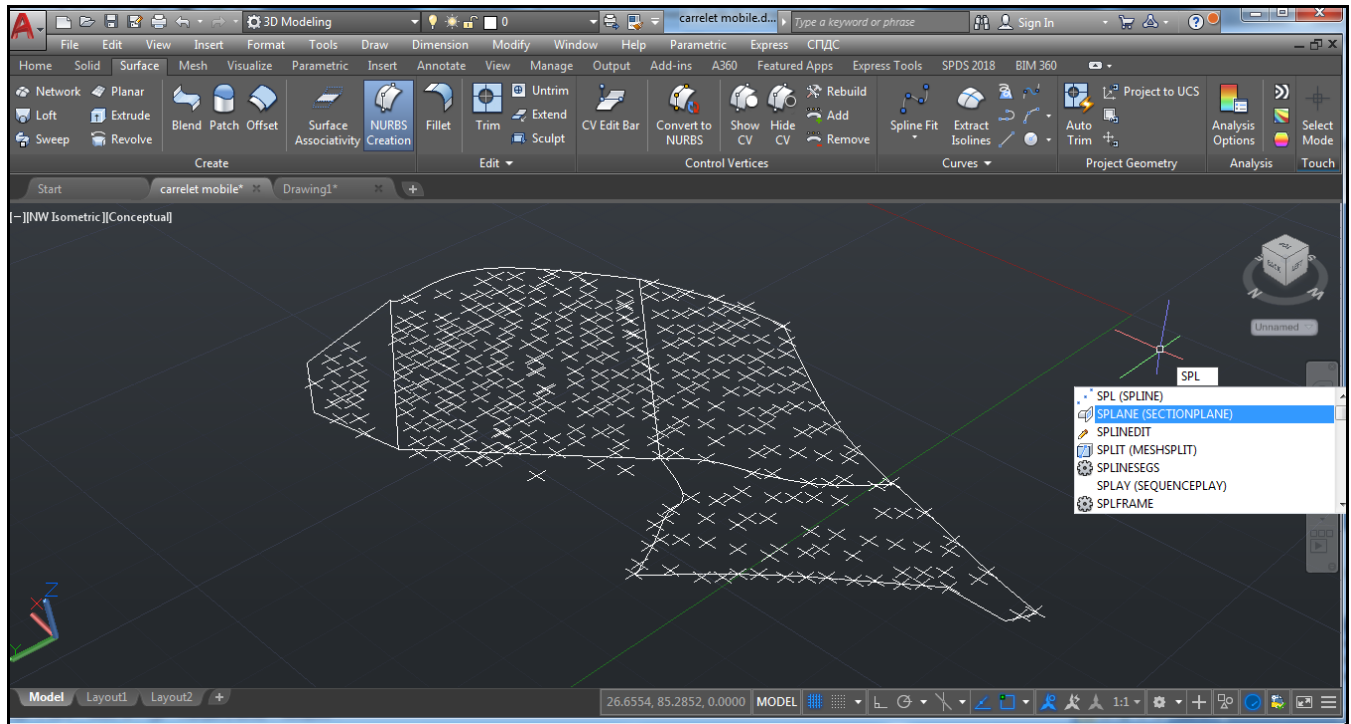


Figure 2.26 : transformation de nuage de points en spline

Après avoir appliqué cette méthode, l'opération a permis de générer un squelette ou une structure de base du corps de charrue, ce qui constitue une étape cruciale pour la création du modèle final. Le squelette ainsi créé offre une base solide sur laquelle d'autres opérations de modélisation, comme l'ajout de matériaux ou l'analyse du comportement mécanique, pourront être effectuées de manière plus précise. En somme, l'utilisation de splines dans AutoCAD a permis de convertir efficacement un ensemble de points en une surface continue, lissée et conforme aux exigences géométriques nécessaires pour l'analyse et la simulation des objets en question.

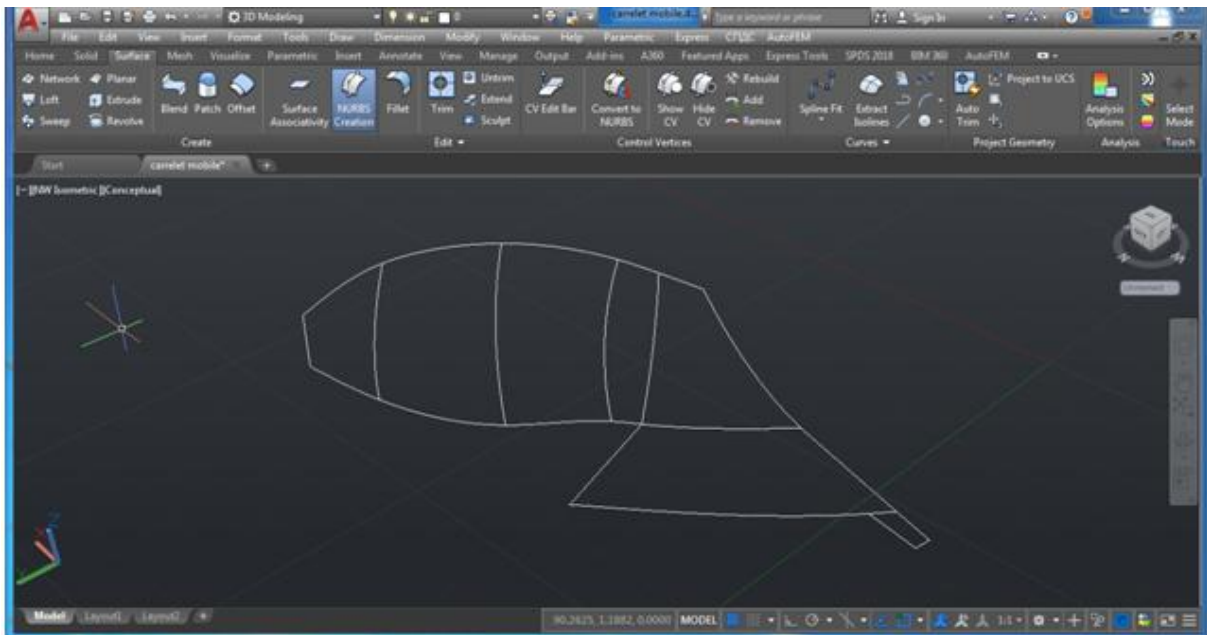


Figure 2.27 : Surfaçage à travers l'interface pour corps à carrel mobile

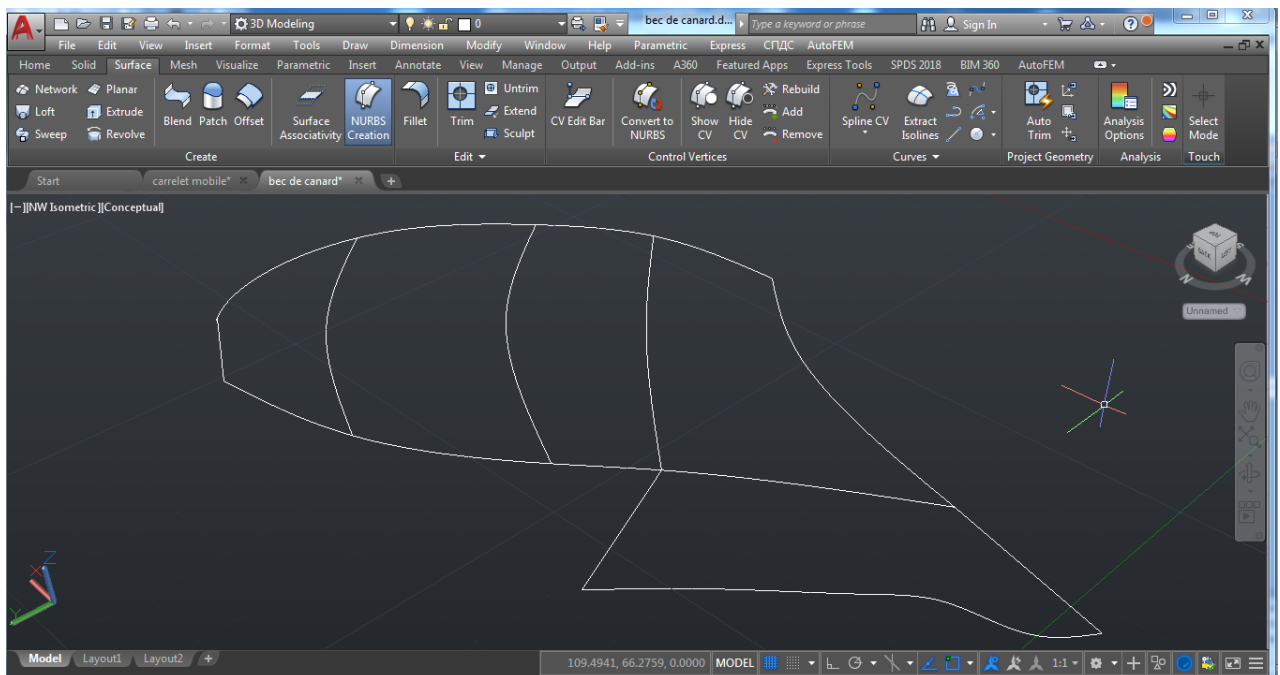


Figure 2.28 : Surfaçage à travers l'interface pour corps à bec de canard

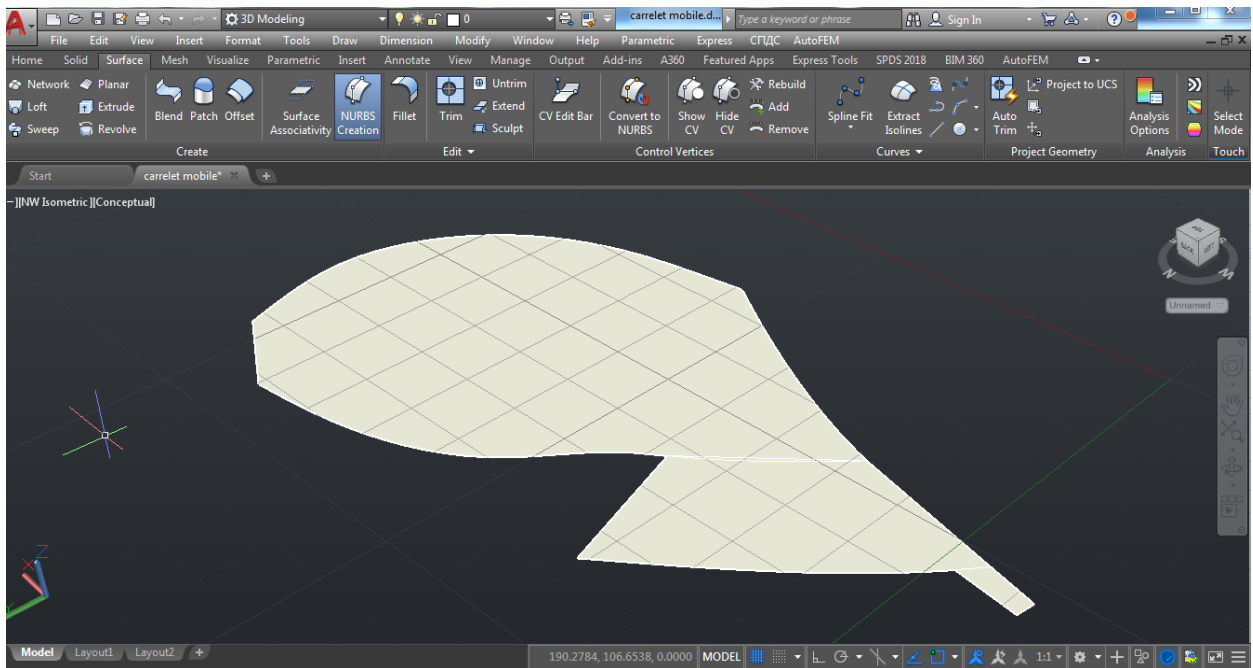


Figure 2.29 : Fin du surfacage pour corps de charrue à carrelot mobile

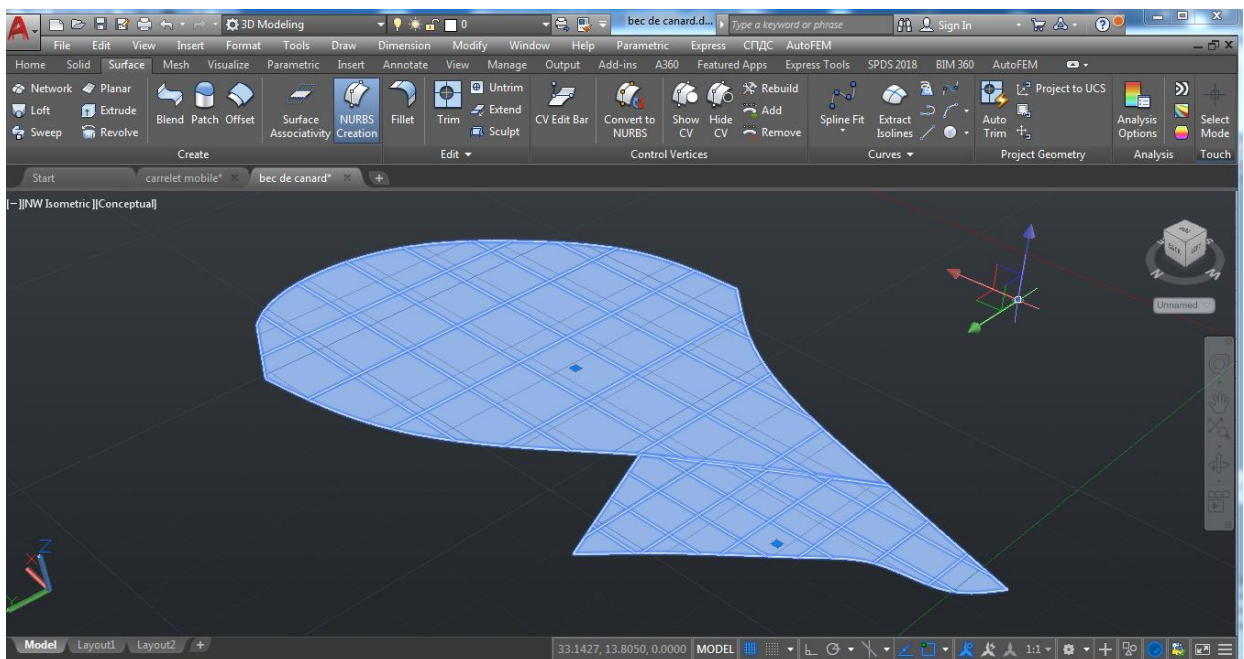


Figure 2.30 : Fin du surfacage pour corps de charrue à bec de canard

2.3.2 Création du solide

Pour achever la conception des deux corps de charrue, la dernière étape consiste à transformer les lots de surface en solide, nous avons choisi une épaisseur de 7mm qui correspond à l'épaisseur de l'acier utilisé pour la fabrication du corps de charrue. Les résultats de cette dernière étape qui consiste à la réalisation des deux corps de charrue sont illustrés par les figures suivantes:

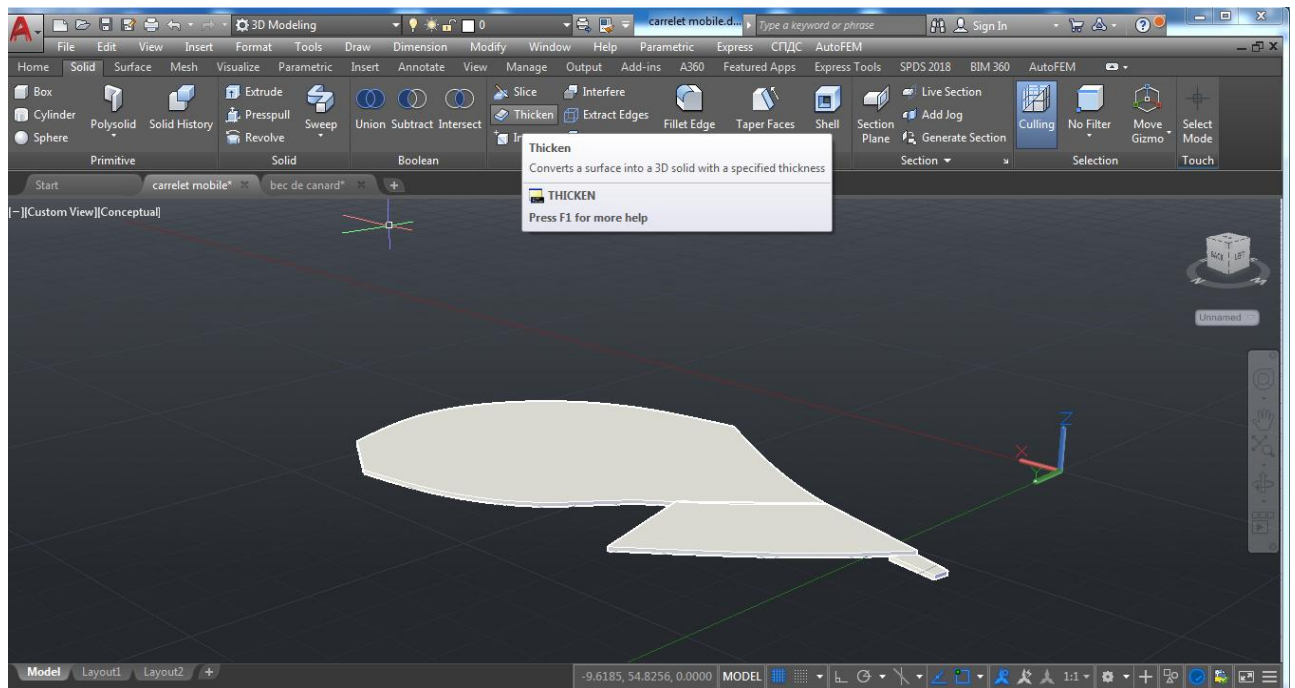


Figure 2.31 : opération de solidification charrue à bec de canard

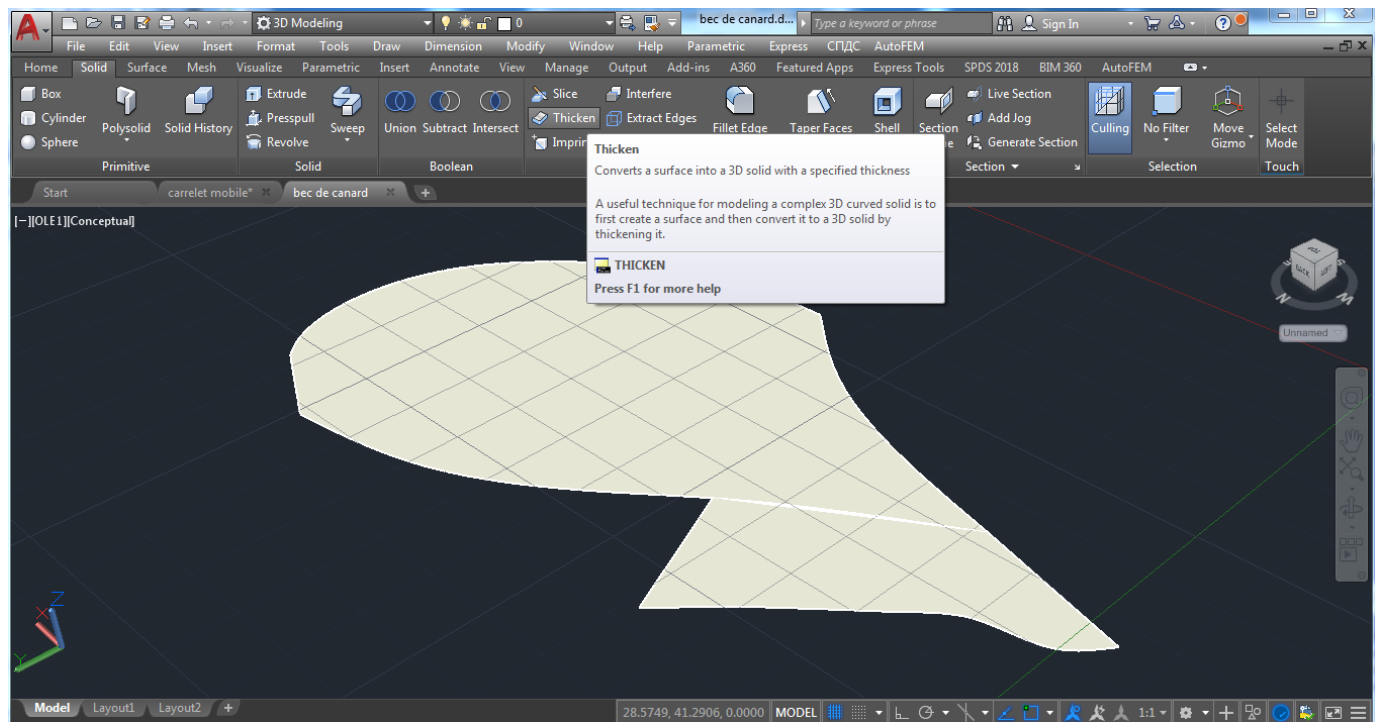


Figure 2.32 : opération de solidification charrue à bec de canard

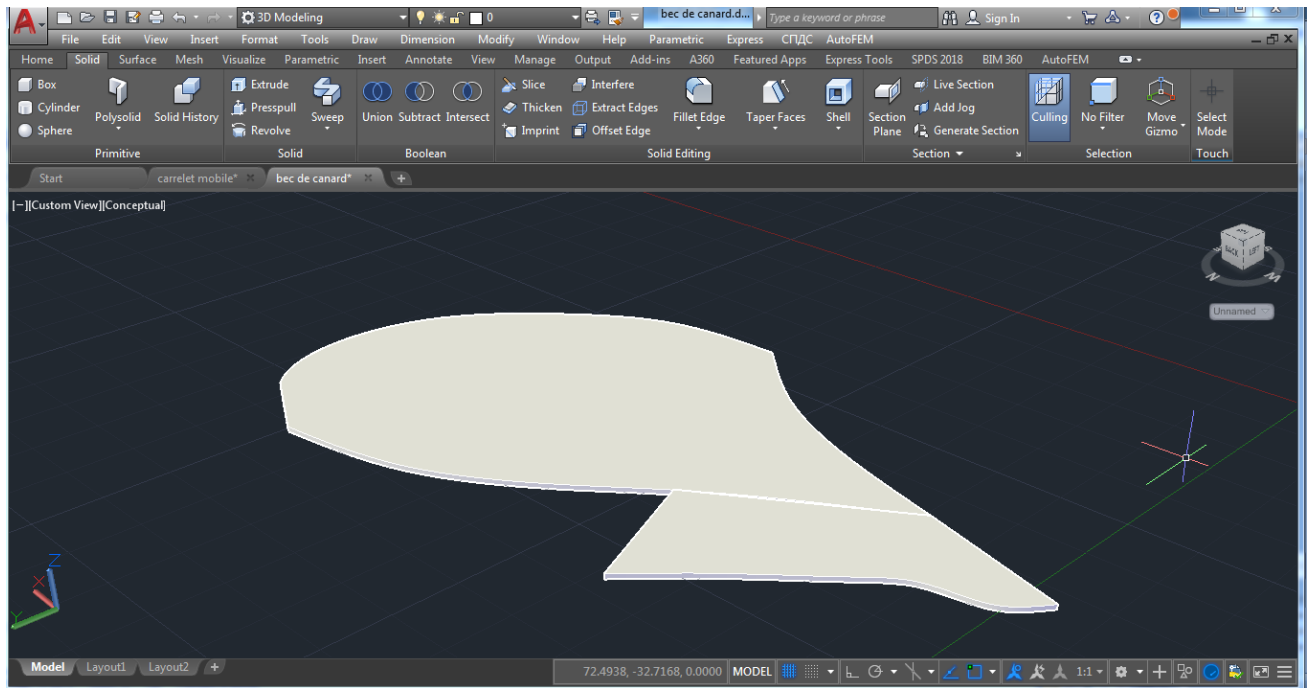


Figure 2.33 : Charrue à bec de canard solidifiée à épaisseur 7mm

2.3.3 Méthode d'analyse du comportement mécanique des deux surfaces actives

L'objectif de cette étude est de simuler numériquement le comportement mécanique de deux formes distinctes de corps de charrue à l'aide de la méthode des éléments finis (MEF). L'analyse vise plus particulièrement à représenter les efforts exercés par le sol sur les surfaces actives de la charrue au cours de l'opération de labour et à étudier la réponse mécanique de ces dernières sous différentes sollicitations.

Dans cette perspective, le recours à la méthode des éléments finis constitue une approche particulièrement adaptée, puisqu'elle permet de modéliser de manière théorique le comportement de surfaces de géométrie complexe soumises à des conditions de chargement variables. Cette méthode offre ainsi la possibilité d'analyser la répartition des contraintes, des déformations et des déplacements au niveau des différentes zones du corps de charrue, tout en tenant compte des sollicitations représentatives de l'interaction sol-outil.

La mise en œuvre de l'analyse par éléments finis repose principalement sur trois étapes successives : la génération du maillage de la géométrie étudiée, la définition des propriétés du

matériau constituant les pièces analysées, puis l'application des charges et des conditions aux limites nécessaires à la simulation du comportement mécanique de la structure.

2.3.3.1 Maillage

Dans une simulation par éléments finis, le produit est modélisé par un maillage, c'est-à-dire un ensemble de nœuds et d'éléments. Le choix du maillage détermine notamment les fonctions de base qui représentent les champs de déplacement, et a donc une influence considérable sur les résultats. Dans une simulation par éléments finis, l'interaction du produit avec son environnement est elle aussi modélisée, sous la forme d'efforts et de déplacements nodaux. Pour assurer la pertinence de la modélisation, la création du maillage doit suivre certains principes fondamentaux et intégrer quatre éléments clés : l'ajustement de la géométrie en fonction de la simulation considérée, la sélection des types d'éléments, la génération et la validation du maillage, ainsi que la prise en compte de l'environnement extérieur (ces trois derniers aspects sont abordés dans d'autres ressources). Les illustrations ci-dessous présentent le maillage des deux types de corps de charrue analysés :

:

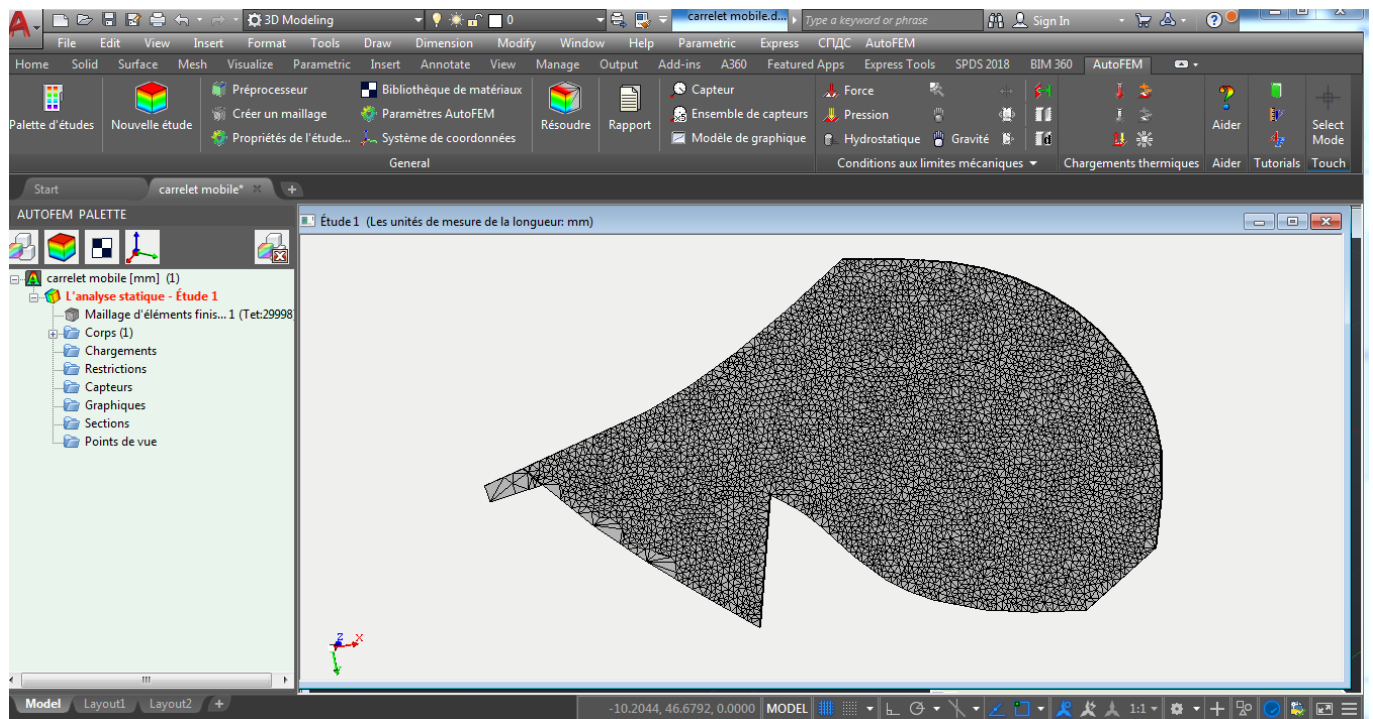


Figure 2.34 : Maillage de coupe de charrue carrelet

Quantité de nœud	9639
Quantité d'éléments	29998
Quantité de polygones	212
Quantité de pointes	108

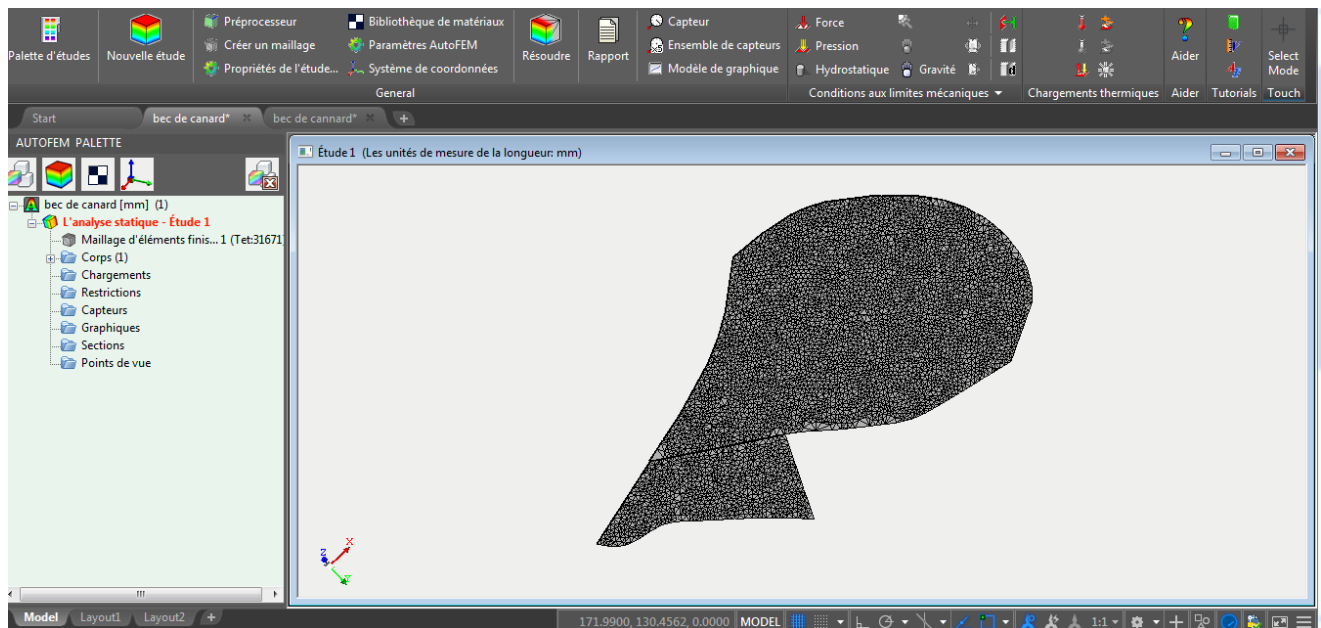


Figure 2.35 : Maillage de coupe de charrue bec de canard

Quantité de nœud	10181
Quantité d'éléments	31671
Quantité de polygones	272

Quantité de pointes	138
---------------------	-----

Les résultats de maillage obtenus avec AutoCAD Mechanical 2018 pour deux types de corps de charrue l'un à carrelet mobile et l'autre à bec de canard, présentent des différences significatives, révélant des aspects distincts de leur conception et de leur comportement mécanique.

Pour la quantité de nœuds :

- Charrue à bec de canard : 10 181 nœuds
- Charrue à carrelet mobile : 9 639 nœuds

Un nombre plus élevé de nœuds indique une maille plus fine, améliorant la précision des analyses, notamment pour les zones à contraintes élevées. La charrue à bec de canard montre une plus grande densité de maillage, suggérant une complexité accrue de sa géométrie.

Pour la quantité d'éléments :

- Bec de canard : 31 671 éléments
- Carrelet mobile : 29 998 éléments

Les éléments représentent les subdivisions de la structure pour l'analyse. Un plus grand nombre d'éléments implique une modélisation plus détaillée, essentielle pour capturer les contraintes sur des surfaces complexes.

Pour la quantité de polygones et de pointes :

- Bec de canard : 272 polygones, 138 pointes
- Carrelet mobile : 212 polygones, 108 pointes

Un nombre plus élevé de polygones et de pointes traduit une surface plus détaillée, révélant des variations géométriques plus complexes sur la charrue à bec de canard.

La charrue à bec de canard, avec un maillage plus dense et détaillé, semble présenter une géométrie plus complexe, potentiellement adaptée à des conditions de travail spécifiques, tandis que la charrue à carrelet mobile offre une structure plus épurée, suggérant une robustesse adaptée à d'autres types de sols. Ces résultats sont essentiels pour l'analyse de contraintes, l'optimisation des formes et l'amélioration de la durabilité des outils aratoires.

2.3.3.2 Matériaux

Les matériaux utilisés doivent convenir aux types de terrain sur lesquels ils sont utilisés. Afin de garantir la qualité du travail, il faut vérifier certaines caractéristiques de l'outil employé,

comme le type d'acier utilisé pour sa fabrication. En effet, il existe différents types d'acier dont la dureté est mesurée sur l'échelle de Rockwell. L'unité étant le Hrc, plus il est élevé, plus l'acier est résistant.

L'acier est un matériau de construction très sollicité dans le monde de l'agriculture. Sa dureté et sa résistance permettent de l'utiliser pour travailler la terre. Ce type de matériau subit plusieurs étapes avant d'arriver à sa version finale. La qualité de la pièce en acier dépend essentiellement de la manière dont elle est fabriquée.

Les processus de fabrication des pièces d'usure sont faits de manière à promouvoir leur efficacité. Entre autres : Les études ; La découpe ; Le forgeage ; Le laminage ; Le traitement thermique ; L'usinage ; La peinte.

Certains fabricants de pièces d'usure ont recours à des contrôles afin de s'assurer de la qualité de leurs pièces.

L'innovation dans le domaine de la conception a permis de découvrir des types d'acier qui conviennent très bien aux pièces d'usure comme les socs. À savoir : le Triplex et le Bore.

Le triplex est un type d'acier qui est très sollicité pour la conception de soc. Il est constitué de 3 couches d'acier et présente une excellente résistance à l'usure. Haut de gamme, le triplex possède une dureté de 64 Hrc d'où une résistance à la rupture de 300 à 312 kg/mm². Les versoirs en triplex sont conçus selon 4 étapes importantes. Tout d'abord, la découpe qui est souvent réalisée avec commande numérique. Ensuite le poinçonnage, suivi de la mise en forme qui est réalisée à chaud afin d'augmenter la longévité de la pièce. Enfin la finition durant laquelle l'outil est grenaillé, peint et poli.

Le BORE est un type d'acier qui est réputé pour sa très bonne qualité. Il a une dureté de 48/50 Hrc sur toute l'épaisseur. La résistance à la rupture du BORE est de 145 kg/m² et présente une bonne résistance à l'usure. De nombreuses pièces d'usure sont conçues avec ce type d'acier.

Le Cémenté est un acier durci de façon superficielle grâce à l'échauffement du carbone. Ce traitement thermique est appelé cémentation. La teneur élevée en carbone augmente la solidité de ce type d'acier.

En Algérie, les pièces travaillantes des charrues à socs sont généralement fabriquées à partir d'un acier allié de type DIN 42CrMo4, en raison de ses propriétés mécaniques adaptées aux fortes sollicitations auxquelles sont soumises ces pièces au cours du labour. Ce matériau est notamment utilisé dans la fabrication industrielle de certains équipements agricoles produits par MAGI et ENPMA.

Dans le cadre de cette étude, le choix du matériau s'est donc porté sur l'acier 42CrMo4, afin de rester au plus près des conditions réelles de fabrication et d'utilisation des corps de charrue étudiés. Le matériau correspondant a été sélectionné dans la bibliothèque de AutoCAD Mechanical 2018, en retenant les caractéristiques mécaniques les plus proches de celles des aciers effectivement employés dans la pratique. Ces propriétés ont ensuite été utilisées comme données d'entrée pour la modélisation et l'analyse par la méthode des éléments finis.

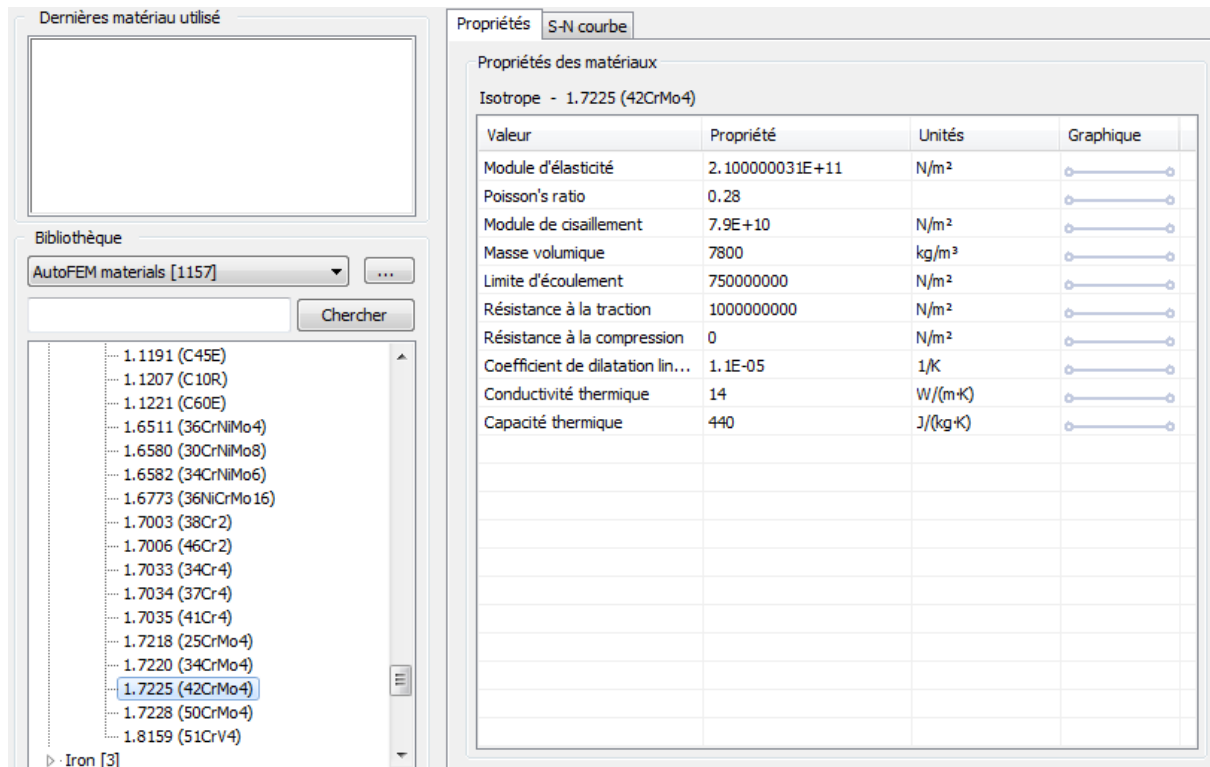


Figure 2.36 : Propriété des matériaux utilisés

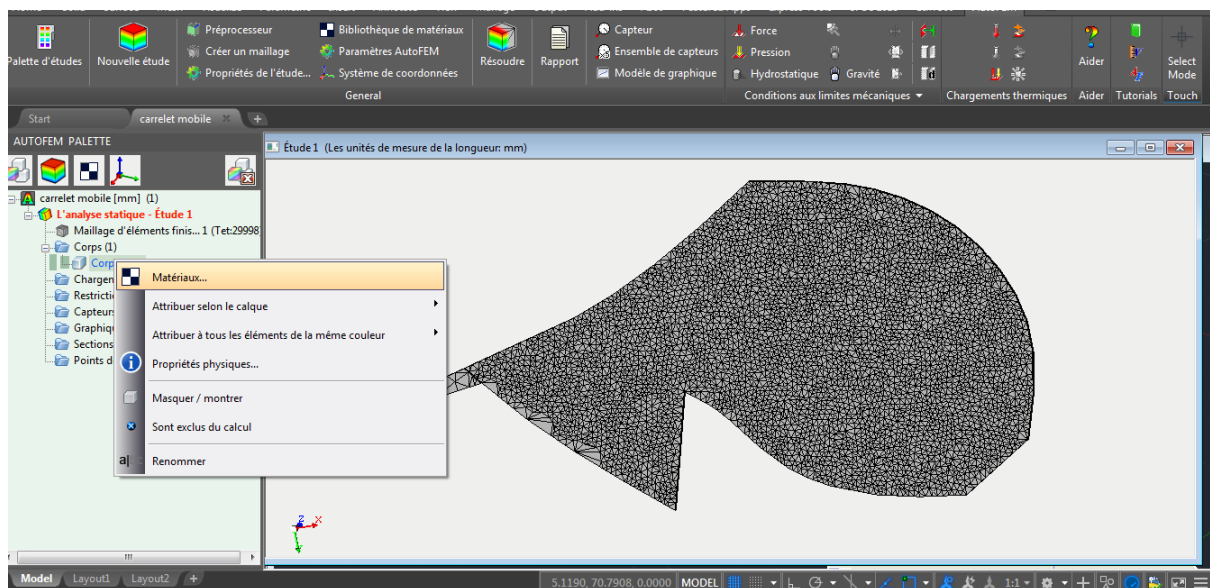


Figure 2.37 : Application du choix du matériau pour les deux corps de charrue

2.3.3.3 Application des charges

Selon Kuczewski (1978), cité par Amara (2007), le point d'application de l'effort de traction peut être localisé à une hauteur correspondant au tiers de la profondeur de travail, mesurée à partir du fond du labour, et à une distance équivalente au tiers de la longueur de la partie affûtée du soc à partir de la pointe du corps de charrue. Sur cette base, ce point a été déterminé pour les deux corps de charrue étudiés en considérant une profondeur de travail de 0,25 m.

Afin d'évaluer le comportement mécanique des surfaces actives des deux corps de charrue, plusieurs niveaux de sollicitation ont ensuite été appliqués au modèle numérique. Après la mise en place des capteurs virtuels et la définition des conditions d'appui, le corps de charrue a été immobilisé au niveau de trois points de fixation représentant la liaison avec l'étau. Des efforts de 200, 400 et 600 daN ont alors été appliqués selon la direction d'avancement de l'outil, correspondant à l'axe des abscisses. Le chargement a été imposé au niveau de la pointe du soc afin de reproduire les sollicitations mécaniques auxquelles la pièce est soumise au cours du travail du sol.

Le choix de ces trois niveaux d'effort permet d'analyser la réponse des deux corps de charrue sous des conditions de sollicitation faibles, moyennes et élevées. La valeur de 400 daN a été retenue comme référence, car elle correspond à l'effort moyen considéré pour un corps de charrue fonctionnant dans des conditions normales de travail, avec une profondeur d'environ 25 cm et une largeur de travail de 35 cm. Les conditions du sol sont supposées proches de l'état optimal pour le labour, avec une teneur en eau voisine de la capacité au champ, estimée dans cette étude à environ 18 %. Les valeurs de 200 et 600 daN permettent ainsi d'encadrer cette situation de référence et d'examiner l'évolution des contraintes, des déformations et des déplacements lorsque l'intensité de la charge varie.

Concernant les points de fixation (appui fixe), nous avons schématisé pour les deux corps de charrue sur les figures suivants :

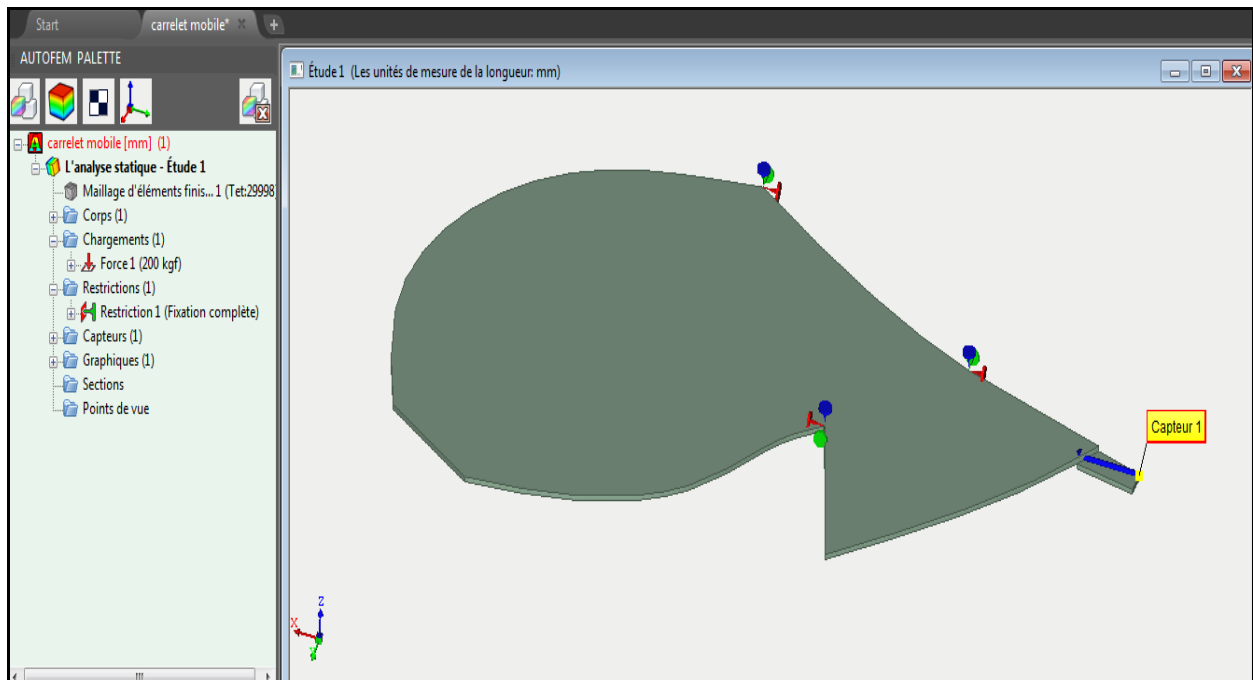


Figure 2.38 : Fixation du point de fixation de la force et les capteurs pour charrue à carrelet mobile

2.4 Résultats de la simulation

Une fois l'ensemble des paramètres précédemment définis — géométrie, maillage, propriétés du matériau, conditions aux limites et chargements — intégrés dans le module de simulation par éléments finis sous AutoCAD Mechanical, le calcul numérique est lancé à l'aide de la commande « Résoudre ». Cette opération permet au logiciel de traiter le système d'équations associé au modèle et de générer les résultats mécaniques correspondants. À l'issue du calcul, une synthèse des principales grandeurs obtenues est fournie, notamment les valeurs maximales et minimales des contraintes, des déformations et des déplacements pour chacun des deux corps de charrue étudiés. Ces résultats servent ensuite de base à l'analyse comparative de leur comportement mécanique sous les différentes intensités de charge appliquées.

2.4.1 Analyse de la contrainte de Von mises (R_e), coefficient de sécurité (K), la déformation équivalente (ϵ_{equ}), et le déplacement (d) résultant sur le corps de charrue à carrelet

La variation des différentes contraintes sur la surface active du soc à carrelet est représentée dans les figures suivantes :

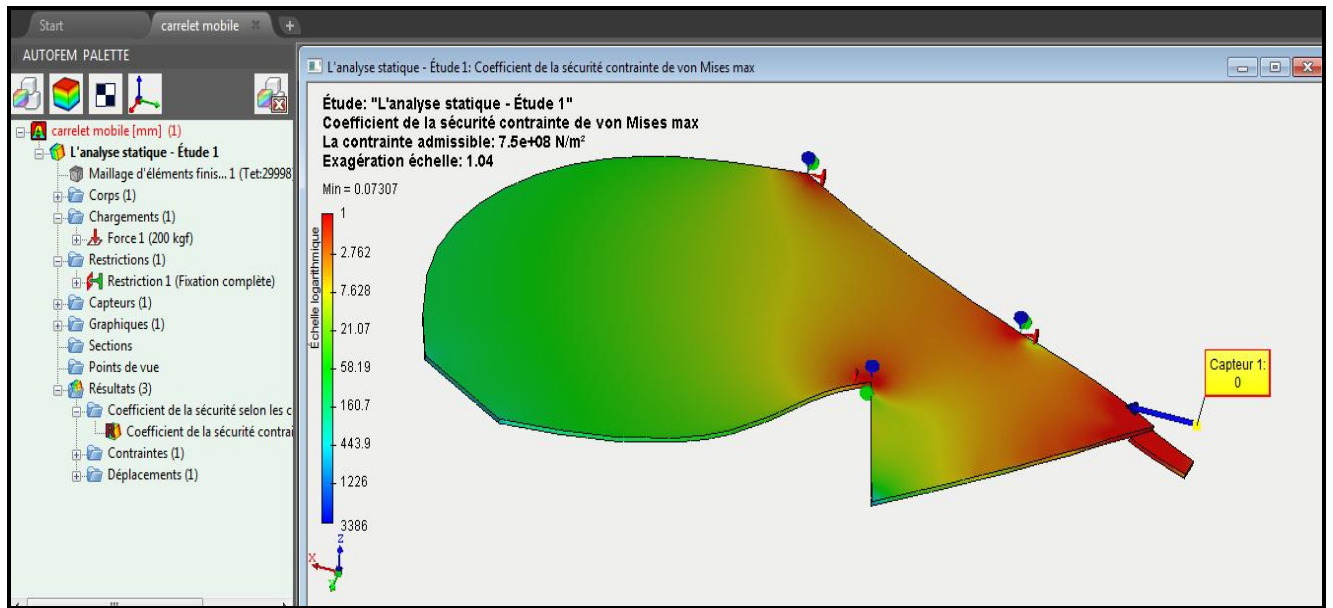


Figure 2.39 : Variation du coefficient de sécurité de la contrainte Von Mises max sous la force 200 daN

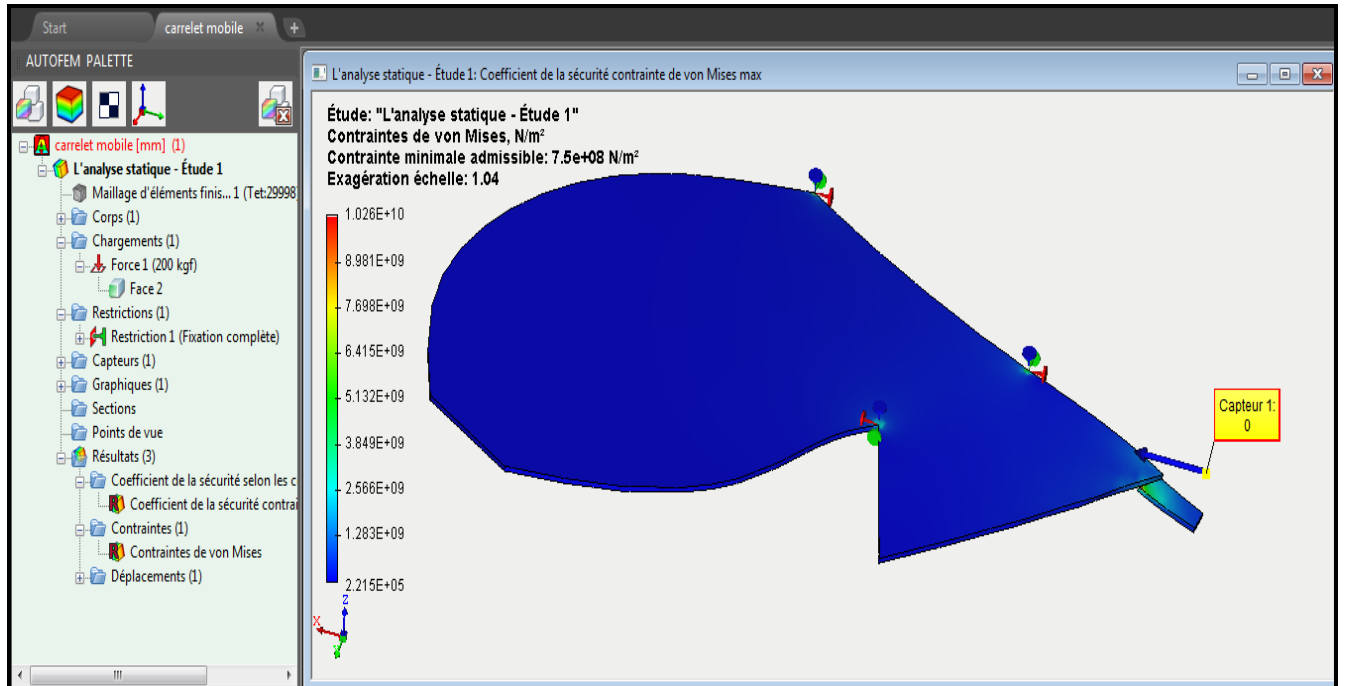


Figure 2.40 : Variation de la contrainte Von Mises sur la surface active sous la force 200 daN

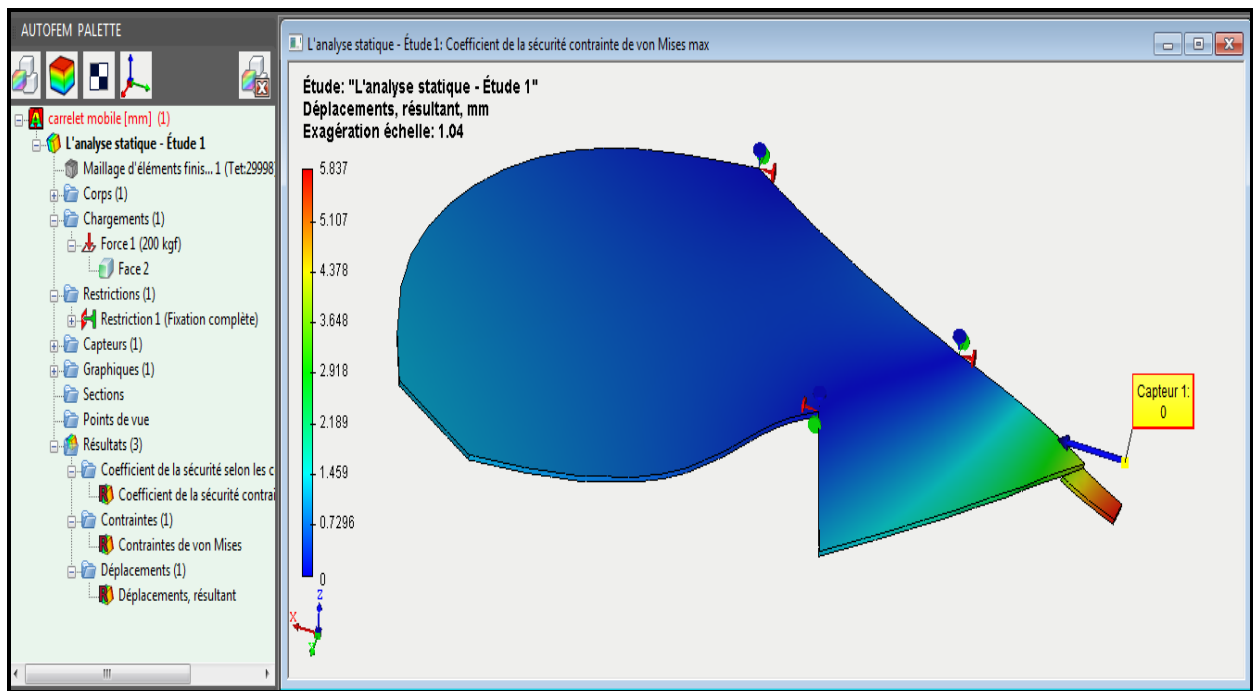


Figure 2.41 : Variation du déplacement résultant sur la surface active sous la force 200 daN

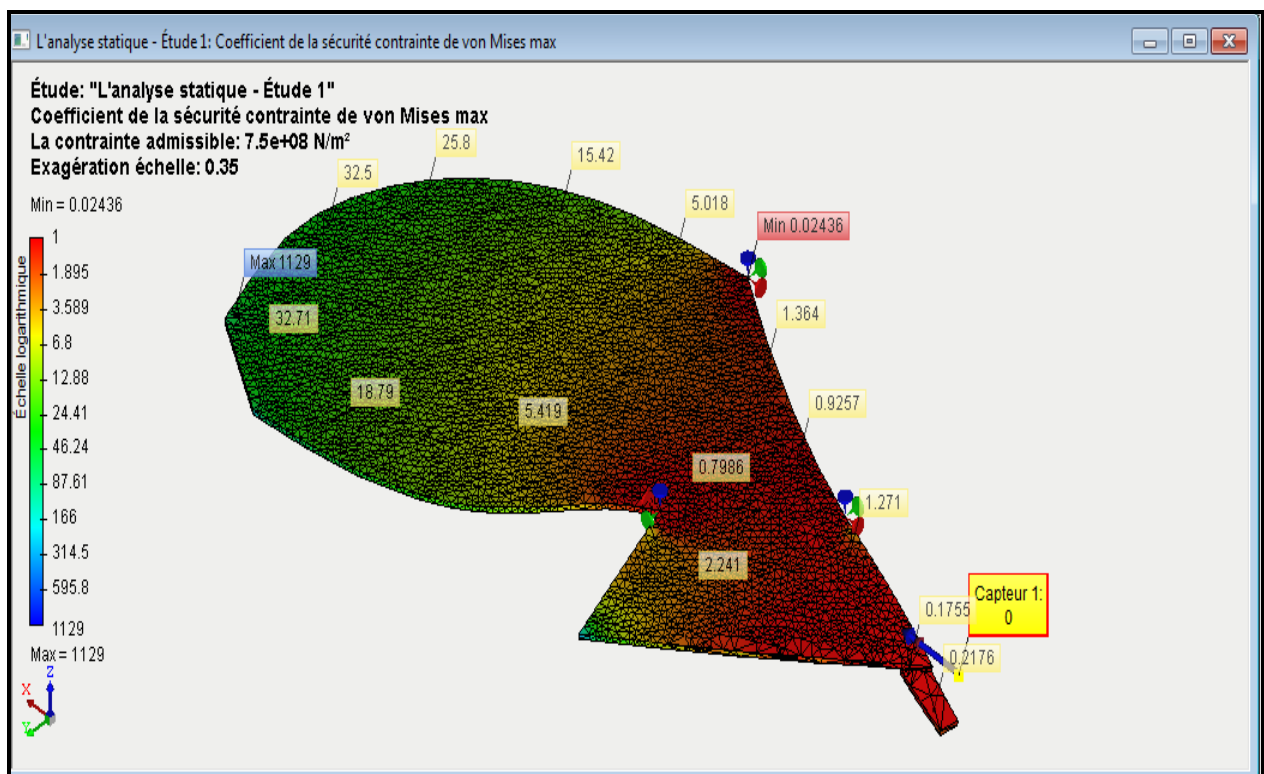


Figure 2.42 : Variation du coefficient de sécurité de la contrainte Von Mises sous la force 400 daN

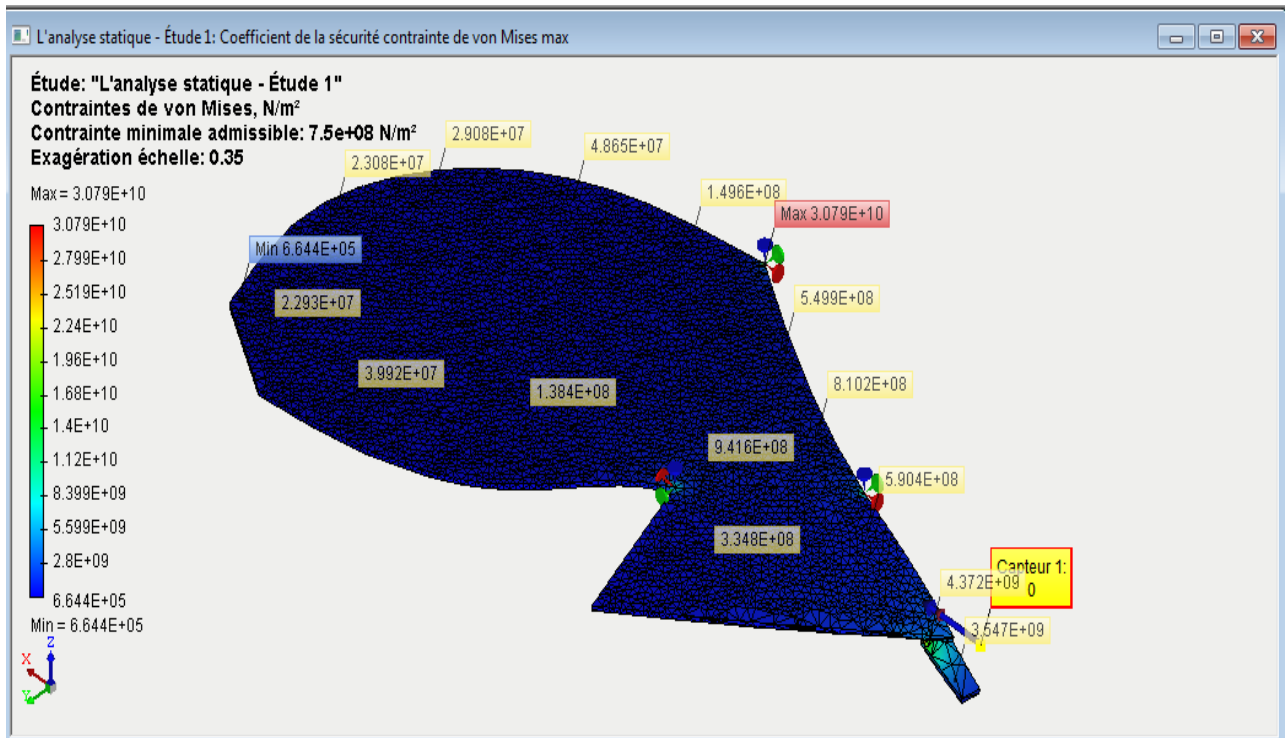


Figure 2.43 : Variation de la contrainte Von Mises sur la surface active sous la force 400 daN

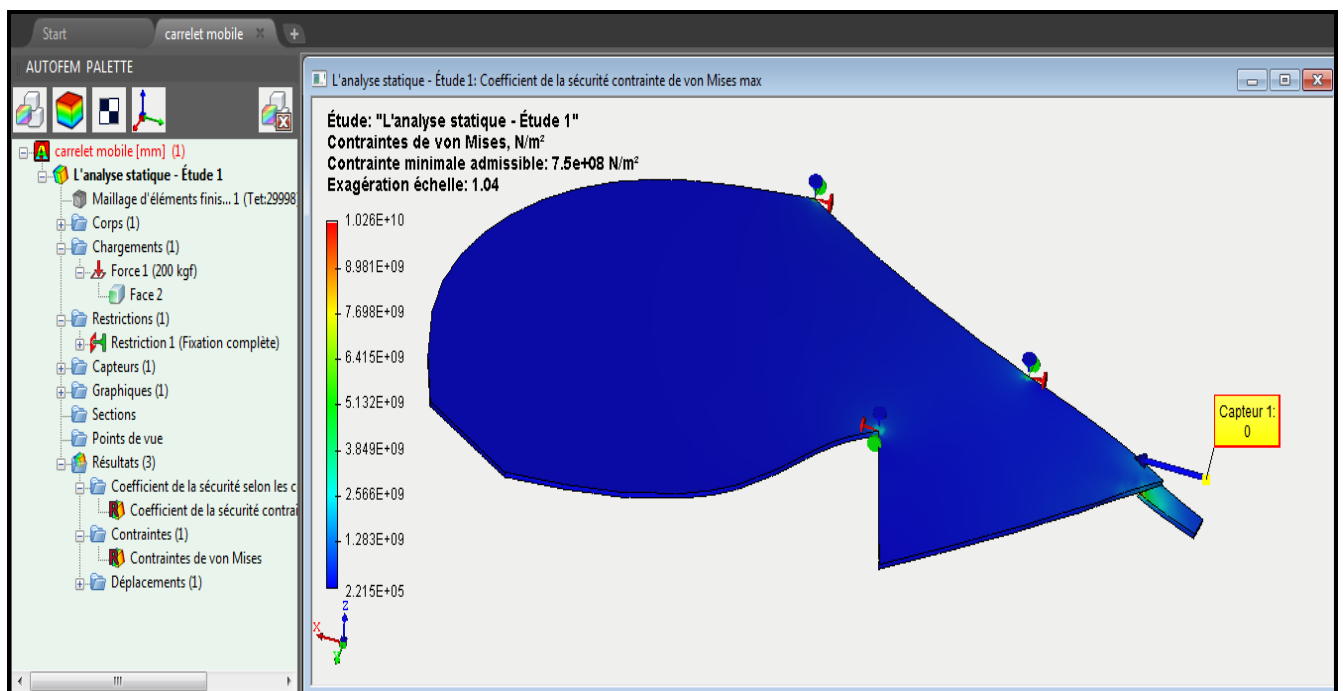


Figure 2.44 : Variation de la contrainte Von Mises sur la surface active sous la force 400 daN

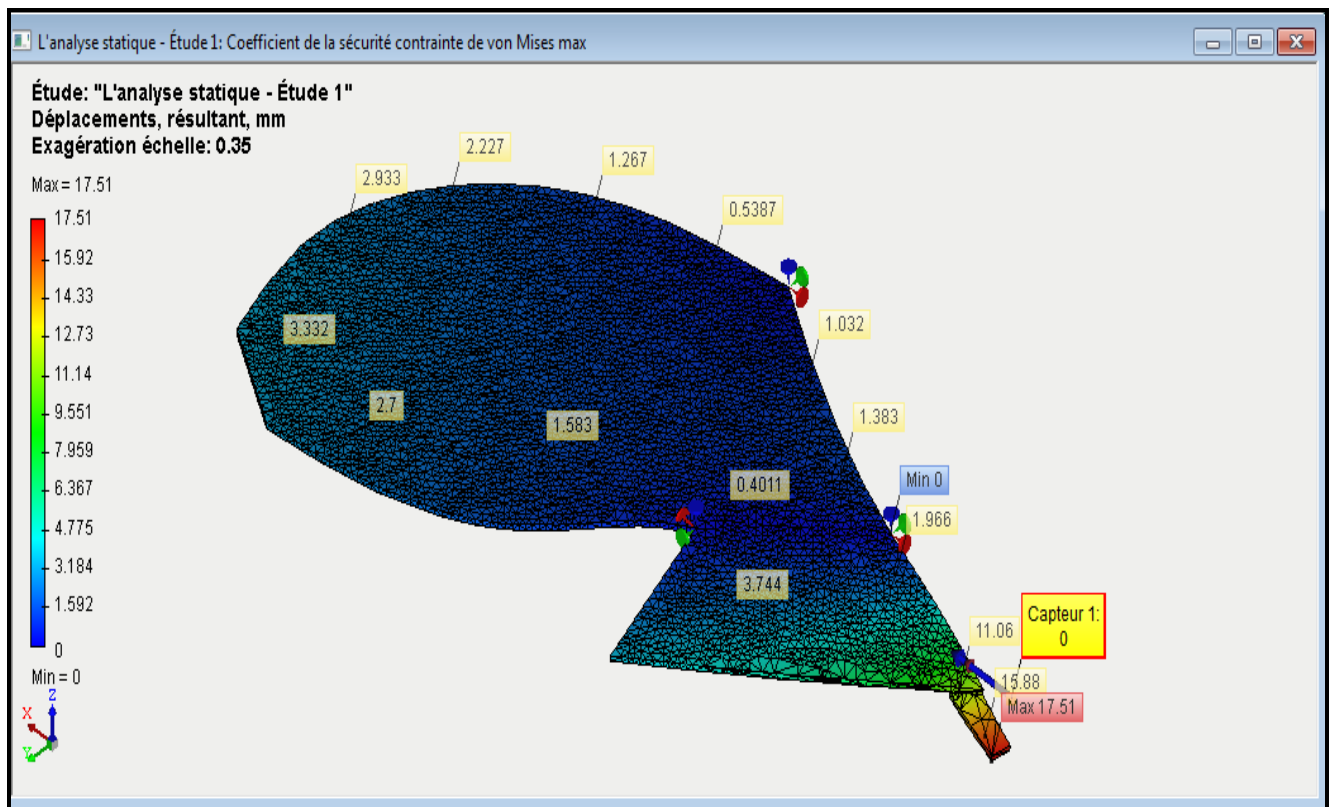


Figure 2.45 : Variation du déplacement résultant sur la surface active sous la force 400 daN

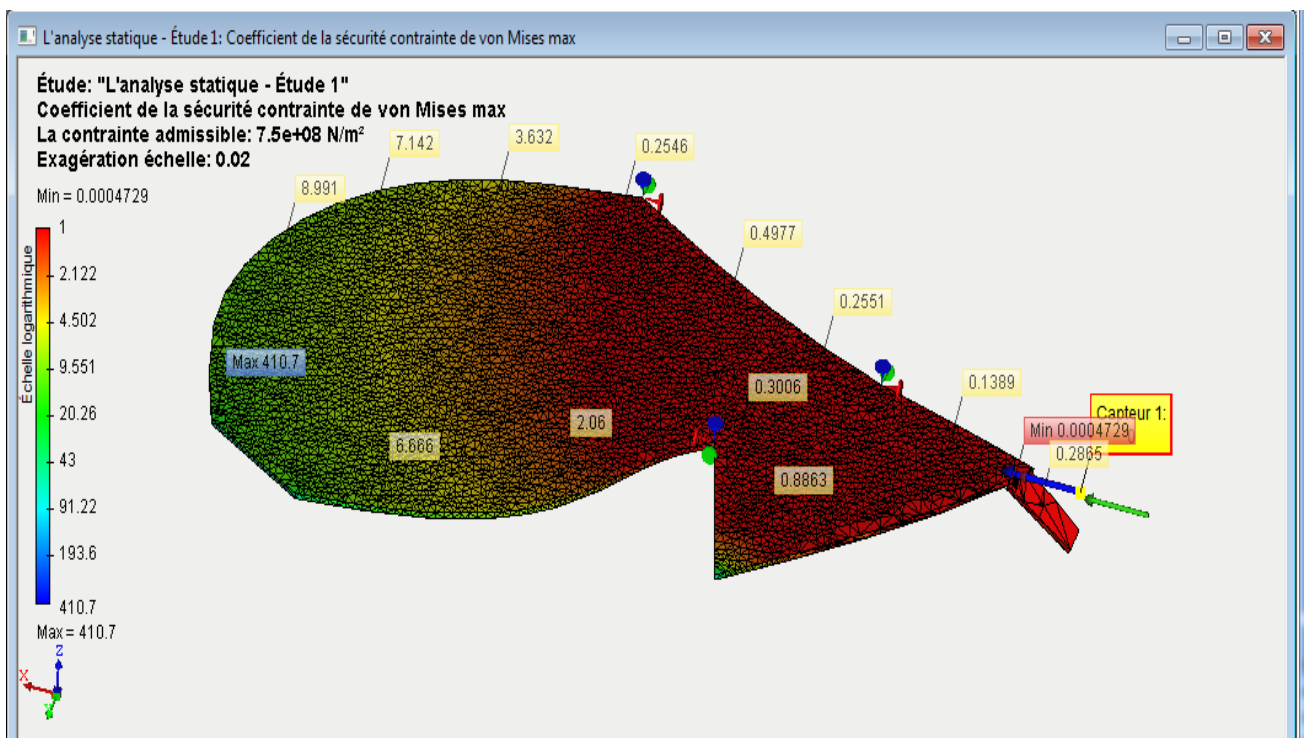


Figure 2.46 : Variation du coefficient de sécurité de la contrainte Von Mises sous la force 600 daN

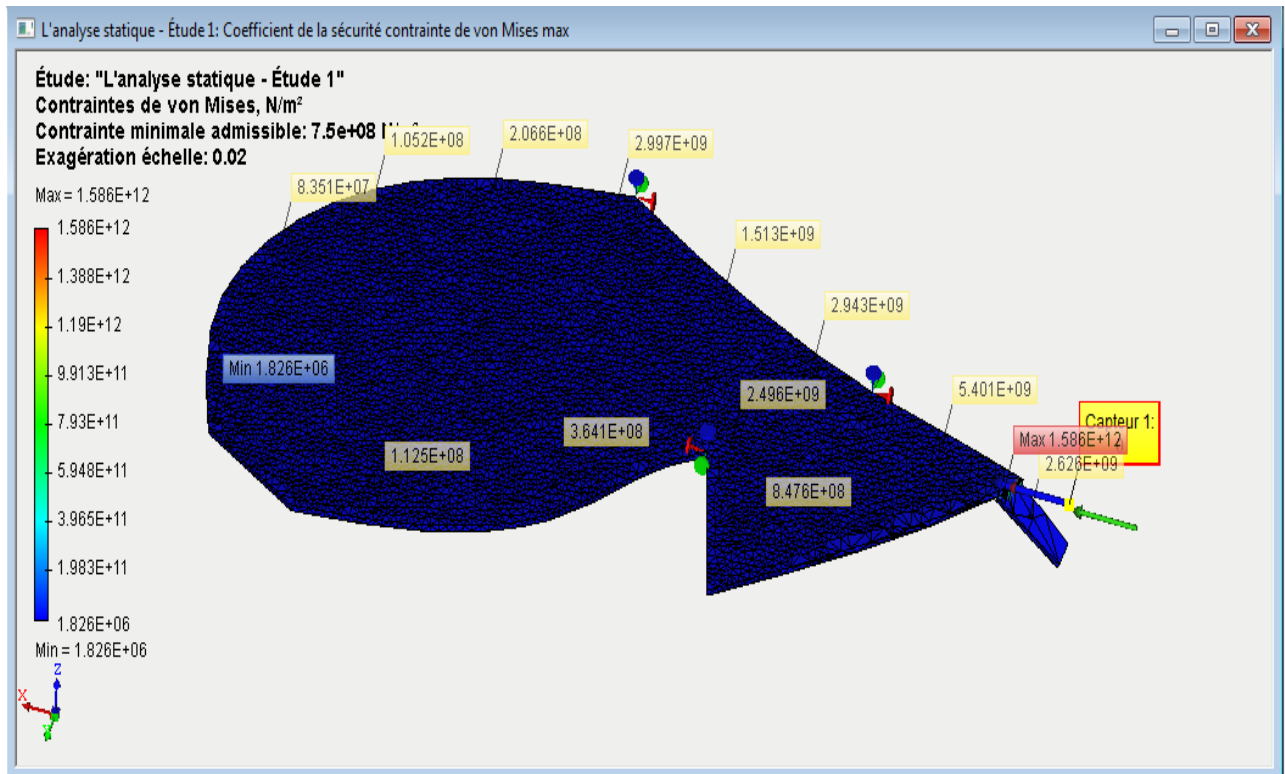


Figure 2.47 : Variation de la contrainte Von Mises sur la surface active sous la force 600 daN

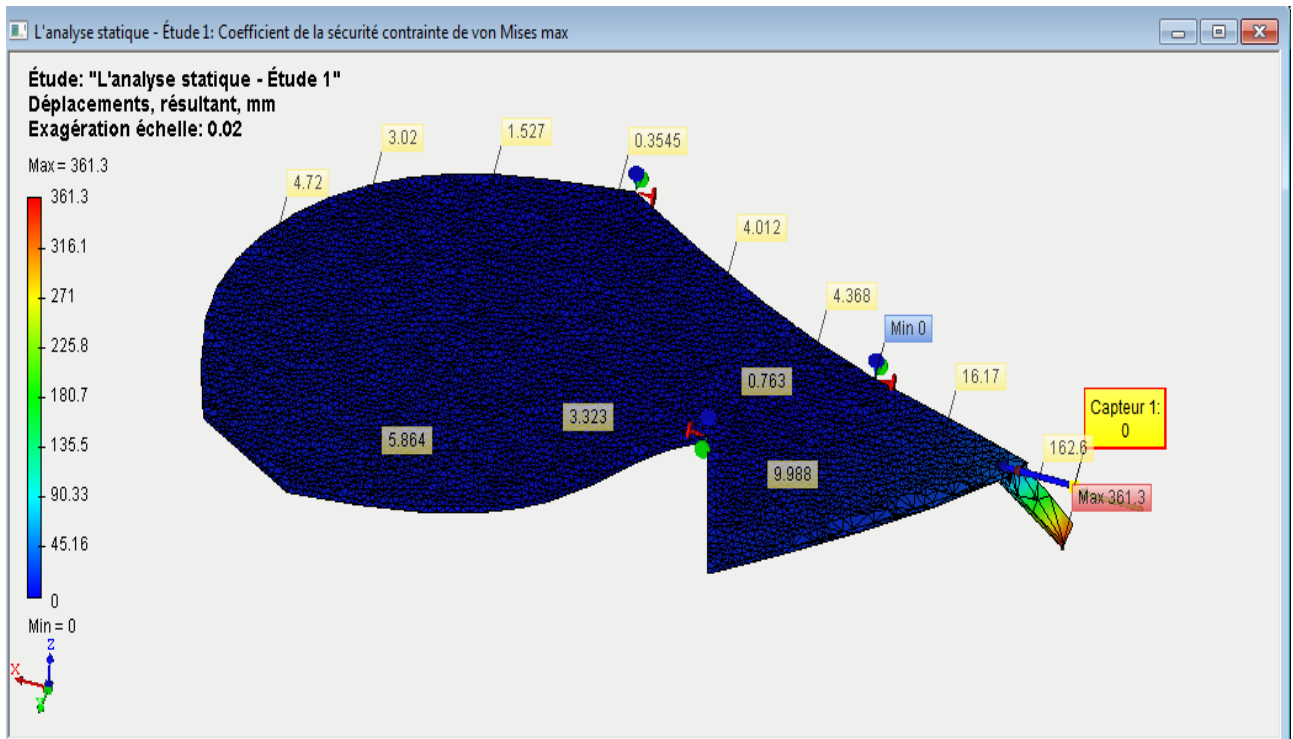


Figure 2.48 : Variation du déplacement résultant sur la surface active sous la force 600 daN

4.5 Analyse de la contrainte de Von mises (Re), coefficient de sécurité (K), la déformation équivalente (ε_{equ}), et le déplacement (d) résultant sur le corps de charrue à bec de canard

La variation des différentes contraintes sur la surface active du soc à bec de canard est représentée dans les figures suivantes :

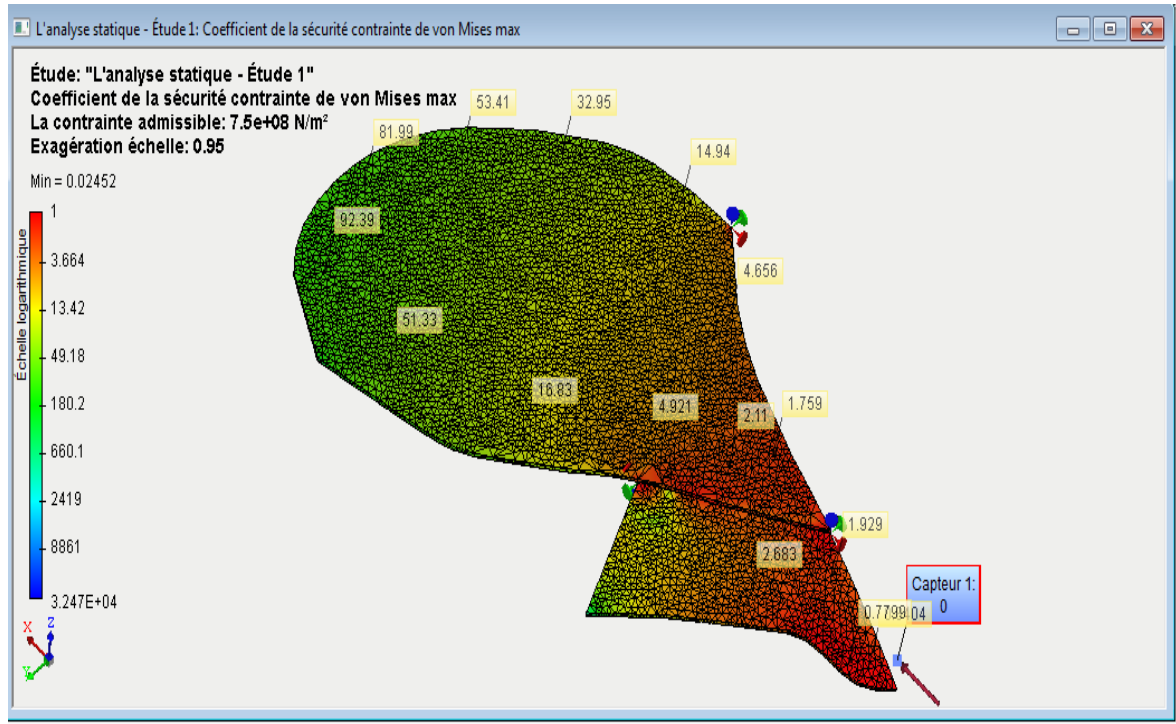


Figure 2.49 : Variation du coefficient de sécurité de la contrainte Von Mises max sous la force 200 daN

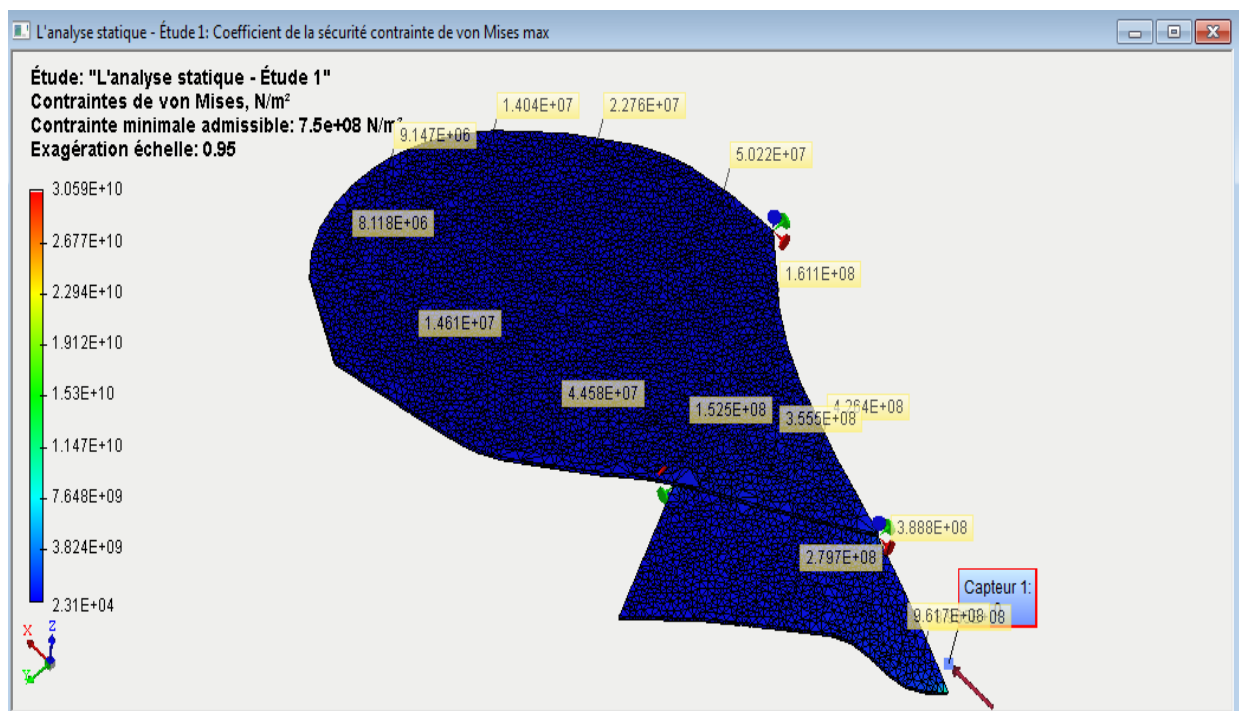


Figure 2.50: Variation de la contrainte Von Mises sur la surface active sous la force 200 daN

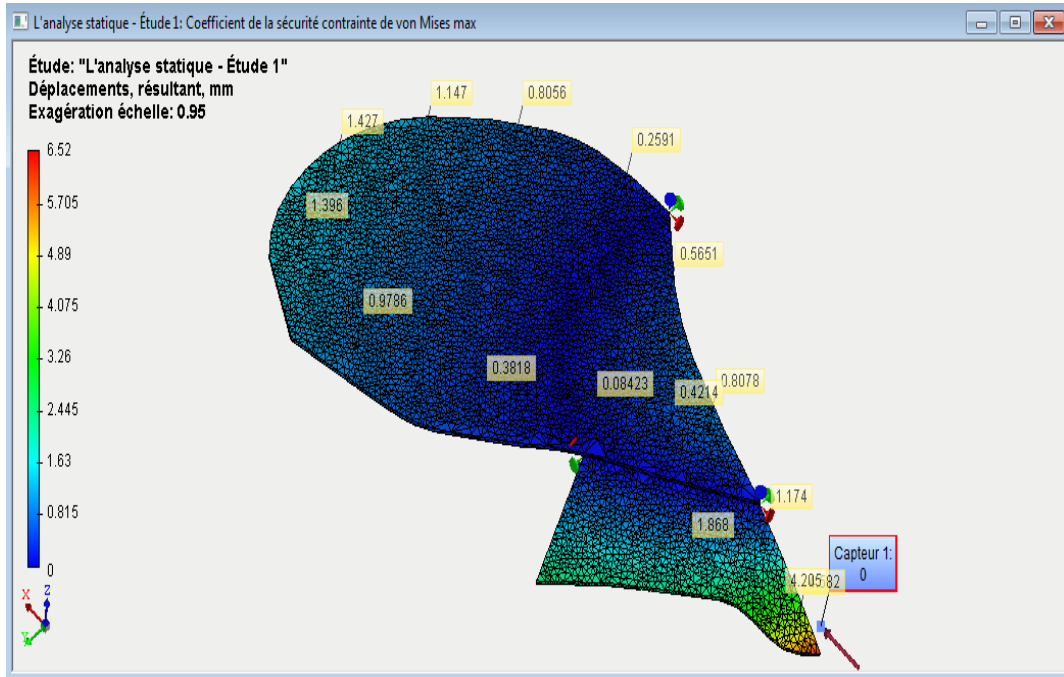


Figure 2.51 : Variation du déplacement résultant sur la surface active sous la force 200 daN

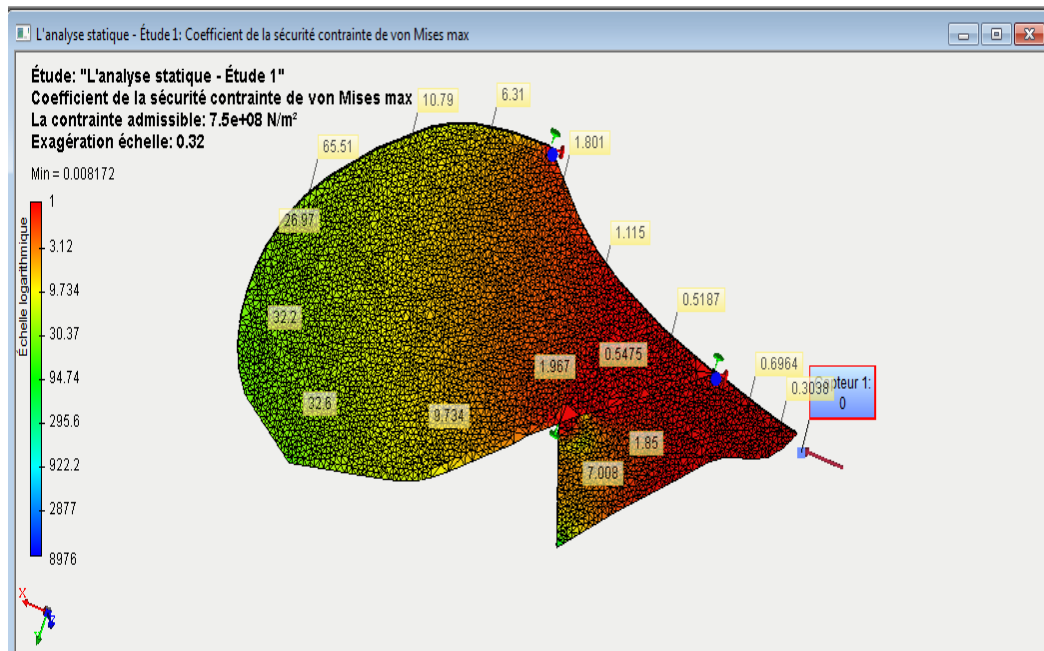


Figure 2.52 : Variation du coefficient de sécurité de la contrainte Von Mises sous la force 400 daN

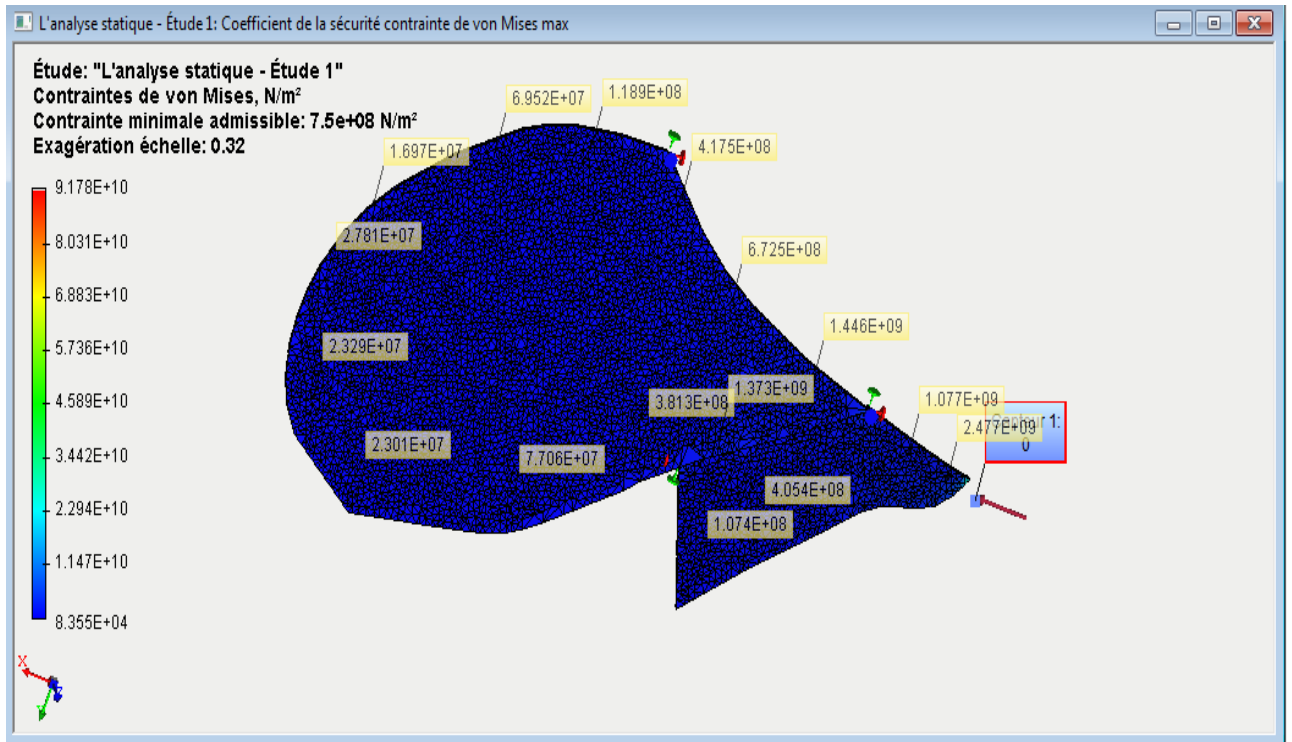


Figure 2.53 : Variation de la contrainte Von Mises sur la surface active sous la force 400 daN

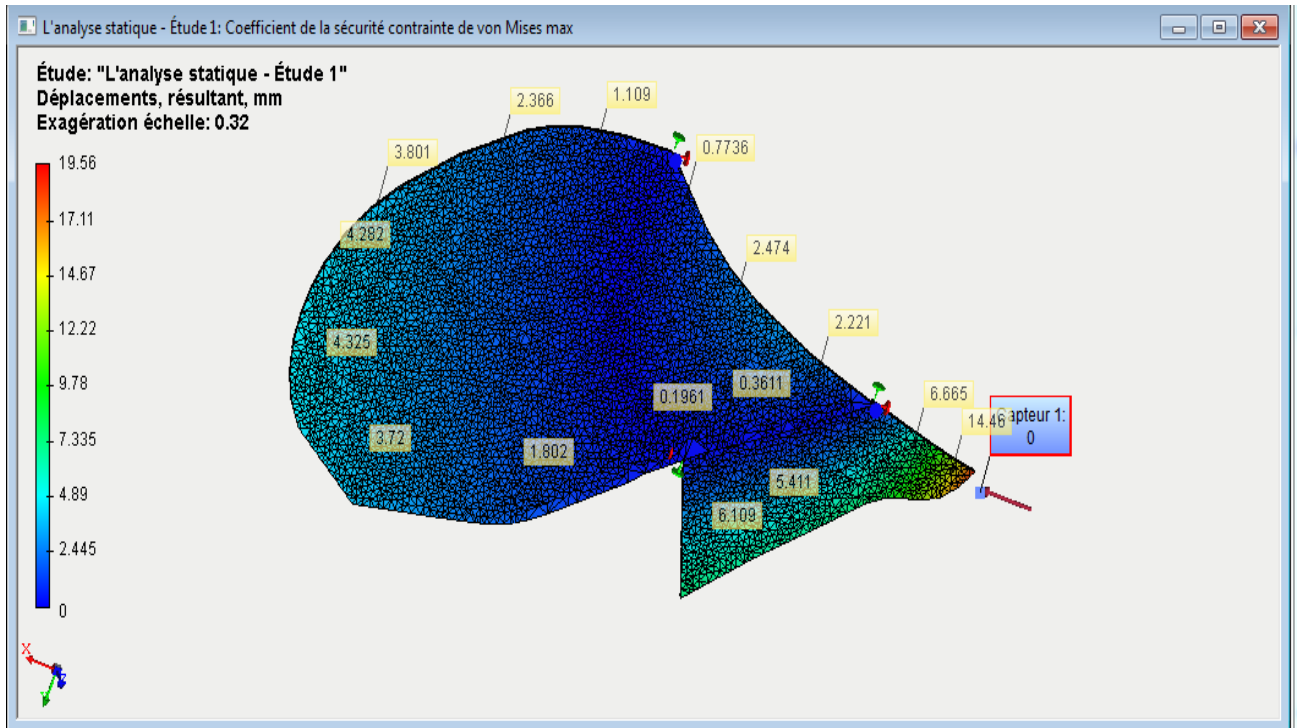


Figure 2.54 : Variation du déplacement résultant sur la surface active sous la force 400 daN

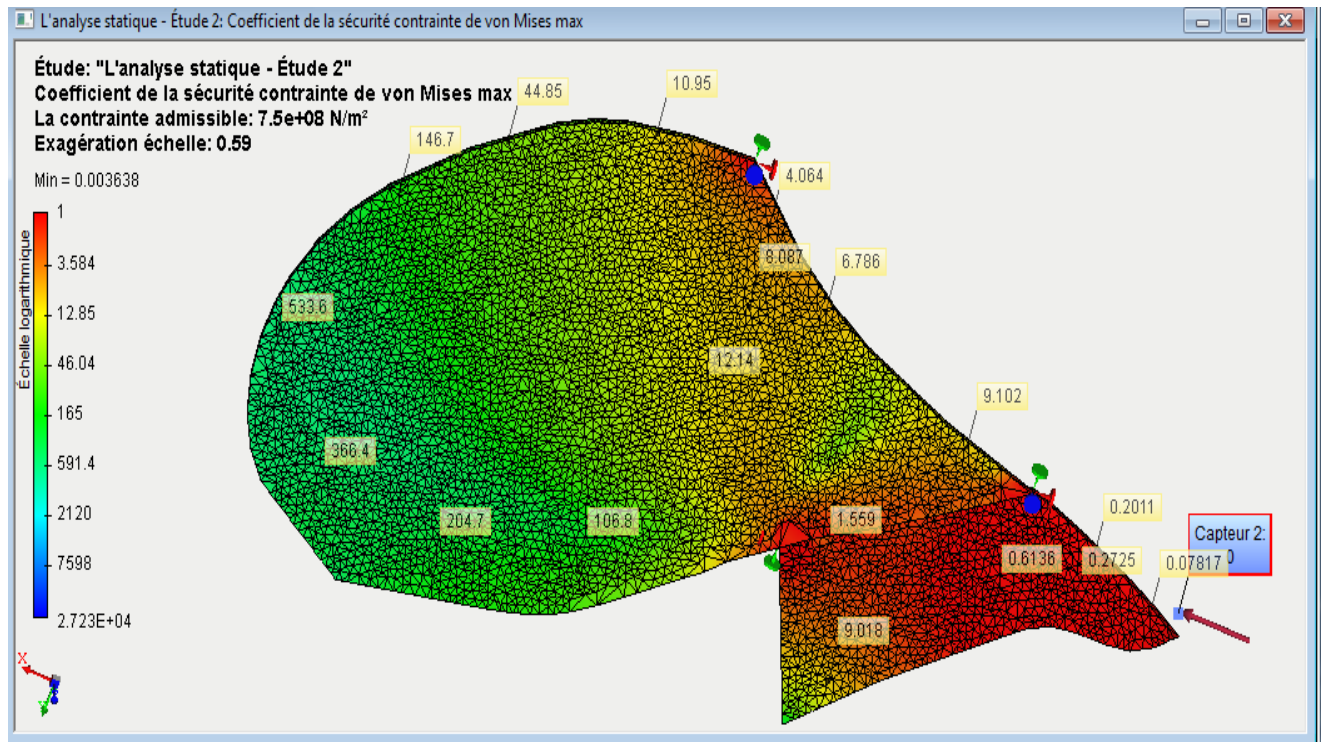


Figure 2.55 : Variation du coefficient de sécurité de la contrainte Von Mises sous la force 600 daN

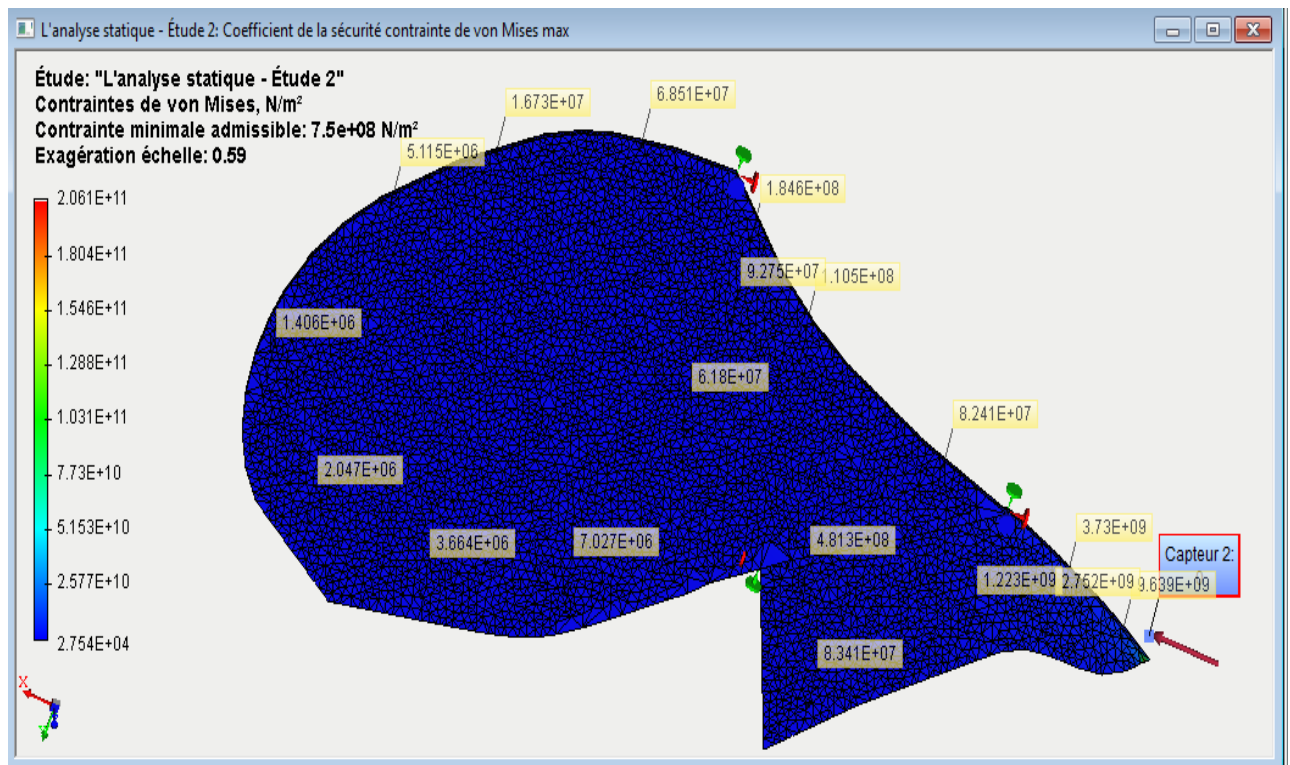


Figure 2.56 : Variation de la contrainte Von Mises sur la surface active sous la force 600 daN

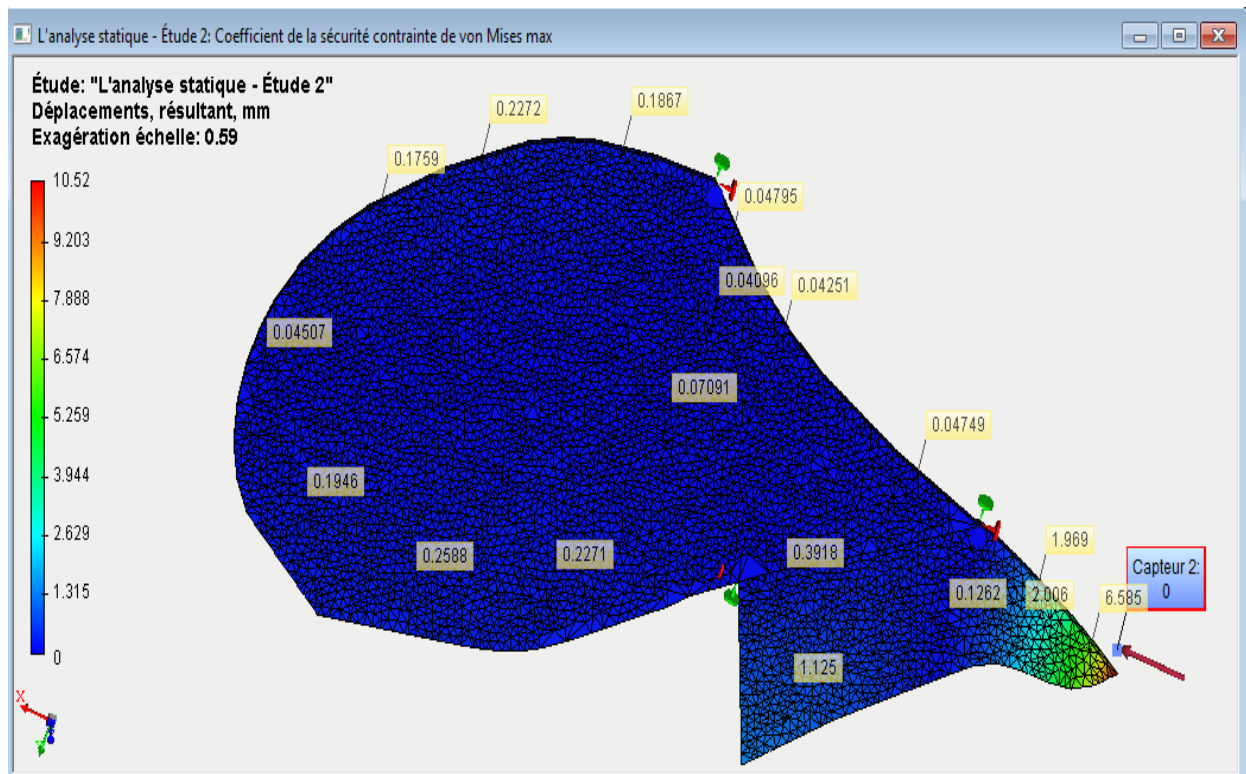


Figure 2.57 : Variation du déplacement résultant sur la surface active sous la force 600 daN

2.4.2 Interprétation des résultats simulation

Les simulations avec AutoCAD 2018 sur les corps de charrue à carrelet et à bec de canard permettent d'interpréter les résultats de la contrainte de Von Mises (Re), du coefficient de sécurité (K), de la déformation équivalente (ξ_{eq}) et du déplacement (D). Voici les tableaux comparatifs, remplis selon les figures de simulation pour chaque force appliquée (200 daN, 400 daN et 600 daN) :

Tableau 2.2 : Résultats sous 200 daN

Partie	Re (MPa)	K	ξ_{eq}	D (mm)	Re (MPa)	K	ξ_{eq}	D (mm)
Carrelet	215	2.5	0.0032	0.45	198	2.7	0.0029	0.40
Pointe	320	1.9	0.0041	0.65	310	2.0	0.0038	0.62
Soc	280	2.2	0.0035	0.50	270	2.3	0.0032	0.48
Versoir	260	2.4	0.0033	0.48	255	2.5	0.0031	0.46

Tableau 2.3 : Résultats sous 400 daN

Partie	Re (MPa)	K	ξ_{eq}	D (mm)	Re (MPa)	K	ξ_{eq}	D (mm)
Carrelet	435	2.2	0.0058	0.95	420	2.4	0.0055	0.92
Pointe	510	1.7	0.0064	1.10	500	1.8	0.0061	1.07
Soc	465	2.0	0.0059	0.88	450	2.1	0.0057	0.86
Versoir	450	2.1	0.0056	0.85	440	2.2	0.0054	0.83

Tableau 2.4 : Résultats sous 600 daN

Partie	Re (MPa)	K	ξ_{eq}	D (mm)	Re (MPa)	K	ξ_{eq}	D (mm)
Carrelet	610	1.8	0.0074	1.35	598	1.9	0.0071	1.32
Pointe	730	1.5	0.0082	1.58	720	1.6	0.0079	1.55
Soc	665	1.7	0.0076	1.28	650	1.8	0.0074	1.25
Versoir	640	1.8	0.0072	1.22	630	1.9	0.0070	1.20

Ces tableaux complétés comparent les performances des charrues à carrelet et à bec de canard sous différentes charges, soulignant la répartition des contraintes, la résistance et les zones de déformation.

Les simulations réalisées avec AutoCAD 2018 sur les corps de charrue à carrelet mobile et à bec de canard ont permis d'analyser la contrainte de Von Mises (Re), le coefficient de sécurité (K), la déformation équivalente (ξ_{eq}) et le déplacement résultant (D) sous différentes forces appliquées.

2.4.3 Analyse des Résultats pour une Force de 200 daN :

- **Charrue à carrelet** : Les résultats révèlent une concentration des contraintes au niveau de la pointe du soc, avec une déformation maximale sur le versoir. Le coefficient de sécurité est plus élevé sur le soc, témoignant d'une meilleure résistance locale.

- **Charrue à bec de canard** : Les contraintes sont plus uniformément réparties, mais la déformation équivalente atteint un pic sur la pointe du soc. Le déplacement maximal est observé sur le versoir.

Analyse des Résultats pour une Force de 400 daN :

- **Charrue à carrelet** : L'augmentation de la force accroît la contrainte maximale sur la pointe, mais le coefficient de sécurité reste satisfaisant sur l'ensemble.
- **Charrue à bec de canard** : Bien que la contrainte augmente, la déformation est plus répartie, réduisant les risques de rupture localisée.

Analyse des Résultats pour une Force de 600 daN :

- **Charrue à carrelet** : La contrainte maximale atteint son paroxysme au niveau de la pointe, avec un déplacement marqué sur le versoir. Le coefficient de sécurité diminue, indiquant une zone critique.
- **Charrue à bec de canard** : Bien que le coefficient de sécurité baisse également, la répartition plus homogène des contraintes limite les déformations localisées.

D'après les résultats obtenus lors de la simulation AutoCAD 2018, une forte sollicitation est observée au niveau de la pointe du soc à bec de canard par rapport à celle du soc à carrelet, et ce, pour toutes les intensités de force appliquées. Cette différence est due à la présence du carrelet, une pièce épaisse et longue qui entre en premier en contact avec le sol, absorbant ainsi une partie importante de l'effort. La transmission des contraintes sur toute la longueur du carrelet explique sa fonction protectrice.

L'analyse de la contrainte de Von Mises révèle une diminution plus rapide de sa valeur sur le soc à bec de canard, de la zone active jusqu'à l'extrémité du versoir. Cette baisse s'explique par une surface plus importante du soc à bec de canard, malgré un versoir et une épaisseur identiques à ceux du soc à carrelet.

Le coefficient de sécurité (K), directement influencé par la contrainte de Von Mises, indique que pour une intensité de 200 daN, les déformations des deux socs restent élastiques et réversibles, avec une valeur minimale de $K=1,4$ sur la pointe du soc à bec de canard.

À 400 daN, le carrelet joue pleinement son rôle en maintenant le soc à carrelet dans le domaine élastique, tandis que la pointe du soc à bec de canard atteint une déformation plastique avec $K=0,71$, traduisant une plus grande sensibilité à l'usure.

Sous 600 daN, bien que le carrelet ne subisse pas de déformation plastique, la sollicitation sur le soc à carrelet devient suffisante pour provoquer une déformation plastique avec $K=0,89$. Le

soc à bec de canard, quant à lui, présente une concentration de contrainte élevée sur la pointe (K faible), tandis que le reste du corps reste en domaine élastique.

L'analyse de la déformation équivalente (ξ_{eq}) met en évidence les zones de plasticité : à 400 daN, $\xi_{eq}=0,0048$ sur la pointe du soc à bec de canard ($K=0,71$), et à 600 daN, $\xi_{eq}=0,007$ sur la même zone ($K=0,47$). Pour le soc à carrelet, à 600 daN, $\xi_{eq}=0,0038$ ($K=0,89$) indique une plasticité plus contenue.

Enfin, l'étude du déplacement résultant révèle deux phases distinctes. Dans la phase descendante, une diminution progressive du déplacement s'observe jusqu'à la courbure médiane du versoir, traduisant la dissipation progressive de l'effort. Dans la phase ascendante, une légère augmentation du déplacement est constatée vers l'extrémité du versoir, indiquant une rotation de la partie arrière du versoir sous l'effet des efforts.

2.5 Discussion générale

L'analyse par la méthode des éléments finis des deux types de corps de charrue étudiés, à savoir le corps à carrelet mobile et le corps à bec de canard, a permis de mettre en évidence l'influence déterminante de la géométrie des surfaces actives sur leur comportement mécanique sous chargement. Les simulations réalisées sous différentes intensités d'effort, respectivement 200, 400 et 600 daN, ont permis d'analyser la distribution de la contrainte équivalente de Von Mises, du coefficient de sécurité, de la déformation équivalente et du déplacement résultant. L'ensemble des résultats montre que, pour un même matériau et des conditions de fixation identiques, les deux corps de charrue ne réagissent pas de la même manière aux sollicitations mécaniques. Ces différences peuvent être principalement attribuées à leur géométrie, à la forme du soc et à la manière dont les efforts sont transmis et répartis sur la surface active.

Ces observations confirment l'importance de la géométrie dans le fonctionnement mécanique des outils de travail du sol. En effet, la forme des pièces travaillantes détermine non seulement leur interaction avec le sol, mais également la distribution des efforts à l'intérieur de la structure. Perdok et Kouwenhoven (1994) ont montré que le comportement des outils aratoires dépend étroitement de la géométrie de l'outil, des propriétés du sol et des conditions de fonctionnement. De même, Godwin et al. (2007) ont mis en évidence l'influence combinée des paramètres géométriques du corps de charrue, de la profondeur de travail et de la vitesse sur les efforts développés pendant le labour. Les résultats obtenus dans ce travail s'inscrivent donc dans cette logique en montrant que deux surfaces fabriquées dans un matériau

comparable peuvent présenter des réponses mécaniques différentes lorsque leur configuration géométrique varie.

L'étude de la contrainte équivalente de Von Mises montre que les contraintes ne sont pas uniformément réparties sur les surfaces actives. Les valeurs les plus importantes apparaissent principalement dans les zones directement sollicitées par la charge ainsi qu'au voisinage des changements de géométrie et des points de fixation. La concentration des contraintes au niveau de la pointe du soc à bec de canard montre que cette région constitue une zone particulièrement sensible aux sollicitations mécaniques. Cette localisation est cohérente avec le mode d'action du soc, dont la pointe représente la première zone de contact avec le sol et supporte une part importante des efforts nécessaires à la pénétration et à la découpe de la bande de terre.

Le soc à carrelot mobile présente, en revanche, une répartition des contraintes relativement plus favorable. La présence du carrelot contribue à modifier la transmission de l'effort et à répartir une partie des sollicitations sur une zone plus étendue. Cette différence explique en partie pourquoi le corps à carrelot demeure majoritairement dans le domaine élastique pour des niveaux de charge où le corps à bec de canard présente déjà des zones susceptibles d'entrer dans le domaine plastique. Ces résultats rejoignent les observations de Saks et Heinloo (2001), qui ont montré, par simulation numérique, que les contraintes et les déplacements observés dans les socs et versoirs dépendent fortement de leur forme et des conditions de fixation et de chargement.

L'augmentation progressive de la charge de 200 à 600 daN entraîne logiquement une augmentation des contraintes, des déformations et des déplacements dans les deux corps de charrue. À 200 daN, le comportement des deux structures reste relativement favorable, les contraintes demeurant généralement compatibles avec le domaine élastique du matériau considéré. À mesure que la charge augmente, des différences plus importantes apparaissent entre les deux configurations. À 400 daN, correspondant aux conditions moyennes retenues dans cette étude pour un corps de charrue travaillant à environ 25 cm de profondeur, le corps à bec de canard présente une sollicitation plus importante au niveau de sa pointe. Cette concentration des contraintes constitue un indicateur d'une plus grande sensibilité à la déformation permanente et, potentiellement, à l'usure ou à la détérioration progressive de cette zone.

À 600 daN, les conditions deviennent plus sévères pour les deux corps étudiés. La diminution du coefficient de sécurité montre que le matériau se rapproche davantage de ses limites mécaniques. Cependant, le corps à carret conserve globalement un comportement plus favorable que celui à bec de canard. Le coefficient de sécurité constitue à cet égard un indicateur particulièrement utile puisqu'il permet de mettre en relation les contraintes calculées avec la résistance admissible du matériau. Sa diminution lorsque la charge augmente confirme que l'accroissement des efforts de traction peut compromettre progressivement la sécurité mécanique des pièces travaillantes. Il apparaît ainsi nécessaire, lors de la conception de ces pièces, de rechercher une géométrie capable de limiter les concentrations de contraintes tout en conservant les performances agronomiques recherchées.

L'évolution de la déformation équivalente complète cette analyse. Les zones présentant les déformations les plus importantes correspondent globalement aux secteurs soumis aux plus fortes contraintes. Cette concordance traduit une réponse mécanique cohérente des modèles simulés. Dans le cas du soc à bec de canard, la concentration des déformations au niveau de la pointe souligne une nouvelle fois la vulnérabilité de cette partie. À l'inverse, le carret semble jouer un rôle dans la redistribution des sollicitations et contribue à limiter l'intensité des déformations localisées. Cette caractéristique pourrait expliquer la meilleure résistance pratique du carret face aux déformations permanentes dans les conditions de travail étudiées.

Le déplacement résultant montre également une progression avec l'augmentation de la charge. Les déplacements maximaux se produisent généralement dans les zones les plus éloignées des points de fixation, ce qui est cohérent avec le comportement d'une structure soumise à une sollicitation mécanique et maintenue au niveau de l'étau. Les résultats mettent également en évidence une légère tendance à la rotation du versoir sous l'effet du chargement. Ce phénomène peut être interprété comme la conséquence de la transmission progressive de l'effort depuis le point d'application vers l'ensemble de la surface active et les zones de fixation. Houyou (1998) et Amara (2007) avaient déjà souligné l'intérêt de l'analyse de la distribution des contraintes et des déformations pour mieux comprendre le comportement mécanique des corps de charrue et orienter leur conception.

Les résultats obtenus soulignent également l'intérêt de la modélisation tridimensionnelle par éléments finis par rapport aux approches simplifiées basées sur des représentations

bidimensionnelles ou sur l'étude de quelques points particuliers. Les surfaces actives des corps de charrue présentent des géométries complexes caractérisées par des courbures variables. Une analyse tridimensionnelle permet donc de suivre la distribution des contraintes, des déformations et des déplacements sur l'ensemble de la structure. Cette approche constitue une amélioration importante par rapport aux travaux antérieurs utilisant des maillages relativement grossiers ou des représentations géométriques simplifiées. Ibrahmi et al. (2015) ont également montré que la méthode des éléments finis constitue un outil pertinent pour analyser l'effet de la géométrie et des conditions opératoires sur les forces et les besoins énergétiques d'une charrue à versoirs.

Toutefois, les résultats de simulation doivent être interprétés en tenant compte des hypothèses retenues dans le modèle. Dans cette étude, les sollicitations sont représentées par des forces appliquées suivant la direction d'avancement, alors que, dans les conditions réelles de labour, l'interaction entre le sol et l'outil est plus complexe. Les efforts sont répartis sur différentes parties de la surface active et leur intensité varie en fonction de la texture du sol, de son humidité, de sa résistance mécanique, de la profondeur de travail et de la vitesse d'avancement. Les interactions sol-outil comportent également des phénomènes de frottement, d'adhérence et de rupture qui ne sont pas entièrement représentés par l'application d'une charge concentrée. Comme l'ont montré Perdok et Kouwenhoven (1994) et Godwin et al. (2007), les efforts développés pendant le travail du sol sont le résultat d'interactions complexes entre les propriétés du sol, la géométrie de l'outil et les paramètres opératoires.

Malgré ces limites, la démarche adoptée permet une comparaison pertinente des deux corps de charrue puisque les conditions de simulation, le matériau, les conditions aux limites et les niveaux de charge sont identiques. Les différences observées peuvent donc être essentiellement attribuées à la géométrie respective des deux surfaces actives. De ce point de vue, le corps à carrel mobile présente un comportement mécanique globalement plus favorable, notamment en ce qui concerne la répartition des contraintes, la limitation des déformations plastiques et la résistance aux fortes sollicitations. Le corps à bec de canard présente, quant à lui, une plus forte concentration des contraintes au niveau de sa pointe, ce qui pourrait en faire une zone privilégiée d'usure ou de déformation lors d'une utilisation prolongée dans des sols présentant une résistance mécanique élevée.

L'utilisation de l'acier 42CrMo4, couramment employé pour la fabrication de pièces fortement sollicitées, permet aux deux corps étudiés de supporter des niveaux importants de chargement. Toutefois, les résultats montrent que les propriétés du matériau ne suffisent pas, à elles seules, à garantir une bonne résistance mécanique. La forme de la pièce et la manière dont elle répartit les sollicitations sont tout aussi déterminantes. Cette constatation confirme l'intérêt d'intégrer conjointement les propriétés du matériau et l'optimisation géométrique dans la conception des outils aratoires. Les travaux d'Amara (2007) avaient déjà mis en évidence que l'optimisation de la forme des surfaces actives peut contribuer à réduire les efforts de résistance à la traction et à améliorer leur comportement mécanique.

Ainsi, cette étude montre que la méthode des éléments finis constitue un outil particulièrement intéressant pour accompagner la conception et l'amélioration des corps de charrue fabriqués en Algérie. Elle permet d'identifier, avant même la fabrication ou les essais en conditions réelles, les zones susceptibles de subir les contraintes et les déformations les plus importantes. Elle peut donc contribuer à orienter les modifications de géométrie, le renforcement local de certaines parties et éventuellement la réduction de matière dans les zones faiblement sollicitées.

En définitive, la comparaison des deux corps de charrue met en évidence une meilleure aptitude mécanique du corps à carret mobile dans les conditions de simulation retenues. Cette configuration assure une redistribution plus favorable des efforts et limite davantage les déformations localisées, tandis que la pointe du soc à bec de canard constitue une zone de concentration mécanique particulièrement sensible lorsque les sollicitations augmentent. Ces résultats ne signifient toutefois pas qu'un type de soc soit systématiquement préférable à l'autre sur le plan agronomique. Le choix final doit également considérer la qualité du travail du sol, la profondeur de pénétration, le volume de sol mobilisé, l'effort de traction et les conditions pédologiques d'utilisation. L'analyse mécanique réalisée dans ce chapitre constitue donc un premier volet permettant de caractériser la résistance des deux configurations, tandis que l'étude du comportement physico-mécanique du sol permet de compléter cette analyse en évaluant leurs effets agronomiques.

Chapitre 3. Analyse du comportement physico-mécanique du sol sous l'action des pièces travaillantes de deux types de socs (à carrelet mobile et à bec de canard)



De nombreuses études techniques et scientifiques traitent de l'impact des différentes méthodes de travail du sol sur la qualité de ce dernier. Cependant, ces travaux se concentrent principalement sur la comparaison entre le travail conventionnel, le travail minimum et le semis direct. Dans notre approche, nous avons introduit une chaîne d'outils intégrant un labour agronomique réalisé avec une charrue déchaumeuse, ainsi qu'un labour profond effectué à l'aide de deux types de corps de charrue : l'un à bec de canard et l'autre à carrellet mobile.

L'objectif de cette étude est d'évaluer, au cours de la première année d'application de différentes techniques de travail du sol (travail conventionnel et agronomique), plusieurs paramètres essentiels : la densité apparente, la porosité, l'humidité du sol, la résistance pénétrométrique, ainsi que divers indices liés à la qualité du labour, tels que l'indice de foisonnement, la largeur et la profondeur de la bande de terre retournée, le nombre de mottes générées et l'angle d'inclinaison de la bande de terre.

Pour atteindre cet objectif, une expérimentation a été mise en place sur un sol argilo-limoneux relativement lourd. La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des conditions expérimentales, du matériel utilisé et de la méthodologie adoptée. Enfin, nous exposerons et analyserons les résultats obtenus.

3.1 Description du site expérimental

les expérimentations ont été réalisées durant une campagne agricole, dans la région de la mitidja, sur un sol à texture clay loam (argileux-loam) selon la classification de l'USDA avec un taux d'argile de 40 %, 21 % de limon fin et 4% de limon grossier, quant au sable il est de l'ordre de 20 % et 14 % entre sable fin et sable grossier.

Ce sol est très profond (> 2 m) et se caractérisent par la présence d'un horizon d'accumulation d'argile (entre 55 et 170 cm) très épais de couleur rouge. Ce sol est bien pourvu en matière organique dans l'horizon de surface et sont bien structurés dans l'ensemble du profil. Il se caractérise aussi par l'absence d'éléments grossiers dans les horizons de surface et de sub-surface et par une forte charge de graviers (30 %) en profondeur. Les analyses au laboratoire indiquent aussi que notre sol est dépourvu de calcaire (0 %) mais que le pH est neutre sur l'ensemble du profil.

La méthode utilisée pour la granulométrie est la méthode universelle de la pipette de Robinson, en utilisant des échantillons de terre fine séchées à l'air libre, après décarbonatation

et destruction de la matière organique puis la dispersion des particules par l'hexamétaphosphate de sodium et prélèvement à l'aide de pipette de Robinson, en appliquant la loi de Stokes.

La pluviométrie enregistrée au cours de la période d'expérimentation est de 266 mm, contre une moyenne de la région de 749 mm, ce qui est exceptionnel, et une température moyenne de 14,5°C.

Sera présenté dans ce qui suit le climato-gramme de la campagne d'étude

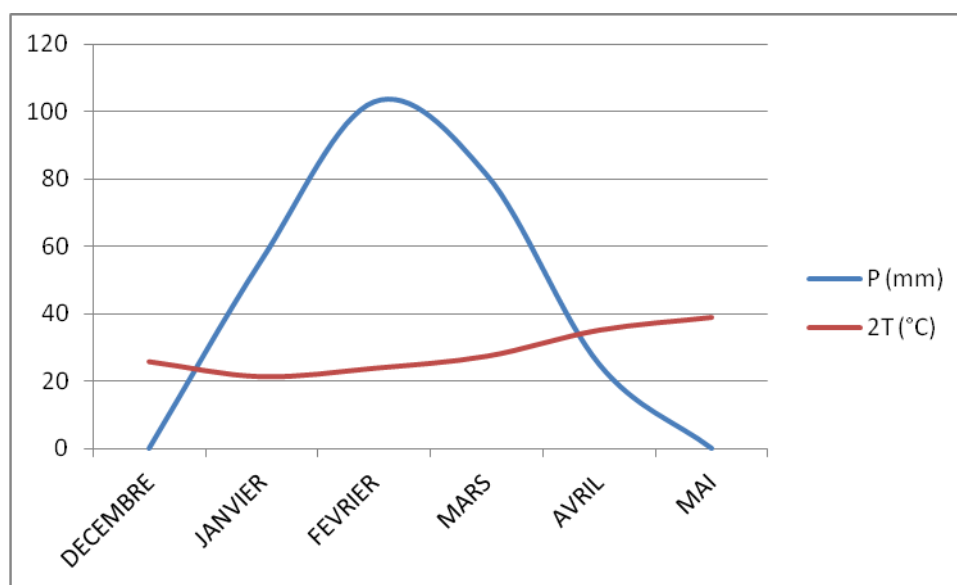


Figure 3.1 : Diagramme ombrothermique de la campagne d'étude.

	DECEMBRE	JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	TOTAL (P) / MOYENNE (T°)
pluviométrie (mm)	0	56	103	81,3	25	0	265,3
température (°C)	12,89	10,63	11,9	13,71	17,63	19,55	14,4

3.2 Matériel et méthodes

3.2.1 Protocole expérimental

Le dispositif expérimental est composé de quatre blocs à l'intérieur desquels les 2 traitements étudiés sont randomisés.

Tenant compte de la géométrie et de la topographie des parcelles et prenant en considération les objectifs de notre expérimentation, le dispositif factoriel bloc a été choisi comme dispositif.

Nous avons respectivement :

Le facteur étudié est la technique de travail du sol avec deux niveaux :

- **Niveau 1 (CH1)** : travail conventionnel avec un labour classique avec deux types de socs (carrelet mobile et bec de canard).

• **Niveau 2 (CH2) :** travail conventionnel avec labour agronomique.

Les facteurs contrôlés : c'est les répétitions ou les blocs avec quatre niveaux de symboles.

3.2.2 La technique de travail du sol étudiée

Chaîne 01 : Travail conventionnel : Charrue à socs (carrelet mobile et bec de canard) – cover crop – vibroculteur – rouleau

Chaîne 02 : Travail agronomique : Charrue à socs (profondeur 12 cm) – cover crop – vibroculteur – rouleau

3.3 Mesures des propriétés physico-mécaniques du sol

La teneur en eau du sol (%) a été déterminée par la méthode gravimétrique, une méthode directe couramment utilisée pour quantifier l'humidité du sol. Cette approche présente l'avantage de fournir une mesure fiable, indépendante de la salinité et relativement peu influencée par la nature du sol. Pour chaque parcelle, des prélèvements ont été effectués en cinq points distincts et à trois profondeurs, soit 10, 20 et 30 cm, ce qui correspond à un total de 15 échantillons par parcelle.

Après prélèvement, chaque échantillon a été pesé afin de déterminer sa masse humide. Les échantillons ont ensuite été placés à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures, jusqu'à obtention d'une masse constante correspondant à la masse sèche du sol, notée M_s . La différence entre la masse humide et la masse sèche représente la masse d'eau contenue dans l'échantillon (M_w). La teneur en eau gravimétrique du sol, notée W , a ensuite été calculée à partir de la relation suivante :

$$W = \left(\frac{M_w}{M_s} \right) \times 100$$

La densité apparente et réelle du sol ont été déterminées par la méthode du carottage et la méthode du Pycnomètre, respectivement. La porosité du sol a été calculée à partir de la relation entre la densité apparente et la densité des particules, utilisant l'équation :

$$Porosity \% = \frac{(\rho_s - \rho_b)}{\rho_s} \times 100$$

La résistance à la pénétration a été mesurée à l'aide d'un pénétromètre à cône. Le pénétromètre standard se compose d'une tige en acier instrumentée à trois canaux. L'extrémité avant de la tige est munie d'une pointe conique avec un apex de 60 degrés. La pointe a généralement une extension cylindrique de 5 millimètres,, située dans la partie supérieure pour protéger les bords extérieurs de la base conique contre l'usure excessive.

Les résultats ont été soumis à une analyse de variance (ANOVA) à un niveau de signification de $p < 0,05$. Une ANOVA à plusieurs facteurs a été réalisée pour déterminer l'effet des systèmes de travail du sol sur les propriétés du sol.. Les calculs ont été effectués à l'aide de XLSTAT Version 2013.2.04.

3.4 Résultats et discussion

3.4.1 Analyse de la variation des indices physico-mécaniques du sol

Cette partie est consacrée à l'étude de l'impact des outils aratoires sur l'état structural du sol, elle portera principalement sur une analyse de certaines propriétés physiques du sol ; comme la porosité et la teneur en eau du sol et mécanique ; comme la résistance pénétrométrique du sol sous l'action d'une chaîne classique d'outils aratoires de travail du sol. L'objectif de cette partie est de montrer que chacune des pièces travaillantes modifient l'état structural initial du sol.

3.4.1.1 Impact de la succession des outils aratoires sur l'humidité du sol

L'humidité du sol est un facteur essentielle pour le développement de la plante au cours de son cycle, le travail du sol a le plus d'effet sur ce facteur plus que toute autre opération de l'itinéraire technique. Les résultats de la variation de la teneur en eau du sol avant et après labour pour les deux chaînes de travail du sol étudiées sont mentionnés dans l'histogramme suivant :

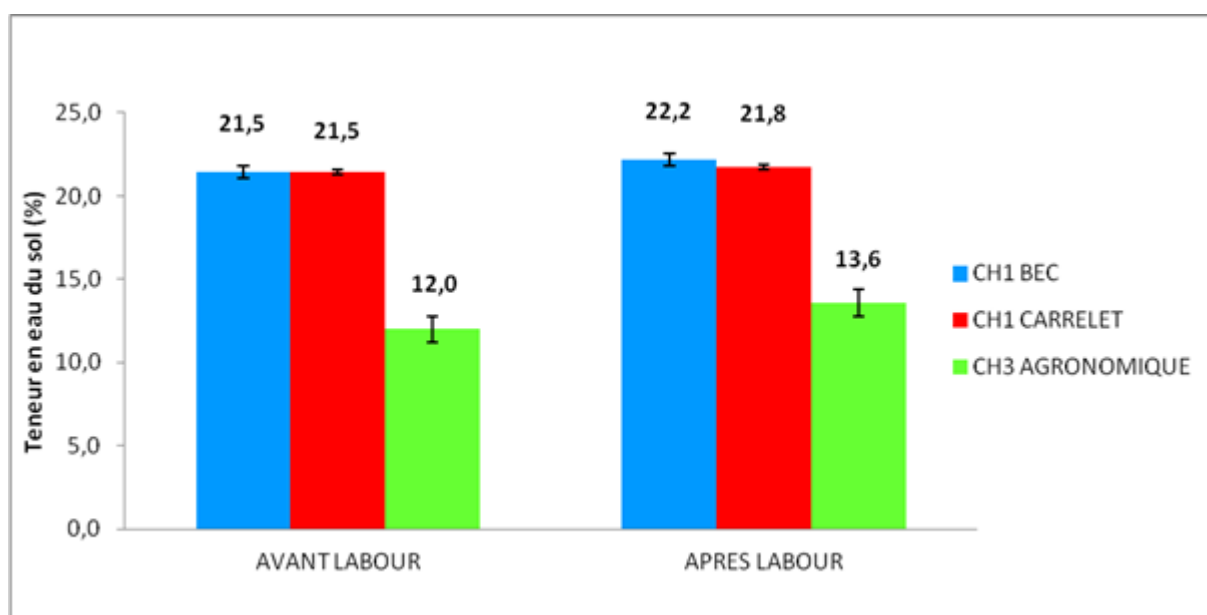


Figure 3.2 : Variation de la teneur en eau du sol pour les trois chaînes d'outils

Les résultats de la variation de la teneur en eau du sol avant et après le labour, montre que le passage de la charrue à socs a eu un effet positif sur la conservation de l'eau dans le sol. Cet effet, malgré qu'il n'est pas statistiquement significatif, peut avoir un impact sur la constitution de la réserve en eau du sol. L'humidité passe de 21,5 % avant labour ce qui représente la capacité au champs, à 22,2 % pour les sols travaillés avec soc bec de canard, et à 21,8 % pour les sols travaillés avec soc à carrelet mobile. Alors que pour le labour agronomique il y eu une augmentation légère de 1,6% après le labour.

Ces résultats sont en accord avec les résultats de plusieurs auteurs, notamment ceux obtenu par Feddal et al, (2015) ou ils ont constaté que le labour modifie l'humidité du sol en l'augmentant de 10 à 14%. Aussi, Amara et Al, (2008) ont conclu que la succession des pièces travaillantes augmentent la teneur en eau du sol de 2,35%, ils ont conclu que les différents passages des outils aratoires par leurs actions ont un effet sur la teneur en eau dans le sol donc sur la conservation de l'eau dans le sol. Les résultats montrent que le labour permet une augmentation de la teneur en eau au niveau du premier horizon, et que l'humidité du sol diminue légèrement après passage du cover crop et du cultivateur a dent. Au contraire, ces résultats ne sont pas en concordance avec ceux obtenu par Echcherki et al, (2020), qui ont conclu que les outils aratoires quelques soit leur mode d'action par leur passage, font diminuer l'humidité du sol sur les premiers horizons (0 – 10 cm) et (10 – 20 cm), cela peut être expliqué par la perturbation du sol par les pièces travaillantes des outils aratoires sur les 15 premiers centimètres du sol ce qui a provoqué un dessèchement du sol par évaporation.

3.4.1.2 Impact de la succession des outils aratoires sur la porosité totale du sol

Le deuxième paramètre analysé est la porosité, cette dernière conditionne pour une grande part la rétention d'eau par le sol, l'aération des racines, et leur progression dans le sol. L'analyse de l'effet des outils aratoires sur la densité apparente et sur la porosité est représentée dans l'histogramme suivant :

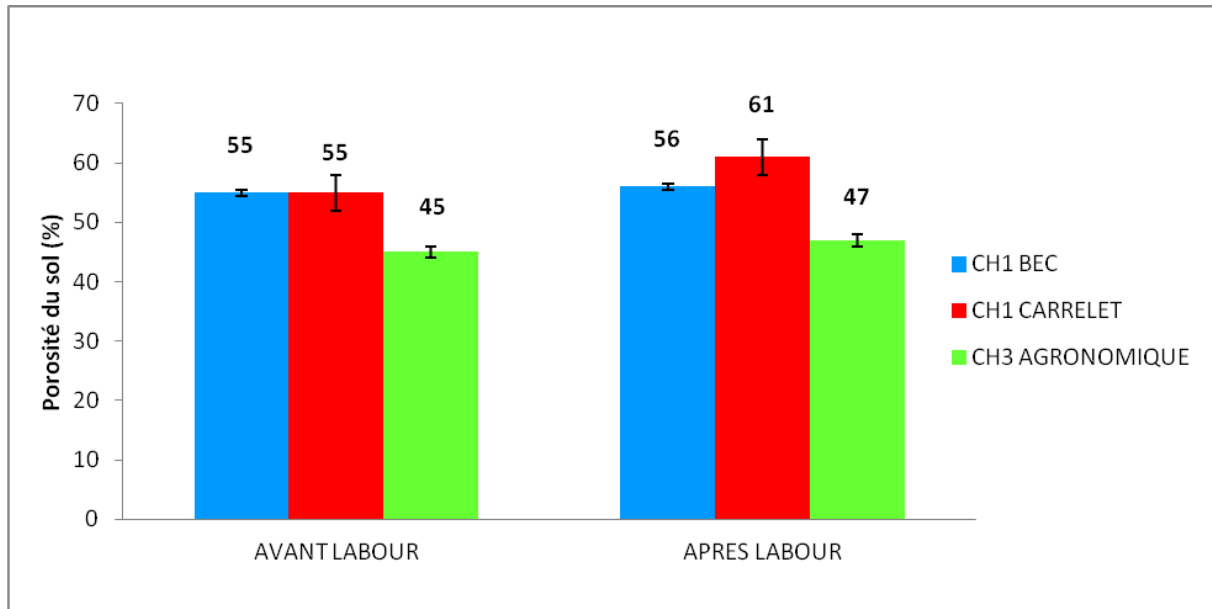


Figure 3.3 : Variation de la porosité du sol avant et après labour pour les différentes chaînes

Les résultats de la variation de la porosité avant et après labour montre que la porosité avant labour est située autour de 55%, elle passe à 56% pour les sols labourés avec bec de canard, et à 60,83% pour les sols labourés avec carrelet mobile. Par ailleurs, le labour agronomique a permis d'augmenter la porosité de 2% sur les premiers centimètres du sol, alors qu'au contraire, la porosité reste stable sur les autres horizons du sol. Selon les essais de Amrani et Zoubiri (2009), cette évolution de la porosité après labour est très importante pour le soc à carrelet mobile. Ce dernier, a permis de travailler en profondeur contrairement au soc bec de canard qui présente un travail superficiel principalement sur cette charrue et au niveau du sol de l'exploitation. Un autre constat a été enregistré, est que le sol est moins compacté. Par ailleurs, sur des essais réalisés par Feddal et Adli, (2008), après labour ils ont constaté un accroissement accru de la porosité, l'écart par rapport à la valeur initiale est de 8.98%.

Après le passage des autres outils, la porosité augmente légèrement et contribue pour un bon développement de la plante, ils ont remarqué toutefois une légère diminution de la porosité après le développement de la culture (stade montaison), cette diminution est due

essentiellement au phénomène du tassement causé par le passage du tracteur pour effectuer les différents traitements.

Par ailleurs, puisque la porosité se calcule à partir de la densité apparente par l'intermédiaire d'une formule faisant intervenir la densité réelle qui est constante pour un type de sol donné, les constatations évoquées pour la porosité s'appliquent pour la densité apparente.

On peut conclure que le passage des outils aratoires contribue à la création et le maintien d'une forte porosité structurale.

3.4.1.3 Impact de la succession des outils aratoires sur la résistance mécanique du sol

La mesure de la résistance pénétrométrique au moyen d'un pénétromètre est l'un des indicateurs fréquemment utilisés pour donner un aperçu sur l'état de compaction du sol et la contrainte qu'oppose le sol à la progression des racines. Nous allons analyser dans ce qui suit l'évolution de la résistance pénétrométrique du sol avant et après labour pour les chaînes d'outils étudiés, les résultats sont mentionnés dans la figure suivante :

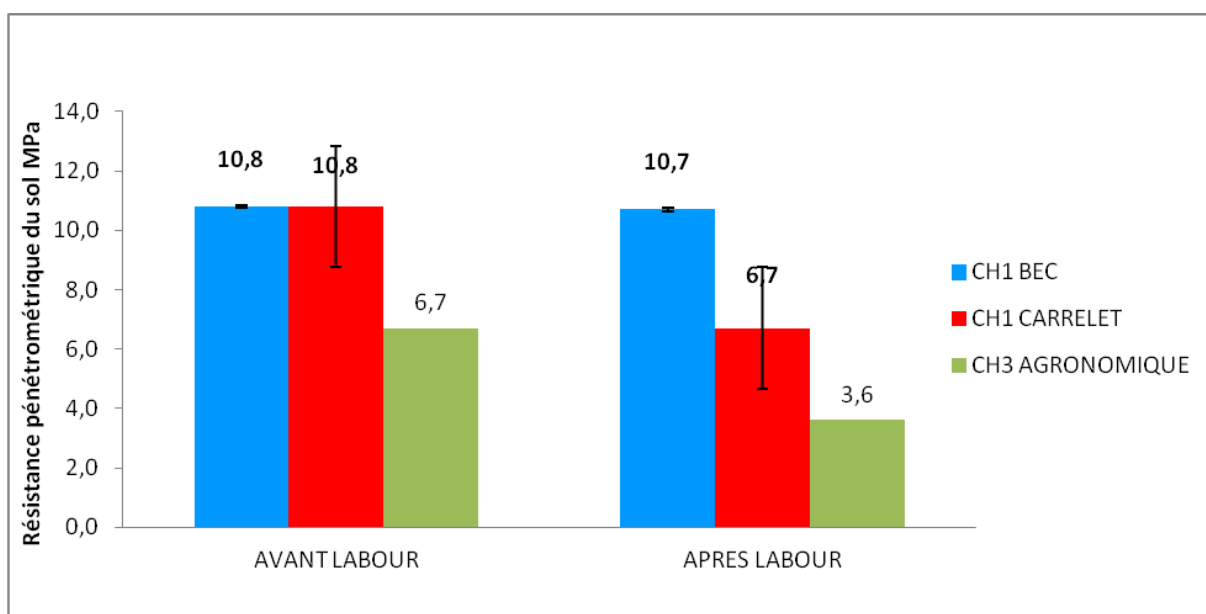


Figure 3.4 : Variation de la résistance pénétrométrique du sol avant et après le labour pour les trois chaînes d'outils

D'après les résultats obtenus, la résistance mécanique des sols a diminué brusquement de 10,76% jusqu'à 6,18% pour le carrelet mobile, par contre on remarque que le bec de canard a marqué un écart de 0,11% par rapport à la valeur initiale, donc la charrue à soc type bec de canard n'a pas participé à la diminution de la résistance du sol.

D'une manière générale, les deux chaînes d'outils de préparation du sol avec carrel mobile et charrue déchaumeuse, malgré leurs différences ont un effet diminutif sur la R_p du sol, ils permettent la diminution la plus importante de R_p sur tout l'horizon du sol, par rapport à la charrue bec de canard.

Ces résultats sont en concordance avec ceux de Amara et al, (2008), Feddal et al, (2015), qui ont montré que la résistance pénétrométrique du sol est modifiée par l'outil aratoire utilisé. Ils ont constaté qu'après passage des outils aratoires, la résistance pénétrométrique du sol diminue fortement après le labour, remonte légèrement après le cover crop et diminue encore après le passage du cultivateur à dents et remonte légèrement au stade montaison et ce pour le premier horizon (entre 0-10 cm). Pour le deuxième horizon, compris entre 10-20 cm les valeurs de la résistance pénétrométrique sont plus importantes et suivent la même évolution sauf qu'après le passage du cultivateur à dents la valeur de R_p augmente légèrement elle passe de 11.75 à 12.95 daN/cm². Pour ce qui est du troisième horizon, la valeur de la résistance pénétrométrique est plus faible avant le labour, elle n'est que de 7.5 daN/cm², puis augmente progressivement pour atteindre une valeur de 14.47 daN/cm² et diminue légèrement après le développement de la culture (stade montaison) ce qui est justifié par les nombreux passages du tracteur.

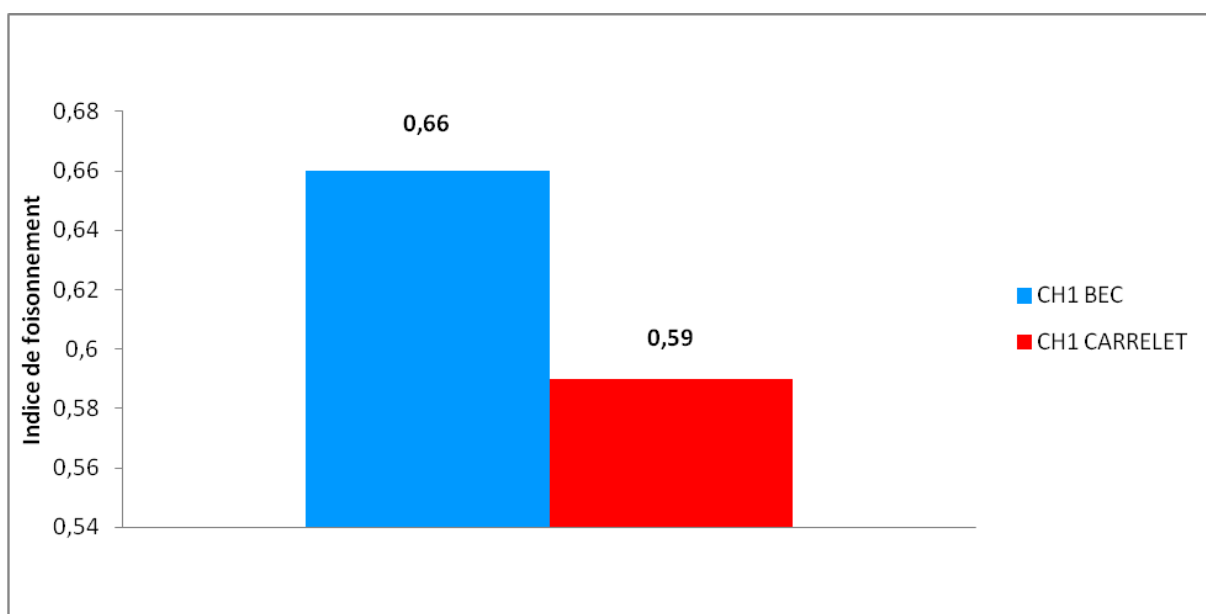
En outre, une augmentation significative de la résistance à la pénétration (R_p) peut être observée en fonction de la porosité, particulièrement lorsque le sol est sec. Selon les travaux d'Isabelle Breune (1997), cette relation s'explique par le fait qu'à un potentiel matriciel de 33 kPa, valeur correspondant approximativement à la capacité au champ d'un sol sableux la corrélation entre la porosité et R_p est quasiment linéaire.

Par ailleurs, la porosité est une mesure volumique, tandis que la R_p est une mesure ponctuelle, ce qui peut parfois engendrer des différences d'interprétation. Il arrive ainsi que la R_p augmente avec la profondeur sans qu'une variation notable de la densité apparente ne soit détectée. Ce phénomène s'explique généralement par l'accroissement de la friction le long de la tige du pénétromètre à mesure que la profondeur augmente (Soane, 1973). Par conséquent, se fier uniquement aux valeurs de R_p peut conduire à une interprétation erronée, suggérant la présence d'une zone compacte là où elle n'existe pas réellement. Il est donc recommandé d'associer la mesure de R_p à d'autres paramètres, notamment l'humidité du sol (H %) et la porosité (n %), afin d'obtenir une évaluation plus précise de l'état structural du sol.

3.4.1 Observation des indices qualitatifs de labour

3.4.1.1 L'indice de foisonnement

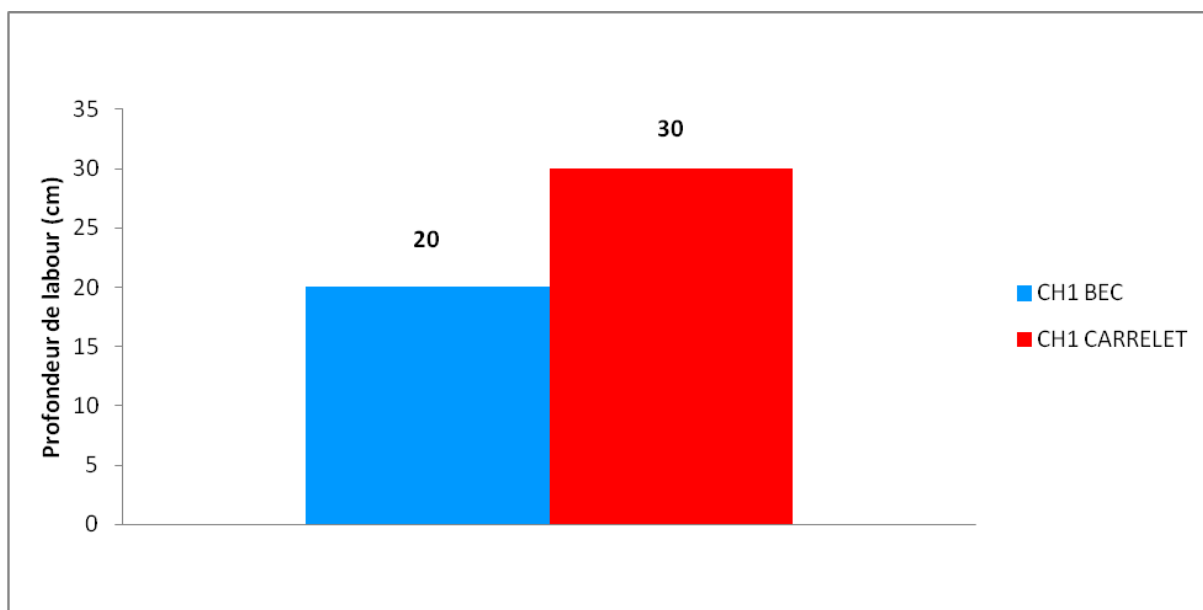
Le foisonnement est un phénomène d'augmentation de volume. Cette augmentation se produit lorsqu'on réalise un labour ou une tranchée en retirant (excavant) les matériaux du sol. L'augmentation de volume est variable et peut dépendre de paramètres extérieurs comme l'humidité du sol. On retient que cette augmentation se calcule en fonction du matériau excavé, et peut varier de 10 à 40 % du volume initial en place. Les résultats de mesure de l'indice de foisonnement sont mentionnés dans la figure suivante :



Cet indice, permet de donner un aperçu sur le volume du sol travaillé, il est important pour la CH1 par rapport à la CH2 donc le volume du sol est plus important après le passage de la charrue à bec de canard, où le développement racinaire des cultures est important.

3.4.1.2 La profondeur de labour atteinte par les deux corps de charrue

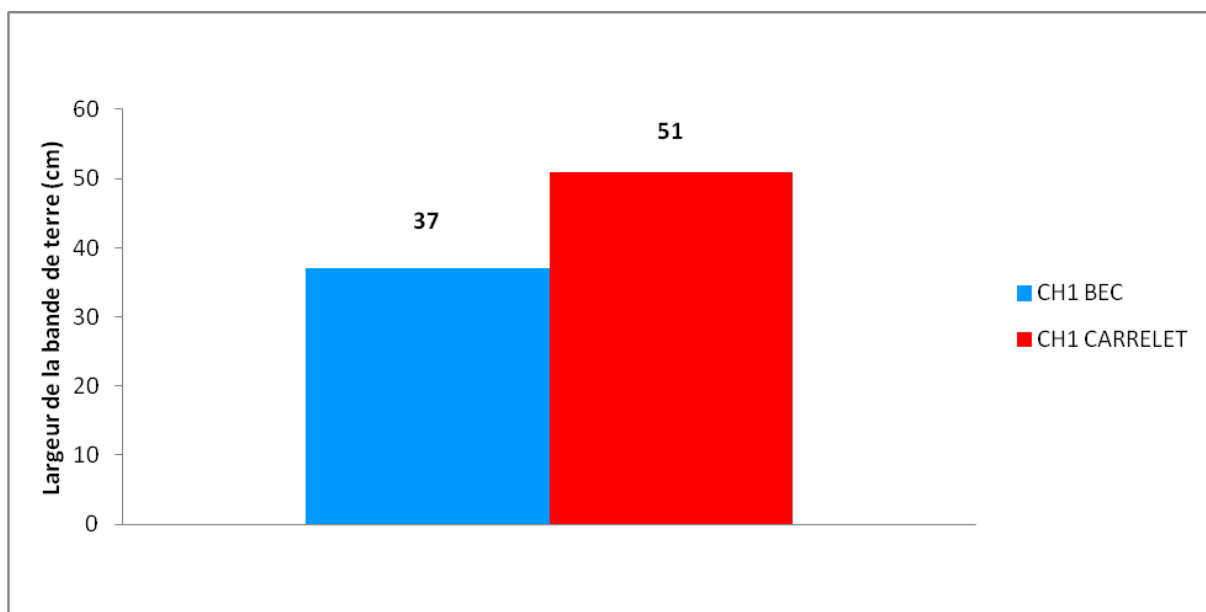
Le labour profond est défini comme un travail à une profondeur supérieure à 20 cm, qui provoque un effritement et un mélange visibles du sol. Les résultats de la profondeur de labour mesurées après le passage des deux charrues est mentionnées dans la figure suivante :



Après le passage des deux charrues sur le sol avec un taux d'humidité de 21,45%, nous avons mesuré une profondeur maximale atteinte par le bec de canard de 23 cm, alors que celle atteinte par le carrelet avoisine les 30 cm. Ce résultat nous permet de conclure que le carrelet mobile possède une capacité de pénétration plus importante dans des conditions d'humidité proche de la capacité au champ, cela peut impacter positivement et indirectement la croissance de la culture à mettre en place, cela permet de réguler des relations importantes dans le sol, notamment l'air, l'eau et la thermique. Ils jouent un rôle clé dans la formation des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.

3.4.1.3 Largeur de la bande de terre

C'est un indice caractéristique de la forme et des dimensions du soc de la charrue. Les résultats dans l'histogramme suivant ont montré que la largeur de la bande de terre est plus importante avec un carrelet mobile (51cm) par rapport au bec de canard (37 cm).



Le rapport entre la profondeur et la largeur de la raie détermine le type de labour obtenu, qui peut être dressé (avec des résidus végétaux déposés sur le flanc du labour), couché (résidus en fond de raie) ou intermédiaire. Dans notre étude, nous observons que l'inclinaison de la bande de terre est légèrement plus marquée avec la charrue à carrelet mobile (37°) qu'avec celle à bec de canard (35°). Cependant, les deux charrues produisent un labour de type couché. D'un point de vue agronomique, ce type de labour est à éviter en raison des risques d'évolution anaérobie des résidus organiques. Il est préférable d'opter pour un labour intermédiaire à dressé, tel que le « labour d'hiver », afin de favoriser une meilleure décomposition de la matière organique. Concernant la gestion des adventices, l'objectif principal est d'assurer un retournement complet de l'horizon de surface pour enfouir les graines à une profondeur minimale de 20 cm. Enfin, toute modification significative de la profondeur de labour doit s'accompagner d'un ajustement de la hauteur des rasettes afin de garantir un travail optimal du sol.

3.5 Discussion générale

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence du travail du sol et, plus particulièrement, de la géométrie des pièces travaillantes sur l'évolution des propriétés physico-mécaniques du sol. Les différences observées entre le soc à bec de canard et le soc à carrelet mobile montrent que le mode d'action de l'outil conditionne fortement l'intensité des modifications induites dans l'horizon travaillé. D'une manière générale, le labour a entraîné une augmentation de la teneur en eau et de la porosité, associée à une diminution de la

résistance pénétrométrique. Toutefois, l'amplitude de ces modifications varie selon le type de corps de charrue, la profondeur de travail et les conditions initiales du sol.

Concernant la teneur en eau, les résultats montrent une légère augmentation après labour. Elle passe de 21,5 % avant l'intervention à 22,2 % après le passage du soc à bec de canard et à 21,8 % après celui du carrellet mobile. Bien que ces différences ne soient pas statistiquement significatives, elles montrent que le travail mécanique peut modifier temporairement les conditions de stockage et de redistribution de l'eau dans l'horizon travaillé. Des résultats comparables ont été obtenus par Feddal et al. (2015), qui ont observé une augmentation de l'humidité du sol après labour. De même, Amara et al. (2008) ont montré que la succession des outils aratoires modifie la teneur en eau et peut favoriser sa conservation dans le sol.

Cette évolution peut être expliquée par la modification de la structure du sol résultant de la fragmentation, du soulèvement et du déplacement des agrégats. En augmentant temporairement le volume des pores, le labour peut améliorer l'infiltration de l'eau et favoriser son stockage dans l'horizon travaillé. Toutefois, cet effet dépend fortement des conditions hydriques du sol au moment de l'intervention. À l'inverse, Echcherki et al. (2020) ont observé une diminution de l'humidité dans les horizons superficiels après le passage des outils aratoires, qu'ils attribuent à l'ameublissement du sol et à l'augmentation des pertes d'eau par évaporation. Ces résultats apparemment contradictoires montrent que l'effet du labour sur l'humidité ne dépend pas uniquement du type d'outil, mais également de la texture du sol, de son état hydrique initial, des conditions climatiques et du délai séparant le travail du sol de la mesure.

L'évolution de la porosité totale apparaît plus marquée. La porosité initiale, proche de 55 %, atteint environ 56 % après le passage de la charrue à bec de canard et 60,83 % avec le soc à carrellet mobile. Cette augmentation traduit l'ameublissement du sol provoqué par l'action mécanique des pièces travaillantes. Ces résultats concordent avec ceux d'Amrani et Zoubiri (2009), qui ont constaté une augmentation importante de la porosité après le passage d'un soc à carrellet mobile. De même, Feddal et Adli (2008) ont observé un accroissement de la porosité après labour pouvant atteindre près de 9 % par rapport à l'état initial.

L'augmentation plus importante obtenue avec le carrellet mobile peut être associée à sa capacité de pénétration plus élevée. Dans les conditions expérimentales de cette étude, ce corps de charrue a atteint une profondeur avoisinant 30 cm, contre environ 23 cm pour le bec

de canard. Le carrel mobile agit donc sur un horizon plus profond et provoque une perturbation structurale plus importante. La profondeur de travail et les caractéristiques géométriques des pièces travaillantes sont en effet déterminantes dans l'intensité de la fragmentation et du déplacement du sol. Des travaux plus récents ont également montré que la géométrie des outils et leur profondeur d'intervention influencent directement la résistance du sol, la perturbation de sa structure et les besoins énergétiques associés au travail du sol (Vanderhasselt et al., 2023).

Cette augmentation de la porosité est particulièrement importante d'un point de vue agronomique. Un sol suffisamment poreux favorise la circulation de l'air et de l'eau, améliore l'infiltration et offre généralement de meilleures conditions à la croissance racinaire. Cependant, l'état ameubli produit par le labour peut être temporaire. Sous l'effet des précipitations, du tassement naturel et des passages ultérieurs des engins agricoles, le sol peut progressivement se reconsolider. Cette évolution explique les diminutions de porosité parfois observées au cours du cycle cultural après une augmentation initiale provoquée par le labour (Feddal et Adli, 2008).

Les résultats relatifs à la résistance pénétrométrique renforcent cette interprétation. Le passage du carrel mobile provoque une diminution importante de la résistance du sol, alors que l'effet du bec de canard reste beaucoup plus limité. Cette différence indique que les deux formes de socs n'agissent pas de la même manière sur l'organisation structurale du sol. Le carrel mobile, par sa plus grande capacité de pénétration et son action sur un volume de sol plus important, semble favoriser davantage la rupture et le déplacement des agrégats.

Ces observations sont cohérentes avec les résultats d'Amara et al. (2008) et de Feddal et al. (2015), qui ont montré que la résistance pénétrométrique diminue fortement après le labour avant d'évoluer à nouveau sous l'effet des opérations culturales successives et du tassement du sol. La diminution de la résistance pénétrométrique immédiatement après le labour résulte principalement de la désorganisation de la structure initiale et de l'augmentation de la porosité créée par le passage de l'outil.

Il convient cependant de considérer la résistance pénétrométrique avec prudence, car elle est fortement influencée par l'humidité du sol. Un même sol peut présenter une résistance relativement faible lorsqu'il est humide et une résistance beaucoup plus élevée lorsqu'il se dessèche. Breune (1997) a montré que les relations entre résistance mécanique, porosité et

teneur en eau deviennent particulièrement importantes lorsque l'état hydrique du sol varie. Par ailleurs, Soane (1973) souligne que les mesures pénétrométriques peuvent également être affectées par la profondeur de mesure et les frottements développés le long de la tige du pénétromètre. Ainsi, l'interprétation de la résistance à la pénétration ne doit pas être réalisée isolément, mais conjointement avec des paramètres tels que la teneur en eau et la porosité.

L'analyse simultanée de la porosité et de la résistance pénétrométrique met donc en évidence une relation cohérente entre ces deux paramètres. L'augmentation de la porosité observée après le passage du carrelot mobile s'accompagne d'une diminution plus importante de la résistance du sol. Ce comportement traduit un état structural plus meuble immédiatement après le labour. Toutefois, cette amélioration ne doit pas nécessairement être considérée comme permanente, puisque les passages ultérieurs des machines agricoles peuvent progressivement provoquer une recompaction du sol (Vanderhasselt et al., 2023).

Les différences entre les deux corps de charrue apparaissent également à travers les indices qualitatifs du labour. L'indice de foisonnement est plus élevé pour la charrue à bec de canard, indiquant que celle-ci produit une augmentation plus importante du volume apparent du sol après son passage. Le foisonnement résulte de la fragmentation et de la réorganisation des agrégats lors du déplacement de la bande de terre. Son importance dépend donc directement de la géométrie des pièces travaillantes, de la profondeur de travail et de l'état hydrique du sol.

En revanche, le carrelot mobile se distingue par une profondeur et une largeur de travail supérieures. La profondeur maximale enregistrée avoisine 30 cm avec le carrelot mobile contre 23 cm avec le bec de canard. De même, la largeur de la bande travaillée atteint environ 51 cm avec le carrelot mobile contre 37 cm avec le bec de canard. Ces résultats montrent clairement que la forme et les dimensions du soc déterminent l'étendue du volume de sol mobilisé. Cette observation est cohérente avec les travaux montrant que les paramètres géométriques des outils aratoires influencent la profondeur de pénétration, la largeur de rupture du sol et les efforts nécessaires au travail (Vanderhasselt et al., 2023).

Le rapport entre la largeur et la profondeur du travail conditionne également le mode de retournement de la bande de terre. Dans les conditions expérimentales étudiées, l'inclinaison obtenue est de l'ordre de 35° avec le bec de canard et de 37° avec le carrelot mobile. Dans les deux cas, le profil obtenu correspond principalement à un labour couché. Ce type de labour

peut assurer un retournement important de la bande de terre, mais il peut également favoriser l'accumulation des résidus végétaux au fond de la raie. Lorsque l'aération devient insuffisante, la décomposition de ces résidus peut être ralentie. Dans ce contexte, un labour intermédiaire ou légèrement dressé peut représenter un meilleur compromis entre l'enfouissement des adventices, l'aération du sol et la décomposition des résidus organiques.

D'une manière générale, les résultats montrent donc que les deux corps de charrue présentent des modes d'action différents. Le soc à carrelet mobile se caractérise principalement par une profondeur et une largeur de travail plus importantes, une augmentation plus marquée de la porosité et une diminution plus forte de la résistance pénétrométrique. Le soc à bec de canard produit, quant à lui, un foisonnement plus important et une légère augmentation supérieure de la teneur en eau immédiatement après le labour. Ces différences traduisent directement l'influence de la géométrie des pièces travaillantes sur les interactions entre le sol et l'outil.

Il apparaît ainsi que l'évaluation de la qualité du travail du sol ne peut pas reposer sur un seul paramètre. Une augmentation du foisonnement ou de la porosité n'est pas suffisante pour conclure à une meilleure qualité globale du labour. Il est nécessaire de considérer simultanément la teneur en eau, la porosité, la résistance mécanique, la profondeur, la largeur de travail et le degré de retournement de la bande de terre. Comme l'ont montré **Amara** et al. (2008) et Feddal et al. (2015), les propriétés physiques et mécaniques du sol sont étroitement interdépendantes et évoluent conjointement sous l'action des outils aratoires.

Finalement, les résultats obtenus confirment que la géométrie du corps de charrue constitue un facteur déterminant du comportement du sol lors du labour. Le choix du type de soc doit par conséquent être raisonné en fonction des caractéristiques du sol, de son état hydrique, de la profondeur recherchée, de la culture à implanter et des objectifs agronomiques poursuivis. L'objectif n'est donc pas uniquement d'obtenir une fragmentation maximale du sol, mais de rechercher un compromis entre ameublissement, porosité, résistance mécanique, conservation de l'eau et qualité du retournement de la bande de terre, tout en limitant les risques de recompaction et de dégradation structurale au cours des interventions ultérieures.

Conclusion Générale

Conclusion générale et perspectives

Cette thèse avait pour objectif général de mieux comprendre l'interaction entre les outils aratoires et le sol, en mettant l'accent à la fois sur le comportement mécanique des surfaces actives des corps de charrue et sur les modifications physico-mécaniques induites dans le sol au cours du travail. L'approche adoptée a ainsi associé la caractérisation géométrique, la modélisation numérique par la méthode des éléments finis et l'expérimentation au champ. Deux types de corps de charrue couramment utilisés en Algérie, à carret mobile et à bec de canard, ont été étudiés afin d'identifier leurs particularités mécaniques et leur influence sur le comportement du sol.

Le premier volet de la recherche a porté sur la caractérisation et l'analyse mécanique des surfaces actives des deux corps de charrue. La méthode des éléments finis a permis d'examiner la distribution de la contrainte de Von Mises, le coefficient de sécurité, la déformation équivalente et le déplacement résultant sous des charges de 200, 400 et 600 daN. Les simulations ont montré que la géométrie de la pièce travaillante conditionne fortement la localisation et la transmission des efforts. Le soc à bec de canard présente une concentration plus importante des sollicitations au niveau de sa pointe et atteint plus rapidement le domaine de déformation plastique, notamment à partir de 400 daN. À l'inverse, le soc à carret mobile conserve un comportement majoritairement élastique sur une plage de chargement plus étendue, le carret contribuant à absorber et à redistribuer une partie des efforts.

L'analyse comparative met également en évidence que le coefficient de sécurité devient critique à la charge la plus élevée, soit 600 daN, pour les deux configurations, même si le corps à carret mobile présente globalement une meilleure résistance. L'étude du déplacement résultant montre une dissipation progressive des efforts le long de la surface active, accompagnée d'une légère rotation du versoir sous l'effet du chargement. Dans l'ensemble, ces résultats confirment que la forme et la géométrie des pièces travaillantes jouent un rôle déterminant dans leur tenue mécanique, leur durabilité et, par conséquent, dans les possibilités d'optimisation des corps de charrue.

Le second volet expérimental a été consacré à l'étude du comportement physico-mécanique du sol sous l'action successive des pièces travaillantes d'une chaîne classique de préparation du sol. Les résultats montrent que le labour modifie sensiblement l'état physique du sol. Une légère augmentation de la teneur en eau a été observée après le passage de la charrue, tandis que la porosité tend à augmenter, particulièrement avec le corps à carret mobile. Cette évolution contribue à améliorer l'aération du sol et à créer des conditions plus favorables au

développement du système racinaire. Parallèlement, la résistance mécanique du sol diminue après le travail, ce qui facilite la pénétration des racines et confirme l'effet d'ameublissement recherché par le labour.

La comparaison des deux types de socs a également montré des comportements distincts. Le soc à bec de canard agit sur un volume de sol plus important, alors que le carret mobile permet d'obtenir une profondeur et une largeur de travail plus importantes et une structuration plus régulière du profil travaillé. Ces différences illustrent le lien étroit entre la géométrie de l'outil, son mode d'action et la réponse du sol. Elles montrent également qu'un choix raisonné du corps de charrue doit tenir compte non seulement de sa résistance mécanique et de ses besoins énergétiques, mais aussi des objectifs agronomiques recherchés et de l'état initial du sol.

Au terme de cette étude, l'intérêt d'une approche intégrée associant conception mécanique de l'outil et évaluation agronomique de son action sur le sol apparaît clairement. Les résultats obtenus constituent une base pour l'amélioration et l'optimisation des corps de charrue utilisés dans les conditions agricoles algériennes. Ils peuvent contribuer à orienter la conception vers des pièces plus résistantes, mieux adaptées aux contraintes de travail et susceptibles de limiter les dépenses énergétiques tout en maintenant une qualité satisfaisante du labour.

Plusieurs perspectives peuvent prolonger ce travail. Il serait notamment pertinent d'améliorer la caractérisation géométrique des surfaces actives par des techniques tridimensionnelles telles que le scanner 3D ou la photogrammétrie, afin d'obtenir des modèles plus précis que ceux issus du pantographe. La validation des simulations numériques devrait également être renforcée par des essais instrumentés sur banc d'essai et au champ, avec mesure simultanée des efforts de traction, de la consommation énergétique et des modifications du sol. Enfin, l'intégration de modèles avancés d'interaction sol-outil, combinée à l'étude de différentes textures et teneurs en eau du sol, permettrait de développer des outils mieux adaptés aux conditions pédoclimatiques locales et d'aboutir à une optimisation conjointe des performances mécaniques, énergétiques et agronomiques du labour.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- Abbache S, & Benosmane S. (2016). *Analyse du comportement physico-mécanique du sol sous l'action de trois techniques culturales : Cas du blé dur (Simeto)* [Mémoire de master, École Nationale Supérieure Agronomique, Département de Génie Rural].
- Agenbag, G. A., & Maree, P. C. J. (1991). Effect of tillage on some soil properties, plant development and yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) in stony soil. *Soil and Tillage Research*, 21(1–2), 97–112. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90008-L](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90008-L)
- Amara, M. (1983). *Influence des principaux paramètres constructifs de deux corps de charrue à versoir universel et cylindrique et de la vitesse de travail sur les indices qualitatifs du labour* [Thèse de magistère, École Nationale Supérieure Agronomique, El-Harrach, Alger].
- Amara, M. (2007). *Contribution à la modélisation de l'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* [Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure Agronomique, El-Harrach, Alger].
- Amara, M. (2013). Experimental model to estimate draught force for mouldboard ploughs incorporating effects of plough geometric parameters. *International Journal of Advanced Agricultural Research*, 1, 27–36.
- Amara, M. (2014). Analyse du comportement du sol sous l'action de trois techniques de mise en place d'un blé dur (*Triticum durum*) : Effet sur le développement des racines et conséquences sur le rendement. *Nature & Technology*, 12.
- Amara, M., & Taib A. (2007). *Contribution à l'analyse de la forme des pièces travaillantes des outils aratoires : Cas d'un corps de charrue à soc* [Mémoire d'ingénieur d'État, École Nationale Supérieure Agronomique, El-Harrach, Alger].
- Onwualu, A. P., & Anazodo, U. G. N. (1989). Soil compaction effects on maize production under various tillage methods in a derived Savannah zone of Nigeria. *Soil and Tillage Research*, 14(2), 99–114. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(89\)90025-1](https://doi.org/10.1016/0167-1987(89)90025-1)
- Barthélémy, P., Boissongontier, D., & Lajoux, P. (1987). *Choisir les outils de travail du sol*. ITCF.
- Bhattacharyya, R., Prakash, V., Kundu, S., & Gupta, H. S. (2006). Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. *Soil and Tillage Research*, 86, 129–140.
- Binesse, M. (1970). Cisaillement et résistance spécifique du sol lors du labour classique. *Études du CNEEMA*, (341–342).
- Bradford, J. M. (1982). Penetrability. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods* (2nd ed., pp. 463–478). American Society of Agronomy.

- Campbell, A. J., Carter, M., & McLaughlin, N. (2001). *Fuel consumption and draft requirements under various tillage systems*. Agri-Info, 01-10.
- Castrignanò, A., Lopez, G., & Stelluti, M. (1994). Temporal and spatial variability of electrical conductivity, Na content and sodium adsorption ratio of soil saturation extract measurements. *European Journal of Agronomy*, 3(3), 221–226.
- La date 1988 présente dans votre bibliographie était incorrecte ; la publication date de 1994.
- Dalleine, E. (1962). *Notes pour le siège* (Nos. 904, 1228).
- Dalleine, E. (1964). Comment étudier un versoir de charrue. *Revue Agricole de France*, (32).
- Dalleine, E. (1971). Le chisel et le cultivateur. *Techniques Agricoles*, fascicule 504, 163–168.
- Dalleine, E. (1974). La préparation des terres et le labour de qualité. *CNEEMA*, (193–194), 13–18.
- Dalleine, E. (1981). Labour de printemps en limon humide. *Bulletin du CEMAGREF*, (283–284), 12–15.
- Ehlers, W., Köpke, U., Hesse, F., & Böhm, W. (1983). Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil and Tillage Research*, 3, 261–275.
- Erbach, D. C. (1987). Measurement of soil bulk density and moisture. *Transactions of the ASAE*, 30, 922–931.
- Farhani, H. J., et al. (1998). Soil water storage in dryland cropping systems: The significance of cropping intensification. *Soil Science Society of America Journal*. À compléter avec volume, numéro et pages si disponibles dans votre source.
- Faure, A. (1968). *Contribution à l'étude de l'action d'un versoir sur le sol* [Thèse de doctorat de spécialité].
- Faure, A. (1969). Contribution à l'étude de l'action d'un versoir sur le sol. I. Étude de la géométrie des versoirs : Classification. *Annales Agronomiques*, 20(6), 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), 159–195.
- Feddal, M. A. (2011). *Analyse du comportement du sol sous l'action de deux techniques de mise en place d'une culture de céréale (Triticum durum)* [Thèse de magistère, École Nationale Supérieure Agronomique, El-Harrach, Alger].

- Feddal, M. A. (2015). *Problématique de l'introduction des techniques culturales simplifiées pour la mise en place des grandes cultures en Algérie* [Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure Agronomique, El-Harrach, Alger].
- Ferreras, L. A., Costa, J. L., Garcia, F. O., & Pecorari, C. (2000). Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structurally degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern Pampa of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 54, 31–39.
- Godwin, R. J., O'Dogherty, M. J., Saunders, C., & Balafoutis, A. T. (2007). A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed. *Biosystems Engineering*, 97(1), 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.02.001>
- Grant, C. A., & Lafond, G. P. (1993). The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, 73, 223–232.
- Hadas, A., Parkin, T. B., & Stahl, P. D. (1998). Reduced CO₂ release from decomposing wheat straw under N-limiting conditions: Simulation of carbon turnover. *European Journal of Soil Science*, 49, 487–494.
- Halvorson, A. D., Black, A. L., Krupinsky, J. M., Merrill, S. D., Wienhold, B. J., & Tanaka, D. L. (2000). Spring wheat response to tillage and nitrogen fertilization in rotation with sunflower and winter wheat. *Agronomy Journal*, 92, 136–144. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.921136x> ACSESS
- Hammel, J. E. (1989). Long-term tillage and crop rotation effects on bulk density and soil impedance in northern Idaho. *Soil Science Society of America Journal*, 53, 1515–1519.
- Houyou, Z. (1998). *Contribution à la modélisation de l'interface outils aratoires-sol : Analyse de l'influence de la forme de deux corps de charrue à soc sur l'effort de résistance à la traction* [Mémoire de magistère, École Nationale Supérieure Agronomique, El-Harrach, Alger].
- Ibrahmi, A., Bentaher, H., Hbaieb, M., Maalej, A., & Mouazen, A. M. (2015). Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 1. Finite element simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 117, 258–267. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.006>
- Lal, R. (1983). *No-till farming: Soil and water conservation and management in the humid and subhumid tropics* (IITA Monograph No. 2). International Institute of Tropical Agriculture.
- Lal, R. (1985). A soil suitability guide for different tillage systems in the tropics. *Soil and Tillage Research*, 5, 179–196.
- Lindwall, C. W. (1984). Minimizing tillage operations. In *Soil conservation—Providing for the future*. Christian Farmers Federation.

- Magnan, J. P. (1991). Résistance au cisaillement. In *Techniques de l'ingénieur : Mécanique des sols* (C216).
- McGarry, D., Bridge, B. J., & Radford, B. J. (2000). Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics. *Soil and Tillage Research*, 53(2), 105–115.
- O'Sullivan, M. F., Dickson, J. W., & Campbell, D. J. (1987). Interpretation and presentation of cone resistance data in tillage and traffic studies. *Journal of Soil Science*, 38, 137–148.
- Osuji, G. E. (1984). Water storage, water use and maize yield for tillage systems on a tropical Alfisol in Nigeria. *Soil and Tillage Research*, 4(4), 339–348. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(84\)90033-3](https://doi.org/10.1016/0167-1987(84)90033-3)
- Osunbitan, J. A., Oyedele, D. J., & Adekalu, K. O. (2005). Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. *Soil and Tillage Research*, 82(1), 57–64.
- Pelegrín, F., Moreno, F., Martín-Aranda, J., et al. (1990). The influence of tillage methods on soil physical properties and water balance for a typical crop rotation in SW Spain. *Soil and Tillage Research*, 16(4), 345–358.
- Perdok, U. D., & Kouwenhoven, J. K. (1994). Soil-tool interactions and field performance of implements. *Soil and Tillage Research*, 30(2–4), 283–326. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(94\)90008-6](https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90008-6)
- Radcliffe, D. E., Clark, R. L., Tollner, E. W., et al. (1988). Effect of tillage practices on infiltration and soil strength of a Typic Hapludult soil after ten years. *Soil Science Society of America Journal*, 52(3), 798–804.
- Rhoton, F. E., Shipitalo, M. J., & Lindbo, D. L. (2002). Runoff and soil loss from Midwestern and Southeastern US silt loam soils as affected by tillage practice and soil organic matter content. *Soil and Tillage Research*, 66, 1–11.
- Saks, E., & Heinloo, M. (2001). Stresses and displacements in a semidigger moldboard and a ploughshare. *Journal of Computational and Applied Mechanics*, 2(2), 223–236.
- Šarauskis, E., Romaneckas, K., & Buragienė, S. (2009). Impact of conventional and sustainable soil tillage and sowing technologies on physical-mechanical soil properties. *Environmental Research, Engineering and Management*, 49(3), 36–43.
- Soane, B. D. (1973). Techniques for measuring changes in the packing state and cone resistance of soil after the passage of wheels and tracks. *Journal of Soil Science*, 24(3), 311–323.
- Unger, P. W., & Jones, O. R. (1998). Long-term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum. *Soil and Tillage Research*, 45, 39–57.

- Vanderhasselt, A., Cool, S., D'Hose, T., & Cornelis, W. (2023). How tine characteristics of subsoilers affect fuel consumption, penetration resistance and potato yield of a sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*, 228, 105631.
- Wander, M. M., & Bollero, G. A. (1999). Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Science Society of America Journal*, 63(4), 961–971.
- Yasin, M., Grisso, R. D., Bashford, L. L., et al. (1993). Normalizing cone resistance values by covariance analysis. *Transactions of the ASAE*, 36(5), 1267–1270.
- Zerkani, M. A. (2014). *Analyse du comportement mécanique des surfaces actives des pièces travaillantes des outils aratoires (charrue à socs) en vue de leur optimisation* [Mémoire d'ingénieur agronome, École Nationale Supérieure Agronomique, El-Harrach, Alger].
- Zerkani, M. A. (2016). *Analyse par simulation du comportement du sol sous l'action de deux formes de socs* [Mémoire de master, École Nationale Supérieure Agronomique, El-Harrach, Alger].
- Zhai, R., Kachanoski, R. G., & Voroney, R. P. (1990). Tillage effects on the spatial and temporal variations of soil water. *Soil Science Society of America Journal*, 54(1), 186–192.
- Zhang, M., Dai, S., Gul, S., He, L., Chen, H., & Liu, D. (2024). Effect of plow pan on the redistribution dynamics of water and nutrient transport in soils. *Sustainability*, 16, 8859.

ANNEXES

Annexe 1 : Coordonnées des points des surfaces actives du corps de charrue à carrellet mobile [Zerkani et Amara, 2013]

X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
0	0	0
8	0	2
14	0	4
19	0	6
25	0	8
31,5	0	10
35,8	0	12
39	0	14
42	0	16
43,4	0	18
44,5	0	20
45	0	22
46	0	24
1	2	0
7,5	2	2
12,7	2	4
20,5	2	6
26,3	2	8
30,5	2	10
36,5	2	12
40,5	2	14
43,2	2	16
45	2	18
46,7	2	20
47,5	2	22
49,5	2	24
50,7	2	26
11,2	4	0
12	4	2
16	4	4
22,5	4	6
29,5	4	8
33,5	4	10
38	4	12
41,9	4	14
45,4	4	16
46,5	4	18
46,5	4	20
49,5	4	22

51	4	24
51,9	4	26
14	6	0
14,3	6	2
19,3	6	4
29	6	6
31	6	8
36,5	6	10
42,8	6	12
43,4	6	14
46	6	16
47	6	18
49,2	6	20
51	6	22
52	6	24
52,5	6	26
53	6	28
16	8	0
16	8	2
22	8	4
31,6	8	6
33,3	8	8
39,8	8	10
43	8	12
45,2	8	14
47,5	8	16
49,6	8	18
51	8	20
53,4	8	22
53,4	8	24
54,9	8	26
56,9	8	28
19	10	0
23	10	2
26,2	10	4
34	10	6
38	10	8
40,5	10	10
44,6	10	12
48,7	10	14
51,6	10	16
51,9	10	18
53,7	10	20
55	10	22

55	10	24
56	10	26
57,5	10	28
21	12	0
26,5	12	2
29	12	4
36,2	12	6
40	12	8
47	12	10
49,2	12	12
51,6	12	14
52,7	12	16
54	12	18
55	12	20
55,5	12	22
56,5	12	24
58,3	12	26
59,5	12	28
59,5	12	30
23,5	14	0
27,5	14	2
35	14	4
39,5	14	6
47,4	14	8
53	14	10
52	14	12
55	14	14
56,5	14	16
58,2	14	18
59	14	20
62	14	22
62,3	14	24
62,5	14	26
62,5	14	28
25,7	16	0
30,5	16	2
37	16	4
40	16	6
50,5	16	8
54	16	10
56,2	16	12
56,1	16	14
56,9	16	16
57,5	16	18

58,2	16	20
59	16	22
59	16	24
60,5	16	26
61,1	16	28
27,7	18	0
31,1	18	2
37	18	4
41,3	18	6
52	18	8
53,2	18	10
58,5	18	12
60	18	14
59,4	18	16
60	18	18
62,2	18	20
63	18	22
63,1	18	24
63,1	18	26
63,1	18	28
65,5	18	30
31	20	0
35	20	2
40,5	20	4
44,4	20	6
58,3	20	8
58,5	20	10
61,7	20	12
61,3	20	14
61,8	20	16
61,5	20	18
62,7	20	20
63,6	20	22
64	20	24
64,2	20	26
65	20	28
64,4	20	30
65,7	20	32
32,7	22	0
39,3	22	2
46	22	4
55	22	6
57,1	22	8
60,4	22	10

63	22	12
64,1	22	14
64,9	22	16
65,2	22	18
66,2	22	20
67,3	22	22
66,7	22	24
66,5	22	26
66,2	22	28
67	22	30
69	22	32
34	24	0
42	24	2
45	24	4
59,3	24	6
63,1	24	8
63	24	10
67,1	24	12
68,6	24	14
70,7	24	16
71,2	24	18
68,5	24	20
70	24	22
69,5	24	24
69	24	26
69,5	24	28
69,5	24	30
68	24	32
36,4	26	0
43,5	26	2
45	26	4
65,4	26	6
66,1	26	8
68,6	26	10
68,7	26	12
68,3	26	14
67,3	26	16
68,6	26	18
69	26	20
70	26	22
73	26	24
72,5	26	26
71,7	26	28
71,5	26	30

71,8	26	32
39,5	28	0
44,2	28	2
69,4	28	6
68,7	28	8
69,5	28	10
70,5	28	12
70,8	28	14
70,5	28	16
73	28	18
74	28	20
72,9	28	22
72,4	28	24
74,4	28	26
72,4	28	28
72,5	28	30
73,5	28	32
43,8	30	0
65,2	30	4
70	30	6
71,8	30	8
72	30	10
71,5	30	12
71,2	30	14
72,8	30	16
73,3	30	18
72	30	20
73,4	30	22
74,5	30	24
73,6	30	26
73,7	30	28
74,2	30	30
74,2	30	32
43,4	32	0
71,5	32	4
72,5	32	6
68,7	32	8
70,2	32	10
73,3	32	12
73,9	32	14
74	32	16
74,6	32	18
74,7	32	20
75,6	32	22

75,5	32	24
74,3	32	26
74,9	32	28
75	32	30
74,3	34	4
71,5	34	6
75,2	34	8
74,6	34	10
76,5	34	12
76,6	34	14
76,6	34	16
77,6	34	18
77,7	34	20
76,5	34	22
76,5	34	24
77,2	34	26
77,5	34	30
74,8	36	6
73,9	36	8
77	36	10
77,6	36	12
76,7	36	14
76,9	36	16
77,6	36	18
77,8	36	20
77,7	36	22
76,4	36	24
76,2	36	26
76	36	28
76	38	6
77,2	38	8
78,2	38	10
78	38	12
79,5	38	14
79,6	38	16
78	38	18
78,5	38	20
79,2	38	22
79	38	24
79	38	26
79	38	28
80,2	38	30
78,5	40	6
79,3	40	8

79,9	40	10
80,5	40	12
80,6	40	14
80,7	40	16
80,5	40	18
80,4	40	20
80	40	22
80,5	40	24
80,3	40	26
79	40	28
85,9	44	8
86,6	44	10
87,5	44	12
86,7	44	14
86,2	44	16
86	44	18
85,5	44	20
87,2	44	22
89,4	46	10
89,6	46	12
88	46	14
88	46	16
89	46	18
89	46	20
90,6	48	16

Annexe 2 : Coordonnées des points des surfaces actives du corps de charrue à bec de canard
[Zerkani et Amara, 2013]

X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
0	0	0
8	0	2
14	0	4
19	0	6
25	0	8
31,5	0	10
35,8	0	12
39	0	14
42	0	16
43,4	0	18
44,5	0	20
45	0	22
46	0	24
1	2	0

7,5	2	2
12,7	2	4
20,5	2	6
26,3	2	8
30,5	2	10
36,5	2	12
40,5	2	14
43,2	2	16
45	2	18
46,7	2	20
47,5	2	22
49,5	2	24
50,7	2	26
11,2	4	0
12	4	2
16	4	4
22,5	4	6
29,5	4	8
33,5	4	10
38	4	12
41,9	4	14
45,4	4	16
46,5	4	18
46,5	4	20
49,5	4	22
51	4	24
51,9	4	26
14	6	0
14,3	6	2
19,3	6	4
29	6	6
31	6	8
36,5	6	10
42,8	6	12
43,4	6	14
46	6	16
47	6	18
49,2	6	20
51	6	22
52	6	24
52,5	6	26
53	6	28
16	8	0
16	8	2

22	8	4
31,6	8	6
33,3	8	8
39,8	8	10
43	8	12
45,2	8	14
47,5	8	16
49,6	8	18
51	8	20
53,4	8	22
53,4	8	24
54,9	8	26
56,9	8	28
19	10	0
23	10	2
26,2	10	4
34	10	6
38	10	8
40,5	10	10
44,6	10	12
48,7	10	14
51,6	10	16
51,9	10	18
53,7	10	20
55	10	22
55	10	24
56	10	26
57,5	10	28
21	12	0
26,5	12	2
29	12	4
36,2	12	6
40	12	8
47	12	10
49,2	12	12
51,6	12	14
52,7	12	16
54	12	18
55	12	20
55,5	12	22
56,5	12	24
58,3	12	26
59,5	12	28
59,5	12	30

23,5	14	0
27,5	14	2
35	14	4
39,5	14	6
47,4	14	8
53	14	10
52	14	12
55	14	14
56,5	14	16
58,2	14	18
59	14	20
62	14	22
62,3	14	24
62,5	14	26
62,5	14	28
25,7	16	0
30,5	16	2
37	16	4
40	16	6
50,5	16	8
54	16	10
56,2	16	12
56,1	16	14
56,9	16	16
57,5	16	18
58,2	16	20
59	16	22
59	16	24
60,5	16	26
61,1	16	28
27,7	18	0
31,1	18	2
37	18	4
41,3	18	6
52	18	8
53,2	18	10
58,5	18	12
60	18	14
59,4	18	16
60	18	18
62,2	18	20
63	18	22
63,1	18	24
63,1	18	26

63,1	18	28
65,5	18	30
31	20	0
35	20	2
40,5	20	4
44,4	20	6
58,3	20	8
58,5	20	10
61,7	20	12
61,3	20	14
61,8	20	16
61,5	20	18
62,7	20	20
63,6	20	22
64	20	24
64,2	20	26
65	20	28
64,4	20	30
65,7	20	32
32,7	22	0
39,3	22	2
46	22	4
55	22	6
57,1	22	8
60,4	22	10
63	22	12
64,1	22	14
64,9	22	16
65,2	22	18
66,2	22	20
67,3	22	22
66,7	22	24
66,5	22	26
66,2	22	28
67	22	30
69	22	32
34	24	0
42	24	2
45	24	4
59,3	24	6
63,1	24	8
63	24	10
67,1	24	12
68,6	24	14

70,7	24	16
71,2	24	18
68,5	24	20
70	24	22
69,5	24	24
69	24	26
69,5	24	28
69,5	24	30
68	24	32
36,4	26	0
43,5	26	2
45	26	4
65,4	26	6
66,1	26	8
68,6	26	10
68,7	26	12
68,3	26	14
67,3	26	16
68,6	26	18
69	26	20
70	26	22
73	26	24
72,5	26	26
71,7	26	28
71,5	26	30
71,8	26	32
39,5	28	0
44,2	28	2
69,4	28	6
68,7	28	8
69,5	28	10
70,5	28	12
70,8	28	14
70,5	28	16
73	28	18
74	28	20
72,9	28	22
72,4	28	24
74,4	28	26
72,4	28	28
72,5	28	30
73,5	28	32
43,8	30	0
65,2	30	4

70	30	6
71,8	30	8
72	30	10
71,5	30	12
71,2	30	14
72,8	30	16
73,3	30	18
72	30	20
73,4	30	22
74,5	30	24
73,6	30	26
73,7	30	28
74,2	30	30
74,2	30	32
43,4	32	0
71,5	32	4
72,5	32	6
68,7	32	8
70,2	32	10
73,3	32	12
73,9	32	14
74	32	16
74,6	32	18
74,7	32	20
75,6	32	22
75,5	32	24
74,3	32	26
74,9	32	28
75	32	30
74,3	34	4
71,5	34	6
75,2	34	8
74,6	34	10
76,5	34	12
76,6	34	14
76,6	34	16
77,6	34	18
77,7	34	20
76,5	34	22
76,5	34	24
77,2	34	26
77,5	34	30
74,8	36	6
73,9	36	8

77	36	10
77,6	36	12
76,7	36	14
76,9	36	16
77,6	36	18
77,8	36	20
77,7	36	22
76,4	36	24
76,2	36	26
76	36	28
76	38	6
77,2	38	8
78,2	38	10
78	38	12
79,5	38	14
79,6	38	16
78	38	18
78,5	38	20
79,2	38	22
79	38	24
79	38	26
79	38	28
80,2	38	30
78,5	40	6
79,3	40	8
79,9	40	10
80,5	40	12
80,6	40	14
80,7	40	16
80,5	40	18
80,4	40	20
80	40	22
80,5	40	24
80,3	40	26
79	40	28
85,9	44	8
86,6	44	10
87,5	44	12
86,7	44	14
86,2	44	16
86	44	18
85,5	44	20
87,2	44	22
89,4	46	10

89,6	46	12
88	46	14
88	46	16
89	46	18
89	46	20
90,6	48	16