

Modélisation de l'effort de résistance à la traction des corps de charrues à socs en relation avec les caractéristiques géométriques

M. AMARA¹

Résumé

Pour calculer l'effort de résistance à la traction des outils aratoires pour la préparation du sol, plusieurs modèles mathématiques sont proposés. Ces modèles font généralement abstraction des caractéristiques géométriques des surfaces actives des pièces travaillantes.

Pour cette raison, des essais sur canal de traction ont été réalisés pour vérifier la validité de deux modèles très fréquemment utilisés, à savoir ceux de Gorjatchkin et de Gee Clough. Les résultats ont montré que pour la même forme et dans des conditions de travail identiques, les efforts de résistance à la traction étaient nettement différents d'un modèle à un autre.

Des essais ont été également réalisés sur deux formes de surface actives. L'effort calculé à l'aide d'un des deux modèles et ce séparément est le même pour deux surfaces différentes. Alors que les valeurs déterminées sur canal sont totalement différentes d'une forme à une autre. D'où l'intérêt de proposer un modèle plus universel mettant en relation l'effort avec l'état du sol et surtout les caractéristiques géométriques des surfaces actives.

Le modèle établi par la méthode de modélisation (Buckingham-Vachy) est de la forme :

$$F_t = \mu \cdot R \cdot e^{-14.54 \cdot \left(\frac{v^2}{g \cdot b} \right)^{0.15}} \cdot E^{4.13} \cdot \alpha^{5.94} \cdot \theta^{-16.01} \cdot k^{0.98} \cdot (k_1)^{12.98} \cdot (k_2)^{2.74} \cdot g \cdot d \cdot b^3$$

Ce modèle a été ensuite vérifié et comparé aux modèles de Gorjatchkin et de Gee Clough sur deux formes de surfaces actives de corps de charrue à socs fabriqués en Algérie par les entreprises ENPMA (forme culturale) et SACRA (forme cylindrique).

Les efforts calculés à l'aide de ce modèle sont plus proches des valeurs mesurées sur canal, que celles calculées avec les modèles de Gorjatchkin et de Gee Clough.

Abstract

To calculate the effort of the agricultural tools for the tillage, several mathematical models are proposed. These models generally disregard geometrical characteristic of active surfaces of the working parts. For this reason, tests on channel of traction were carried out to check the validity of two models very frequently used, namely those of Gorjatchkin and Gee Clough. The results showed that for the same form and in identical work conditions, the efforts were definitely different from a model to another.

Tests were also carried out on two active forms of surface. The effort calculated using separately one of the two models is the same one for two different surfaces. Whereas the values determined on channel, are completely different from a form to another. From where interest to propose a more universal model connecting the effort with the state of the ground and especially the geometrical characteristics of active surfaces.

¹ Ecole Nationale Supérieure Agronomique Alger ; mah_amara@yahoo.fr

The model establishes by the modelling method (Buckingham-Vachy) form:

$$F_t = \mu \cdot R \cdot e^{-14.54 \cdot \left(\frac{v^2}{g \cdot b} \right)^{0.15}} \cdot E^{1.13} \cdot \alpha^{5.94} \cdot \theta^{-16.01} \cdot k^{0.98} \cdot (k_1)^{12.98} \cdot (k_2)^{2.74} \cdot g \cdot d \cdot b^3$$

This model then was checked and compared with the models of Gorjatchkin and Gee Clough on two forms of active surfaces of body of share plow made in Algeria by companies ENPMA (farming form) and SACRA (cylindrical form). The efforts calculated using this model, are closer to the values measured on channel, than those calculated with Gorjatchkin and Gee Clough models.

Introduction

Durant ces dernières années plusieurs modèles mathématiques ont été développés pour l'évaluation de l'effort de résistance à la traction qu'oppose le sol à l'avancement des pièces travaillantes. Ces modèles sont de deux types, le premier à deux dimensions concerne les outils dits simples telles que les lames et les socs des outils à dents ; le second type dit à trois dimensions est relatif aux outils à surfaces actives complexes comme celles des corps de charrues à socs. Dans ce qui suit l'intérêt sera porté sur ce second type.

Les modèles couramment utilisés pour la détermination de l'effort de résistance à la traction sont chronologiquement consignés ci-dessous :

Modèles	Notations
GORJATCHKIN et SOEHNE (1960) $F_t = f \cdot G + k \cdot a \cdot b + \varepsilon \cdot a \cdot b \cdot v^2$	f : coefficient de frottement sol-métal G : poids de la charrue k : résistance spécifique du sol a : profondeur de labour b : largeur de labour v : vitesse d'avancement ε : coefficient de forme du versoir
LARSON <i>et al.</i> (1968) $F_t = \gamma \cdot b^2 \left[0.42 + 1.53 \cdot 10^6 \cdot \frac{\phi \cdot (0.23 \cdot C)^{1.50}}{\gamma \cdot a} + 0.42 + 1.53 \cdot 10^6 \cdot \frac{(0.035 \cdot C)^{1.37} \cdot v^2}{\gamma \cdot a \cdot g \cdot b^2} \right]$	C : cohésion du sol γ : masse volumique sèche du sol a : profondeur de labour b : largeur de labour v : vitesse d'avancement g : accélération terrestre φ : angle de frottement interne du sol
BINESSE (1970) $F_t = S \cdot \frac{C \cdot \cos \phi}{\cos \phi} \cdot (0.85 + \sin \phi)$	S : section de la bande de terre travaillée C : cohésion du sol φ : angle de frottement interne du sol
KUCZEWSKI (1978) $F_t = F_{xy} + F_{zy} + F_{xz}$	F _{xy} : composante de Ft sur le plan xy F _{zy} : composante de Ft sur le plan zy F _{xz} : composante de Ft sur le plan xz

<p>GEE GLOUGH <i>et al.</i> (1972)</p> $F_I = a.b.\left\{13.30.\gamma.a + 3.06.\gamma.\frac{v^2}{g}\right\}$	<p>a : profondeur de labour b : largeur de labour g : accélération terrestre γ : masse volumique sèche du sol v : vitesse d'avancement</p>
<p>GRISSE <i>et al.</i> (1983)</p> $G = K_1.C_I + K_2.\gamma.(1 - \cos \phi).\frac{v^2}{g}$	<p>g : accélération terrestre γ : masse volumique sèche du sol v : vitesse d'avancement ϕ : angle de frottement interne du sol C_I : cône index K₁ et K₂ : constantes de régression</p>
<p>OSKOU <i>et al.</i> (1982)</p> $F_I = a.b.(\gamma.b.N_\gamma + c.N_c + A_d.N_a)$	<p>a : profondeur de labour. b : largeur de labour c : coefficient de cohésion du sol γ : masse volumique sèche du sol Nγ : Force due à la masse du sol N_a : adhésivité du sol N_c : Cohésion du sol A_d : coefficient d'adhésion du sol</p>
<p>QIONG <i>et al.</i> (1986)</p> $F_t = \gamma.a(b_1 + b_2.v^2)$	<p>a : profondeur de labour γ : masse volumique sèche du sol b₁ = 1,5 b₂ = 0,228 v : vitesse d'avancement</p>

L'analyse de ces modèles montre :

De façon générale, ces modèles introduisent la profondeur de travail, sa largeur et la vitesse d'avancement de l'outil ainsi que des caractéristiques physiques et mécaniques du sol, comme la cohésion et la masse volumique. Cependant, les caractéristiques géométriques des surfaces actives tels que les angles de travail, les dimensions caractéristiques des surfaces ne sont pas prises en compte.

Parmi les modèles cités ci-dessus, le modèle proposé par Gorjatchkin introduit un coefficient ϵ , caractérisant la forme du versoir utilisé. Vu la complexité de la forme des nombreux versoirs existants, la détermination de ce coefficient (ϵ) est très difficile. Ses valeurs sont comprises entre 1500 et 2000 N. s² / m².

Selon Ros V. (1993), si les angles et les dimensions des surfaces actives des corps de charrue à socs ont été étudiés, c'est pratiquement dans le cadre de la description de ces pièces travaillantes ou dans celui de leurs effets sur les indices qualitatifs des travaux du sol, mais pas pour calculer l'effort de résistance à la traction.

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

Nous signalerons également que plusieurs de ces modèles prédisant l'effort de traction pour la charrue comme ceux de Larson *et al.*, 1968 et de Gee Clough *et al.*, 1972, ont été développés sur la base de l'analyse dimensionnelle.

Enfin, le choix de l'un de ces modèles pour l'évaluation avec précision de l'effort de résistance à la traction est souvent délicat. En effet, si nous considérons par exemple les modèles de Gee Clough (1972) et de Gorjatchkin (1960), nous remarquerons que pour une même forme de surface active et dans de mêmes conditions de sol et de travail, les valeurs obtenues sont très différentes. Quel sera donc le modèle le plus fiable pour une évaluation précise de la consommation en énergie ?

Pour répondre à cette préoccupation, l'objectif de ce travail est la proposition d'un modèle mathématique de l'effort de résistance à la traction plus précis et tenant compte de la forme des surfaces actives des corps de charrue à socs.

Les caractéristiques géométriques choisies pour la modélisation mathématique sont respectivement :

L'angle d'entrure : α

L'angle d'attaque : γ

L'angle d'inclinaison ou de courbure de la surface active : θ

Le rapport $k = a / b$

Le rapport $k_1 = L_1 / h$

Le rapport $k_2 = d_1 / d_3$

Les rapports k_1 et k_2 ont été choisis afin de différencier les deux formes des surfaces actives des deux corps de charrues étudiés. Outre ces paramètres, la vitesse d'avancement (v), la masse volumique sèche du sol (d) ont été prises en considération vu leurs effets certains sur l'effort de résistance à la traction.

Matériels et méthode

Après caractérisation géométrique des deux formes de surfaces actives des corps de charrue à socs étudiés (forme cylindrique et culturale (ou universelle), trois modèles réduits (échelles 1/4, 1/3 et 1/2) pour chaque forme de surface ont été conçus (figures 5, 6 et 7).

Ces modèles réduits ont été utilisés pour la détermination des efforts de résistance à la traction (F_t) sur canal de traction (figure 4). L'utilisation du canal a permis la maîtrise des conditions de travail et d'analyser correctement l'effet des caractéristiques géométriques des surfaces actives des corps de charrue à socs.

Les résultats obtenus ont permis l'établissement d'un modèle mathématique de l'effort de résistance à la traction F_t en relation avec les caractéristiques géométriques de la surface active du corps de charrue. Le modèle établi est ensuite vérifié et comparé aux modèles de Gorjatchkin et de Gee Clough.

Caractérisation géométrique des deux surfaces actives des corps de charrue à versoirs

Nos essais ont porté sur deux corps de charrue à versoirs (figures 1 et 2) les plus couramment utilisés sur les exploitations agricoles algériennes.

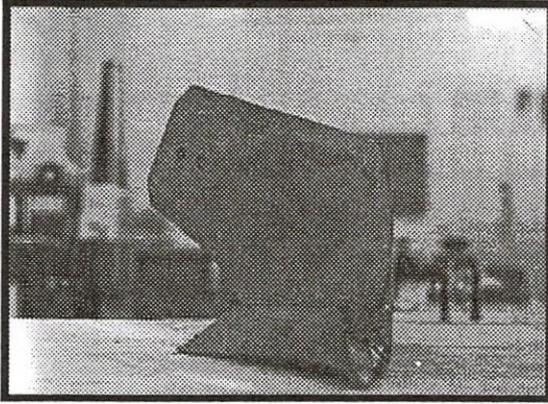


Figure 1. Forme ENPMA (forme culturale).

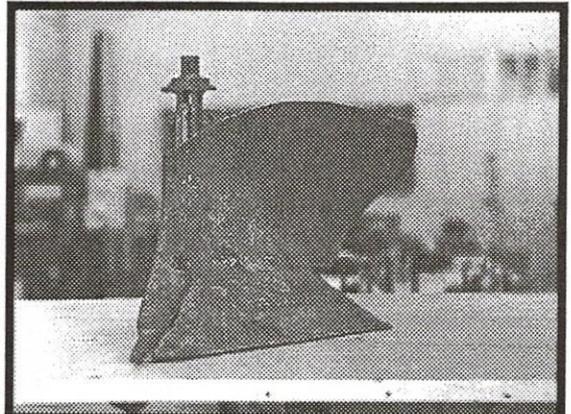


Figure 2. Forme SACRA (forme cylindrique).

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

Tableau I. Caractéristiques constructives des deux corps de charrues.

Corps de charrue	ENPMA (culturale)	SACRA (cylindrique)
Forme du soc	carrelet	carrelet
Hauteur du corps h (mm)	440	425
Longueur projetée l (mm)	940	740
Largeur b (mm)	350	310
Angle d'entrure α (°)	29	17
Angle d'attaque γ (°)	38	39
Angle d'inclinaison θ (°)	35	33

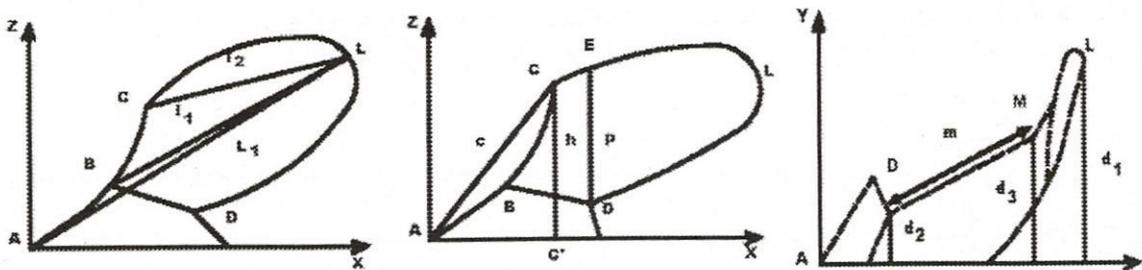


Figure 3. Caractéristiques dimensionnelles d'un corps de charrue à socs pour déterminer k_1 et k_2 .

Détermination des efforts de résistance à la traction exigés par ces deux formes

La détermination des efforts de résistance à la traction a été réalisée au niveau d'un canal de traction (figure 3) avec des modèles de corps de charrue à trois échelles réduites à 1/4, 1/3 et 1/2 (figures 5, 6 et 7).

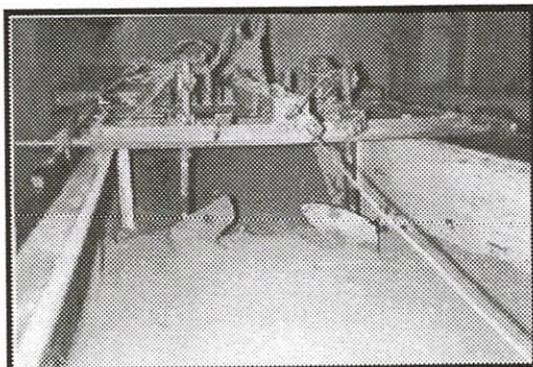


Figure 4. Modèles réduits des corps de Charrue, montés sur canal de traction.

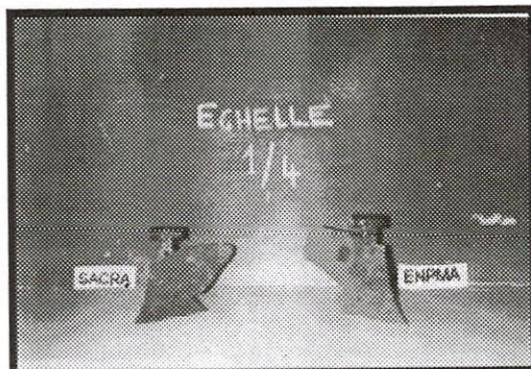


Figure 5. Modèles réduits à l'échelle 1 / 4

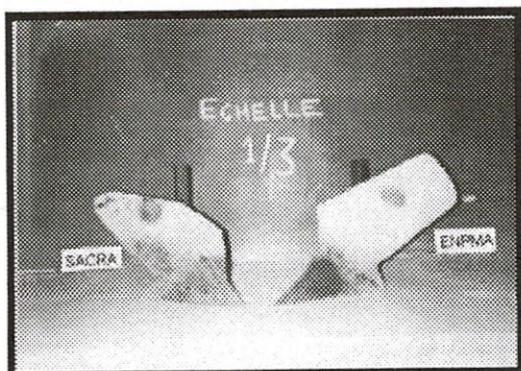


Figure 6. Modèles réduits à l'échelle 1 / 3

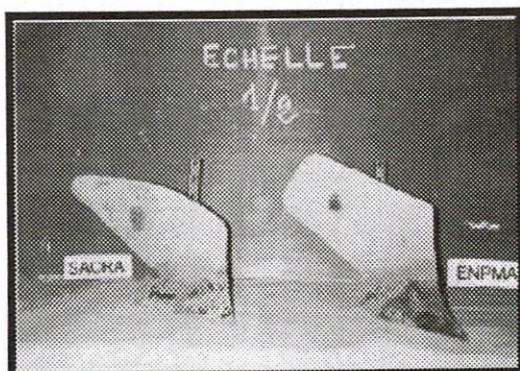


Figure 7. Modèles réduits à l'échelle 1 / 2.

Modélisation de l'effort de résistance à la traction

Les principales étapes de l'établissement du modèle mathématique sont respectivement :

Etablissement de l'équation générale

L'équation générale recherchée est de la forme :

$$F_t = f(E, d, v, \alpha, \theta, k, k_1, k_2, g)$$

Définition et caractérisation de tous les paramètres de l'équation

Les différents paramètres de cette équation sont définis sur le tableau II suivant :

Tableau II. Définition et caractérisation des paramètres de l'équation.

Grandeurs	symboles	unités	dimensions
- Paramètre dépendant :			
Effort de résistance à la traction	Ft	daN	[M.L.T ⁻²]
- Paramètres indépendants :			
<u>Conditions de travail</u>			
Vitesse d'avancement	v	m / s	[L.T ⁻¹]
Masse volumique du sol	d	g / cm ³	[M.L ⁻³]
Echelle	E	-	-
<u>Angles constructifs :</u>			
Angle d'entrure	α	radians	-
Angle d'attaque	γ	radians	-
Angle d'inclinaison	θ	radians	-
<u>Rapport des longueurs :</u>			
Profondeur / largeur de travail	k	-	-
Longueur maximale du corps / hauteur maximale	k ₁	-	-
Largeur arrière du versoir / largeur au point de courbure maximale du versoir	k ₂	-	-
accélération terrestre	g	m / s ²	[M.T ⁻²]

Analyse de la corrélation entre le paramètre dépendant (Ft) et ceux indépendants (v, d, E, α et θ , k, k₁, k₂)

L'intérêt de cette analyse est de confirmer l'effet significatif de ces différents paramètres sur l'effort de résistance à la traction et les maintenir ou non au niveau de l'équation finale. Pour ce qui est de l'angle d'attaque γ , celui-ci étant indirectement considéré dans le rapport $k = a / b$, ($\sin(\gamma) = b /$ longueur de la partie affûtée du soc) il ne sera pas introduit au niveau du modèle. En remplaçant k par sa valeur en fonction de γ , Ft pourra être formulé en fonction de cet angle. L'équation obtenue par régression polynomiale est la suivante :

$$F_t = -39,71 + 54,86 E + 32,83 d + 13,36 v + 84,33 \alpha - 222,45 \theta + 30,75 k + 21,84 k_1 + 13,95 k_2$$

L'analyse de cette relation permet de classer dans l'ordre d'importance de l'effet de chacun des paramètres étudiés sur l'effort de résistance à la traction. Nous remarquerons que le coefficient de l'angle d'inclinaison a la plus grande valeur absolue (222,45), ceci montre l'importance de l'effet de la forme de la surface active sur l'effort de résistance à la traction F_t .

Détermination des paramètres adimensionnels (π - termes)

Les paramètres adimensionnés définis sont respectivement :

$$\pi_1 = \frac{F_t}{d \cdot g \cdot b^3} ; \pi_2 = \frac{v^2}{gb} ; \pi_3 = k ; \pi_4 = k_1 ; \pi_5 = k_2 ; \pi_6 = \alpha ; \pi_7 = \theta$$

Selon le théorème de Buckingham-Vachy. (*in* Langhaar H. L. 1954), la relation finale sera de la forme :

$$\frac{F_t}{d \cdot g \cdot b^3} = f \left(\frac{v^2}{gb}, k, k_1, k_2, \alpha, \theta \right)$$

Et d'après Kuszewski, (1982) cette équation s'écrira sous la forme d'un produit de puissances :

$$\frac{F_t}{d \cdot g \cdot b^3} = \left(\frac{v^2}{gb} \right)^a \cdot (k)^b \cdot (k_1)^c \cdot (k_2)^d \cdot (\alpha)^e \cdot (\theta)^f \cdot e^{C_{ste}}$$

Le problème revient donc à déterminer les valeurs des exposants : a, b, c, d, e, f et la constante, pour cela l'utilisation des propriétés des logarithmes est nécessaire. Pour cela des essais sur canal de traction ont été réalisés afin de déterminer l'effet des différents paramètres sur l'effort de résistance à la traction.

Le modèle final donnant l'effort de résistance à la traction F_t en relation avec les caractéristiques géométriques des surfaces actives est :

$$F_t = \mu \cdot R \cdot e^{-14.5t} \cdot \left(\frac{v^2}{gb} \right)^{0.15} \cdot E^{4.13} \cdot \alpha^{5.94} \cdot \theta^{-16.01} \cdot k^{0.98} \cdot (k_1)^{12.98} \cdot (k_2)^{2.74} \cdot g \cdot d \cdot b^3$$

Les valeurs de R (coefficient de proportionnalité) sont respectivement de $R = 1,931$ pour la forme cylindrique et de $1,976$ pour la forme culturale et ce pour le modèle réduit d'échelle 1 / 2.

Les valeurs de μ coefficient de correction sont respectivement de :

$\mu = 1000$ pour la forme SACRA (pour les versoirs de forme cylindrique) ;

$\mu = 10$ pour la forme ENPMA (pour les versoirs de forme culturale) ;

Les deux valeurs attribuées μ montrent que la forme de la surface active, caractérisée par ses dimensions et ses angles, a un effet plus important, sur l'effort de résistance à la traction.

Les unités des différents paramètres de ce modèle sont :

Vitesse : v en m / s

Angles : α et θ en radians

Masse volumique apparente : d en kg / m³

Accélération terrestre : g en m / s²

Largeur de travail : b en m

Caractéristiques de forme : k, k₁ et k₂ sans unité.

Application du modèle

L'application de cette relation pour des conditions réelles de travail citées ci-dessous donnerait les résultats suivants :

Conditions réelles de travail

- Vitesse moyenne de labour : $v = 1,5 \text{ m / s}$ (5,4 km / h) ;
- Densité apparente au moment du labour $d = 1.29 \text{ g / cm}^3$ soit : 1290 kg / m^3 ou $12,9 \text{ kN/m}^3$, cette dernière transformation est nécessaire pour l'application des modèles de Gorjatchkin et Gee Clough ;
- Largeur de travail : $b = 0,31 \text{ m}$ pour SACRA et $b = 0.35 \text{ m}$ pour ENPMA ;
- Profondeur moyenne de labour : $a = 0.25 \text{ mètres}$;
- Rapport $k = a / b$: $k = 0,806$ pour la forme SACRA, et $k = 0.714$ pour ENPMA.

Caractéristiques géométriques des surfaces actives des deux corps de charrues

Les dimensions :

- Le rapport $k_1 = L_1 / h = 1,714$ pour SACRA et $k_1 = 2,136$ pour ENPMA
- Le rapport $k_2 = d_1 / d_3 = 1,290$ pour SACRA et $k_2 = 1,464$ pour ENPMA

Les angles :

Pour la Forme SACRA

$$\alpha = 17 \text{ degrés} = 0,297 \text{ rad}$$

$$\theta = 33 \text{ degrés} = 0,576 \text{ rad}$$

Pour la forme ENPMA

$$\alpha = 29 \text{ degrés} = 0,506 \text{ rad}$$

$$\theta = 35 \text{ degrés} = 0,611 \text{ rad}$$

En appliquant ces valeurs au niveau de la relation proposée, pour un corps de charrue de dimensions réelles, nous aurons :

Tableau III : Effort F_t calculé à partir du modèle proposé pour les corps réels.

Vitesses (m / s)	0,23	0,29	0,43	0,87	1,5
F_t (Forme Cylindrique) (daN)	104,50	112,03	126,08	55,76	183,42
F_t (Forme culturale) (daN)	304,38	326,30	367,23	453,69	534,23

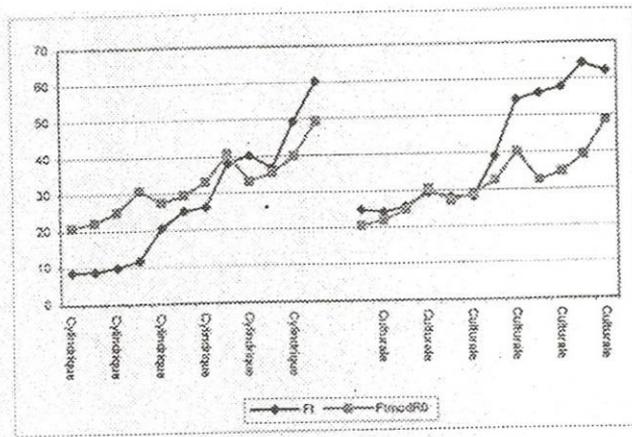


Figure 8. Evolutions comparées des efforts mesurés sur canal (F_{tmes}) et calculés à l'aide du modèle établi (F_{tmod}) pour le modèle réduit à l'échelle 1 / 2.

Comparaison du modèle établi avec ceux de Gorjatchkin et de Gee Clough

Afin de vérifier la fiabilité du modèle établi, une analyse comparative avec les modèles fréquemment utilisés à savoir les modèles de Gorjatchkin et Gee Clough a été réalisée. Pour cela certains paramètres utilisés dans ces deux derniers modèles sont à définir. Les relations de l'effort de résistance à la traction de ces deux chercheurs sont respectivement :

Les essais étant réalisés sur le même type de sol remanié (sol léger texture sablo-limoneuse avec faible teneur en argile), la valeur de K est la même ; elle est de 3500 daN/m^2 , cette valeur est la limite supérieure pour les sols légers et la limite inférieure pour les sols dits moyens.

Ces valeurs seront appliquées aux modèles de Gorjatchkin. Les valeurs choisies pour le coefficient de forme ϵ sont respectivement de $200 \text{ daN.s}^2 / \text{m}^4$ pour la forme cylindrique et de $150 \text{ daN.s}^2 / \text{m}^4$ pour la forme culturale. Le choix de ce paramètre est souvent très délicat à déterminer, le nombre de formes de surfaces actives étant très important.

Les valeurs choisies correspondent à celles données par Gorjatchkin pour des vitesses comprises entre 1 et $2,4 \text{ m/s}$. Les valeurs de l'effort obtenues avec ces modèles, pour les mêmes conditions de vitesse et de sol sont :

Tableau IV : Effort F_t calculé à partir du modèle Gorjatchkin.

Vitesses (m / s)	0,23	0,29	0,43	0,87	1,50
F_t (Forme Cylindrique) (daN)	272,07	272,55	274,11	282,98	306,12
F_t (Forme culturale) (daN)	306,94	307,35	308,67	316,18	335,78

Tableau V : Effort Ft calculé à partir du modèle Gee Clough

Vitesses (m / s)	0,23	0,29	0,43	0,87	1,50
Ft (Forme Cylindrique) (daN)	334,03	334,99	338,07	355,57	401,25
Ft (Forme culturale) (daN)	377,13	378,21	381,69	401,45	453,02

L'application de ces deux modèles pour la détermination de l'effort de résistance à la traction, confirme les résultats de nos travaux, à savoir que la forme culturale est plus exigeante en énergie pour la réalisation du labour. Cela met donc en évidence l'importance des caractéristiques géométriques de la surface active du corps de charrue introduites au niveau du modèle établi, ces résultats sont illustrés sur les graphes suivants (figure 9a et b).

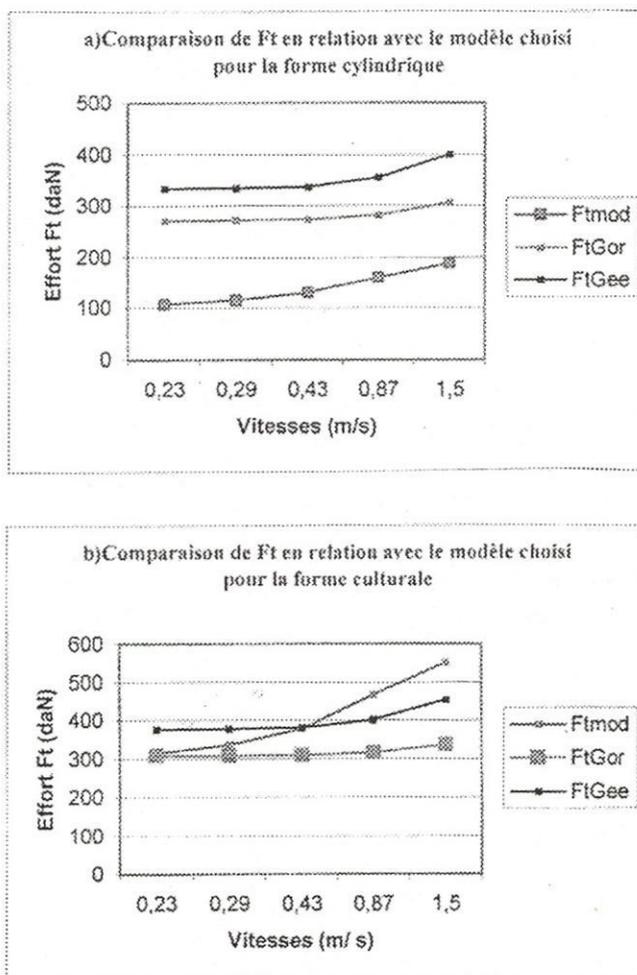


Figure 9 : Analyse comparative des efforts Ft en fonction de la vitesse d'avancement pour chaque modèle et pour chaque forme a) cylindrique et b) culturale.

La simplification du modèle de Gorjatchkin, sous la forme $F_t = k.a.b$, c'est-à-dire sans tenir compte de la vitesse et de la forme des surfaces actives, donnerait la même valeur pour F_t quelque soit la forme des surfaces actives des corps de charrue.

Analyse et discussion

L'analyse du modèle établi montre clairement l'effet des caractéristiques géométriques de la surface active sur l'effort de résistance à la traction. L'angle de courbure q et la caractéristique k_1 (rapport de la Longueur L_1 maximale du corps sur la hauteur maximale h) sont les caractéristiques géométriques les plus influentes sur l'effort de résistance à la traction. Quand q augmente l'effort diminue par contre lorsque k_1 augmente l'effort augmente.

Le modèle proposé peut être utilisé pour l'évaluation de l'effort de résistance à la traction de n'importe quelle forme de surfaces actives de corps de charrue à socs. Par contre les modèles de Gorjatchkin et de Gee Clough ne sont utilisables que pour des formes précises. Pour des formes cylindriques le modèle de Gee Clough et pour les formes culturales le modèle de Gorjatchkin.

Conclusion

Deux cas sont à considérer pour l'utilisation de ce modèle :

Si ce modèle est utilisé par un agronome, pour l'évaluation de l'effort nécessaire pour la réalisation du labour, certains des paramètres de la relation sont constants (paramètres constructifs) tels que les angles, le paramètre k (profondeur / largeur), les paramètres k_1 et k_2 . Il s'intéressera donc au choix de la vitesse de travail, la densité du sol afin de choisir correctement les meilleures conditions de travail pour réduire les besoins en énergie lors de la réalisation des labours.

Si par contre, cette relation est utilisée par un concepteur d'outils aratoires, ce dernier s'intéressera plus particulièrement aux paramètres constructifs en tenant compte évidemment des conditions de travail et des exigences agro techniques des labours. Cela permettra la conception de charrues adaptées à des conditions prédéfinies.

Références citées

- BINESSE M., 1970.** Cisaillement et résistance spécifique du sol lors du labour classique. Etudes du CNEEMA, n°341-342 – France.
- DONER R.D. and NICHOLS M.L., 1934.** The Dynamic Properties of Soil V. Dynamics of Soil on Plow Mouldboard Surfaces Related to Scouring. Journal of ASAE, Vol 15, n°1: 9-13
- GAO QIONG, PITT R.E., RUINA A., 1986.** A Model to Predict Soil Forces on the Plough Mouldboard. Journal of Agricultural Engineering Research 35, p.141-155.
- GEE CLOUGH D.G. et al., 1978.** The empirical prediction of tractor implement field performance. J. Terramechanics, 15 (2) : 81-94
- GORJATCHKIN V.P. et SOHENE, 1960.** Collected Works in Three Volumes. Ed. N. D. Luchinskii. Translated 1972. Jerusalem. Israel: Ketter Press.
- GRISSE et al., 1983.** A soil model based on limit equilibrium analysis. Transaction of ASAE, vol. 26 n° 4 , p. 991-995

- KUCZEWSKI J. , 1978.** *Eléments Théoriques des Machines Agricoles .* Edition Varsovie Pologne.
- LANGHAAR H. L., 1954.** *Dimensional Analysis and Theory of Models.* Ed. New York . John Wiley and Sons, Inc.
- LARSON L. W. et al. ,1968.** Predicting draft forces using mouldboard plows in agricultural soils. *Transaction of ASAE*, 11: 665-668.
- NICHOLS M.L. and KUMMER T. H. , 1932.** The Dynamic Properties of Soil IV. A Method of Analysis of Plow Moldboard Design Based Upon Dynamic Properties of Soil. *Agricultural Engineering* 13(11)279-285.
- OSKOU K.E. et al, 1982.** The Determination of Plough Draught. Part II. The Measurement and Prediction of Plough Draught for Two Mouldboard Shape in Three Soil Series. *Journal of Terramechanics*, 19, p. 153-164.
- ROS V. et al., 1993.** Analysis of a Tillage Tool Geometry. ASAE Paper nr 93, St.Joseph, Mich., USA. 1995.