

MINISTRE D'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale supérieure Agronomique KASDI MERBAH

Département : Génie Rural

Section : Machinisme Agricole

Eléments de Tracteur



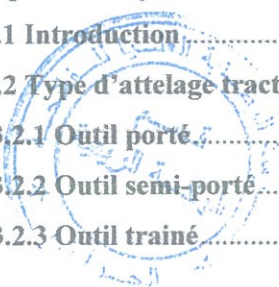
Réalisé par : LABAD Rima

Maitre de conférences

Département : Génie Rural



Avant-propos	1
Chapitre 1 : Généralités sur les tracteurs agricoles	2
1.1 Classification des tracteurs	2
1.2 Rendement du tracteur agricole.....	4
1.3 Fonctionnement du tracteur agricole	5
1.4 Performances du moteur	5
1.4.1 Couple effectif « Me »	7
1.4.2 Puissance effective moteur.....	8
1.4.3 Consommation spécifique.....	8
1.4.4 Reserve du couple.....	8
1.5 Système de transmission	10
1.5.1 Embrayage	11
1.5.1.1 Embrayage à disque à simple effet.....	12
1.5.1.2 Embrayage à disque à double effet	12
1.5.2 Boite de vitesses	12
1.5.2.1 Ensemble de rapport	13
1.5.2.2 Gammes	14
1.5.2.3 Inverseur	14
1.5.3 Différentiel	16
1.5.4 Réducteurs finaux, pont moteur et freins.....	16
1.5.5 Pneumatiques.....	19
Chapitre 2 : Pneumatiques des tracteurs agricoles	20
2.1 Introduction	20
2.2 Type des pneumatiques agricoles.....	20
2.3 Caractéristiques et dimensions des pneus agricoles	21
2.3.1 Caractéristiques des pneus	21
2.4. Dimensions des pneus.....	22
2.6 Indice de charge et de vitesse.....	24
2.7 Charge des pneumatiques et ply-rating.....	26
2.8 Pression de gonflage	27
Chapitre 3 : Système de liaison tracteur agricole- outil	29
3.1 Introduction	29
3.2 Type d'attelage tracteur-outil	29
3.2.1 Outil porté	29
3.2.2 Outil semi-porté	29
3.2.3 Outil trainé	29



3.3 Système de liaison outil-tracteur	30
3.3.1 Relevage hydraulique	30
3.3.2 Les vérins	31
3.3.3.2.1 Le vérin simple effet	31
3.3.3.2.2 Le vérin double effet	32
3.3.3 Contrôles de relevage hydraulique	33
3.4 Prise de force ou prise de puissance	34
3.5 La chape	35
3.6 Optimisation des attelages agricoles	36
3.7 Coefficient de répartition de poids	36
3.8 Le lestage	37
3.8.1 Lestage par l'eau	37
3.8.2 Lestage arrière par masse	37
3.8.3 Lestage avant	38
3.9 Le jumelage	39
Chapitre 4 : Dynamique des pneumatiques	41
4.1 Introduction	41
4.2 Locomotion	41
4.2.1 Forces agissantes sur les pneumatiques	41
4.2.2 Couple aux roues motrices	41
4.2.3 Force de traction brute	42
4.3 Dynamique des pneumatiques	44
4.4 Forces agissantes sur les roues motrices	44
4.5 Forces agissantes sur les roues directrices	45
4.6 Equations d'équilibre	46
4.6.1 Roue motrice	46
4.6.2 Roue directrice	46
4.6.3 Coefficient de résistance au roulement	47
4.6.4 Variation de coefficient de résistance au roulement	47
4.7 Dynamique des pneumatiques en condition de charge	49
4.8 Forces agissantes	49
4.8.1 Force de traction	49
4.8.2 Force de traction brute	50
4.8.3 Force de résistance au roulement	50
4.9 Glissement	50
4.9.1 Glissement en fonction de la vitesse	50



4.9.2 Glissement en fonction du coefficient de traction.....	51
Chapitre 5 : Bilan de traction et stabilité des tracteurs à roues.....	53
5.1 Introduction	53
5.2 Forces agissantes sur le tracteur « terrain plat ».....	53
5.2.1 Force de résistance au roulement.....	53
5.2.2 Force d'inertie de translation F_y	53
5.2.3 Force de résistance de l'air F_a	53
5.2.4 Force de traction F_t	54
5.3 Forces agissantes sur le tracteur « terrain en pente ».....	55
5.3.1 Force de résistance au roulement.....	55
5.2.2 Force due à la pente F_α	55
5.2.3 Force d'inertie de translation F_y	55
5.2.4 Force de résistance de l'air F_a	56
5.2.5 Force de traction F_t	56
5.4 Bilan de traction	56
5.5 Stabilité du tracteur	57
5.6 Stabilité statique	57
5.6.1 Etude de la stabilité en monté	57
5.6.2 Etude de la stabilité en descente.....	58
5.7 Stabilité dynamique.....	59
5.7.1 Tracteur-outil semi porté ($\alpha > 0$)	59
5.7.2 Tracteur- outil porté ($\alpha > 0$)	60
5.7.3 Tracteur – outil porté ($\alpha = 0$).....	61
Chapitre 6 : Performances de traction	63
6.1 Introduction	63
6.2 Performances de traction.....	63
6.3 Bilan de puissance	63
6.3.1 Puissance perdue à la transmission	63
6.3.2 Puissance perdue au roulement.....	63
6.3.3 Puissance perdue au glissement	64
6.3.4 Puissance de traction.....	64
6.4 Les paramètres de traction	64
6.4.1 Force de traction et coefficient de traction.....	64
6.4.2 Puissance de traction.....	65
6.4.3 Vitesse réelle.....	65
6.4.4 Glissement.....	65



6.4.5	Efficiencce de traction η_t	65
6.4.6	Poids spécifique d'exploitation	66
6.4.7	Consommation horaire	67
6.5	Etude des performances de traction	67

Liste des figures

Figure 1.	Fonctionnalités des tracteurs agricoles.....	1
Figure 2.	Différents types de tracteur	3
Figure 3.	Conception de tracteur agricole	5
Figure 4.	Conception moteur 4 cylindres	6
Figure 5.	Courbes moteurs	7
Figure 6.	Circuit de transmission.....	11
Figure 7.	Principe de l'embrayage.....	12
Figure 8.	Représentation graphique d'un rapport	14
Figure 9.	Marche arrière	15
Figure 10.	Principe de fonctionnement de la boîte de vitesses.....	15
Figure 11.	Description du différentiel	16
Figure 12.	Réducteurs finaux	17
Figure 13.	Pont moteur	18
Figure 14.	Frein à disque	18
Figure 15.	Type de roues motrices tracteur	20
Figure 16.	Type de roues directrices tracteur	21
Figure 17.	Type de roues porteuses pour matériel.....	21
Figure 18.	Pneu agricole, type radial et diagonal	21
Figure 19(a, b).	Marquage des pneumatiques agricoles.....	23
Figure 20.	Caractéristiques dimensionnelles du pneu	24
Figure 21.	Type d'attelage tracteur-outils	30
Figure 22.	Description de relevage hydraulique.....	31
Figure 23.	Schéma de circuit hydraulique « Vérin simple effet »	32
Figure 24.	Schéma de circuit hydraulique « Vérin double effet »	33
Figure 25.	Contrôle d'effort et de position	34
Figure 26.	Emplacement prise de force	34
Figure 27.	Variation des dimensions d'arbre de la prise de force coté tracteur	35
Figure 28.	Chape de tracteur.....	36
Figure 29.	Principe de lestage l'eau.....	37
Figure 30.	Lestage arrière par masses	38
Figure 31.	Systèmes de lestage avant	39
Figure 32.	Principe de jumelage des tracteurs agricoles.....	39
Figure 33.	Forces agissantes pour locomotion	41
Figure 34.	Force de résistance au cisaillement du sol	43
Figure 35.	Essais de la résistance au cisaillement du sol.....	43
Figure 36.	Forces agissantes sur la roue motrice.....	45
Figure 37.	Forces agissantes sur la roue directrice	46
Figure 38.	Variation de coefficient de résistance au roulement f en fonction de l'indice de mobilité M	48
Figure 39.	Forces agissantes en condition de charge.....	50
Figure 40.	Variation du glissement en fonction du coefficient de traction.....	51

Eléments de tracteur

Figure 41. Forces agissantes « terrain plat »	55
Figure 42. Forces agissantes « terrain en pente »	56
Figure 43. Tracteur en monté	58
Figure 44. Tracteur en descente.....	59
Figure 45. Tracteur- outil semi porté.....	60
Figure 46. Tracteur- outil porté (cas de la charrue).....	61
Figure 47. Attelage tracteur- outil porté (cas de la charrue).....	61
Figure 48. Variation de l'efficacité de traction, le glissement et la vitesse réelle en fonction du coefficient de traction.....	66
Figure 49. Nomogramme de performance de traction.....	68

Liste des tableaux

Tableau 1. Classification des tracteurs en fonction de la puissance.....	4
Tableau 2. Indices de vitesses	25
Tableau 3. Indice de charge.....	26
Tableau 4. Charge du pneumatique en fonction de la pression.....	28
Tableau 5. Coefficient de répartition de charge	36
Tableau 6. Variation de coefficient de résistance au roulement en fonction de l'état du sol	48



Avant-propos

La mécanisation agricole est étroitement liée à la disposition d'un tracteur agricole. Le tracteur agricole est en évolution continue depuis un siècle. En 1769, il y a l'invention du moteur à vapeur par James Watt. En 1876, Otto développe le moteur à combustion interne. En 1912, Nilson a inventé le tracteur à quatre roues motrices. Ensuite, en 1913, JI Case introduit son modèle 12-25 HP à 600 tours par minute. En fait, entre les années 1951 et 1960, il y a une augmentation rapide de la puissance des tracteurs.

De nos jours, la diversification de l'agriculture et la convergence vers une agriculture purement mécanisée, précise, automatisée et même intelligente nécessite un tracteur agricole qui répond à ces exigences. Sur le plan économique, le tracteur agricole est un investissement très lourd, c'est pourquoi il doit être choisi, utilisé et entretenu de manière rigoureuse au sein de l'exploitation. Le tracteur agricole est conçu pour tirer, porter, animer et même chargé et pousser les outils (Figure 1). Ces fonctionnalités sont en fonction des caractéristiques techniques et mécaniques du tracteur.

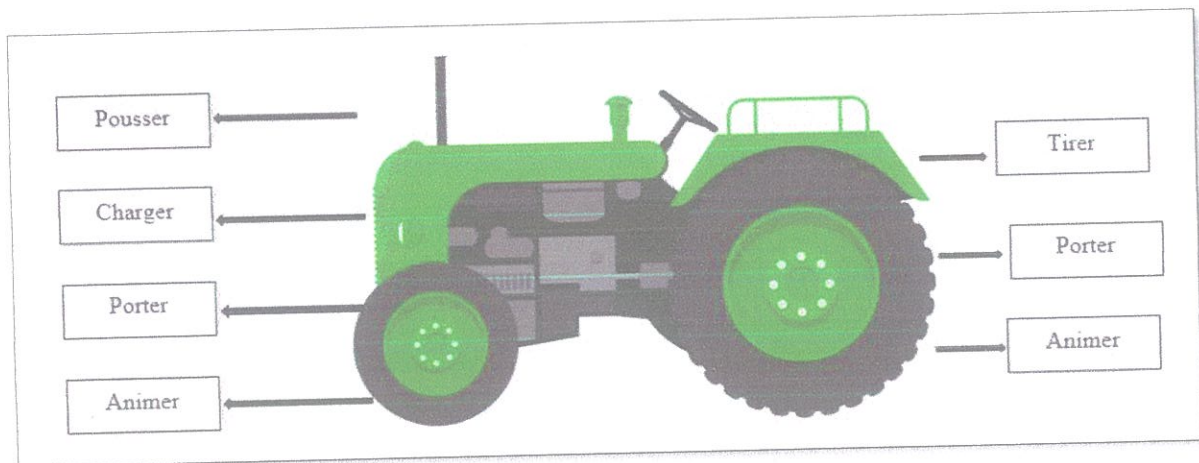


Figure 1. Fonctionnalités des tracteurs agricoles



Chapitre 1 : Généralités sur les tracteurs agricoles



1.1 Classification des tracteurs

Actuellement, les tracteurs agricoles sont destinés à effectuer les différents travaux au niveau des exploitations et des fermes de production et d'élevage (labour, semis, traitement phytosanitaire...), ainsi que le transport.

Dans le monde agricole, il existe différents types de tracteurs agricoles dont les performances techniques ont évolué dans le temps.

Il existe des tracteurs à chenille, dont les organes de locomotion sont des chaînes métalliques appelé « chenille ». Généralement, ce type de tracteur est utilisé dans toutes les conditions de terrain et plus précisément dans sur les terrains accidentés pour assurer une adhérente et une stabilité.

Les tracteurs à roues sont les tracteurs les plus répondus à l'échelle mondiale. Il existe des tracteurs à deux (02) roues motrices et à quatre (04) roues motrices et cela en fonction de la puissance du moteur. Pour le domaine de jardinage et en plasticulture, généralement des micros tracteurs sont utilisés. Ils se caractérisent par une faible puissance et des gabarits plus au mois réduits. En fin les tracteurs enjambeurs, qui sont considérés comme des machines de traitement phytosanitaire. Souvent, ils sont utilisés pour les traitements phytosanitaires en viticulture.



Eléments de tracteur



Figure 2. Différents types de tracteur

Récemment, les tracteurs agricoles sont classés surtout en fonction de la force de traction et la puissance nominale du moteur. En fait, la classification la plus pratique est en fonction de la puissance.

Tableau 1. Classification des tracteurs en fonction de la puissance

Classification	Puissance (CV)
Très faible puissance	Inférieure à 15
Petite puissance	15-30
Moyenne puissance	30-70
Grande puissance	70- 150
Très grande puissance	Supérieure à 150

1.2 Rendement du tracteur agricole

En travaux lourds, la règle de base pour augmenter le rendement des tracteurs est de diminuer la vitesse et augmenter le couple. En fait, le rendement des tracteurs agricoles est en fonction de certains facteurs bien définis.

1^{er} facteur : Caractéristiques techniques du tracteur :

Le poids, la puissance, type de tracteur (à roues ou à chenille), deux (02) roues motrice 4x2 ou quatre (04) roues motrices 4x4.

2^{ème} facteur : Caractéristiques du sol

Le sol est défini par des propriétés physicomécaniques tels que : la texture, la densité, l'humidité et la cohésion. De plus la topographie expliquée par la pente peut influencer sur la stabilité de tracteur. En fait, une pente qui dépasse 45° influe sur le renversement du tracteur.

3^{ème} facteur : La charge ou la machine attelée

Le choix de l'outil est important, il dépend de la puissance de tracteur. En fait, une combinaison entre le poids de la machine et la puissance tracteur optimise l'attelage agricole. En fait, le choix est fait pour des raisons : techniques (augmenter la durée de vie), économique (diminuer le consommation) et des raisons de sécurité (augmenter la stabilité).





1.3 Fonctionnement du tracteur agricole

Le fonctionnement du tracteur agricole dépend des performances du moteur, système de transmission, pneumatiques et hydrauliques.

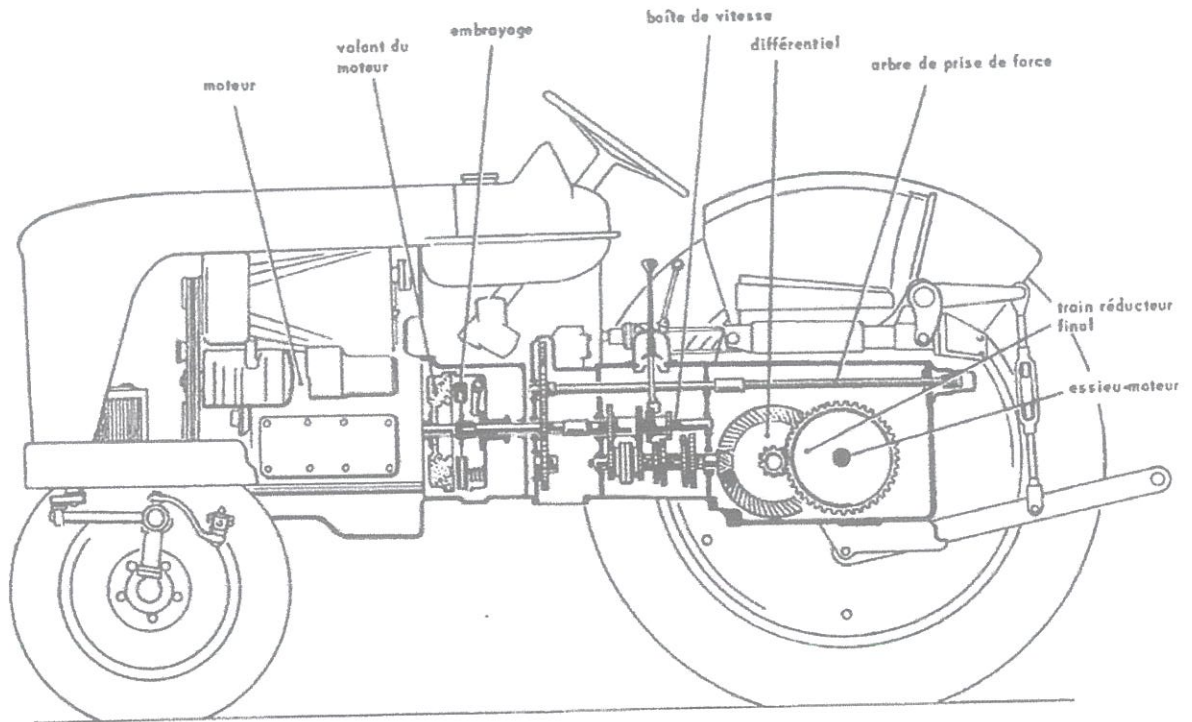


Figure 3. Conception de tracteur agricole (Willy de Krem, 2012)

1.4 Performances du moteur

Le tracteur agricole est animé mécaniquement par un moteur, généralement Diesel (au nom de son inventeur, Rudolf Diesel), qui permet de mouvoir le tracteur et ses outils. C'est un organe essentiel du tracteur.

Le moteur des tracteurs agricoles est généralement thermique type Diesel (Figure 04). Donc, il s'agit de transformer l'énergie thermique en énergie mécanique de rotation.



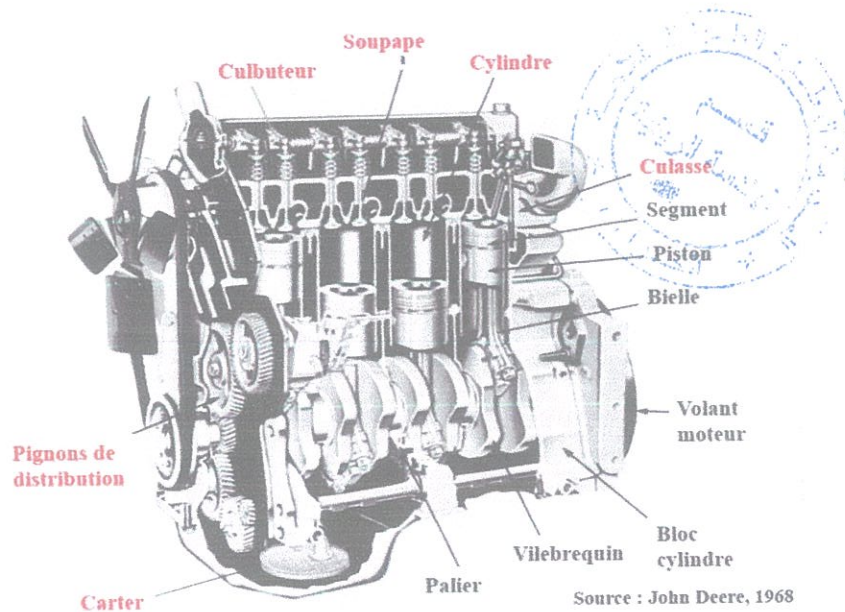


Figure 4. Conception moteur 4 cylindres (Willy de Krem, 2012)

Il existe trois régimes moteurs :

Le régime de surcharge « n_s » : le surcharge de moteur se produit lorsqu'un moteur est soumis à une charge excessive. Les premiers symptômes d'une surcharge sont une consommation excessive, un couple insuffisant et une surchauffe.

Le régime nominal « n_n » : correspond à une vitesse de rotation optimale.

Le régime à vide « n_v » : correspond à une vitesse de rotation très élevée et la puissance développée est une puissance perdue.

En fonction des vitesses de rotation du vilebrequin, la puissance, le couple et la consommation du gasoil varient selon l'allure des courbes suivantes (Figure 05) :



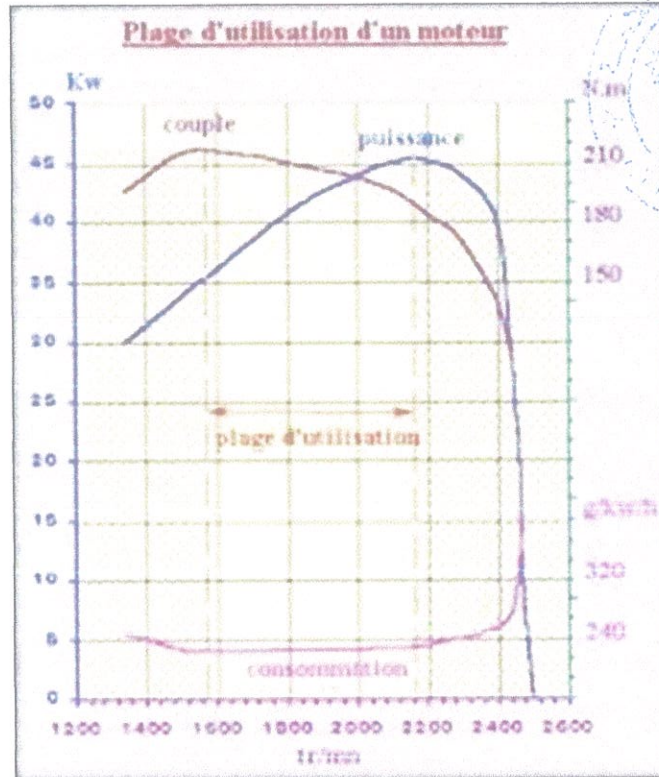


Figure 5. Courbes moteurs

En régime de surcharge, le couple effectif est à sa valeur maximale, tandis que la puissance maximale ou la puissance effective est développée en régime nominale.

1.4.1 Couple effectif « Me »

Le couple dépend des forces produites par la poussée des gaz sur les pistons. Le couple fourni par le moteur dépend de la chaleur dégagée par la combustion. Le couple évolue en fonction du régime du moteur et atteint sa valeur maximale au régime de surcharge.

$$Me = \frac{Pe}{\omega_e} \quad (1.1)$$

$$\omega_e = \frac{2\pi n}{60} \quad (1.2)$$

$$Me = \frac{30Pe}{\pi n} \quad (N.m) \quad (1.3)$$

1.4.2 Puissance effective moteur

La puissance est exprimée en kilowatts ou en « cheval ». Elle représente la rapidité avec laquelle un travail peut être réalisé. A partir du régime nominal, lorsque la charge du moteur augmente la puissance atteint un maximum, puis elle diminue. La puissance est le produit du couple par le régime moteur.

$$Pe = F V \quad (1.4)$$

$$Pe = Me * we \quad (1.5)$$

$$Pe = \frac{2 \pi n Me}{60} \quad (1.6)$$

1.4.3 Consommation spécifique

La consommation spécifique représente la quantité de carburant nécessaire pour fournir une quantité de travail mécanique donnée. En fait, la consommation spécifique est un indicateur d'efficacité énergétique du moteur. Plus la consommation spécifique est faible, le rendement du moteur est meilleur. La consommation spécifique est calculée à partir de la puissance et la consommation horaire.

$$gs = \frac{Gh}{Pe} * 1000 \quad (1.7)$$

Avec G_h est la consommation horaire.

$$Gh = \frac{Vc * \gamma}{T} * 3.6 \quad (1.8)$$

V_c : volume de la cylindrée

$V_c = S * C$ avec S : surface du piston en cm^2 et C : course du piston en mm

γ : Densité gasoil (0.850 kg)

T : temps de l'essai/min

1.4.4 Réserve du couple

La réserve du couple permet d'évaluer l'aptitude du moteur à vaincre une résistance ou une charge momentanément plus élevée, surtout s'il s'agit d'un outil animé par la prise de force (Figure 2).

Eléments de tracteur



$$RC = \frac{M_{max} - M_e}{M_{max}} * 100 \quad (1.9)$$

Cet intervalle qui se situe entre le couple maximal et le couple au régime nominal est appelé aussi « zone de grandes charges ». Pour un tracteur performant, la réserve du couple varie entre 30 à 50%.

Exercice

Soit les résultats d'essais d'un tracteur agricole de moyenne puissance, qui sont obtenus au banc de freinage :

n (tr/min)	M_e (N.M)	G_h (Kg/h)	Pe (Kw)
1240	188	5.90	
1300	186	7.05	
1670	180	7.73	
1850	174	8.50	
1980	168	8.96	
2120	163	9.48	
2270	160	10.10	
2390	156	10.60	
2420	153	10.40	
2470	130	9.20	
2525	0	3.87	

1. Déterminer la réserve du couple du moteur
2. Le tracteur est -il destiné pour les grandes charges ? Expliquer.



1.5 Système de transmission

La transmission est un ensemble d'organes destinés à transmettre le mouvement mécanique de rotation produit par le moteur thermique du tracteur jusqu'à la roue ou la prise de puissance, appelé aussi « prise de force ». Le système de transmission appelé aussi circuit de transmission permet de relier la sortie du moteur et les roues motrices (Figure 06). Ce mécanisme constitue une chaîne cinématique composée des éléments suivants :

- L'embrayage,
- La boîte de vitesses,
- Le différentiel,
- Les réducteurs finaux,
- Les pneumatiques,
- Les freins.

La transmission entre ces éléments est calculée par un rapport de transmission I_{tr} .

$$I_{tr} = i_{bv} + i_{tc} + i_{tf}$$

Avec :

i_{bv} : rapport de transmission boîte à vitesse

i_{tc} : rapport de transmission centrale

i_{tf} : rapport de transmission finale



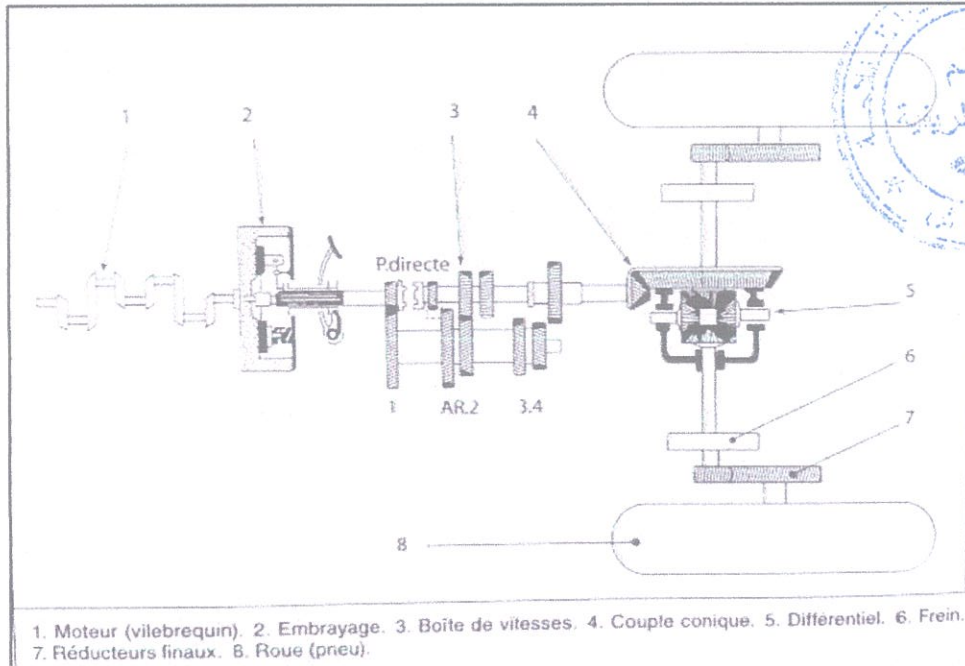


Figure 6. Circuit de transmission (Willy de Krem, 2012)

1.5.1 Embrayage

En général, les tracteurs sont équipés d'un embrayage à sec monodisque. Cependant, il existe des embrayages bi disques ou multidisques, refroidis par bain ou pulvérisation d'huile.

L'embrayage est un dispositif mécanique permet de solidariser progressivement ou désolidariser rapidement deux organes tournants indépendants. Il permet de communiquer le moteur avec la boîte à vitesse. L'embrayage est composé de deux (02) plateaux P_1 et P_2 . Le P_1 est solidaire avec le vilebrequin et est considéré comme « volant moteur ». Tandis que P_2 est solidaire avec l'arbre primaire de la boîte à vitesse (Figure 07). Le ressort R pousse les deux plateaux l'un contre l'autre, ce qui crée la liaison entre le moteur et la boîte de vitesse.



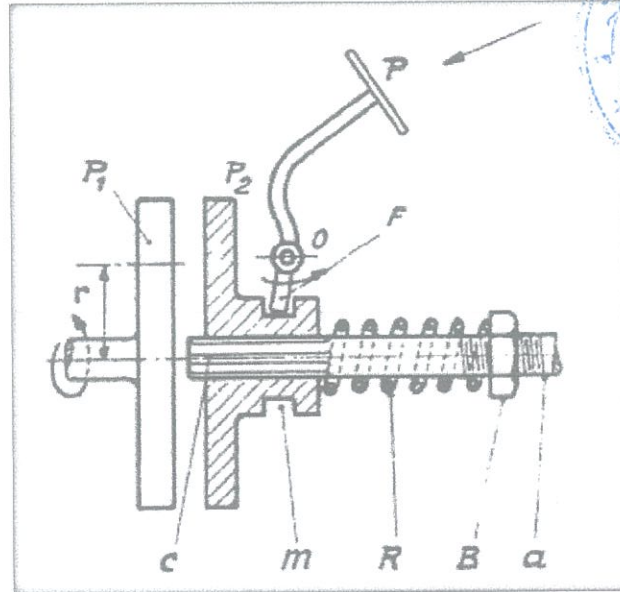


Figure 7. Principe de l'embrayage (Willy de Krem, 2012)

Pour le tracteur agricole, il existe deux systèmes d'embrayage :

1.5.1.1 Embrayage à disque à simple effet

Il permet de désaccoupler ou d'accoupler l'arbre menant et un arbre mené unique. L'embrayage à simple effet constitue actuellement la norme en matière de tracteurs agricoles. Il peut être monté sur les tracteurs grâce à l'adoption de la commande indépendante de la prise de force. Dans ce cas, un seul mécanisme d'embrayage est monté, avec un seul arbre de sortie vers la boîte de vitesses.

1.5.1.2 Embrayage à disque à double effet

Il permet de solidariser ou de désolidariser et dans un ordre deux arbres menés. Dans ce cas la commande de l'embrayage est unique (pédale). Les tracteurs à embrayage à double effet disposent d'une prise de force semi-indépendante car le conducteur doit débrayer le mouvement de l'avancement avant celui de la prise de force.

Les embrayages à double effet ont aujourd'hui pratiquement disparu des tracteurs agricoles au profit d'une commande de prise de force totalement indépendante.

1.5.2 Boîte de vitesses

La boîte à vitesse adapte la vitesse de rotation aux efforts à fournir pour exercer le travail demandé. Elle ne peut faire varier la puissance délivrée par le moteur mais les deux

composantes de la puissance, à savoir le couple et la vitesse de rotation. En effet, les principales fonctions de la boîte de vitesses du tracteur agricole sont :

- Adaptation du couple disponible aux roues motrices à l'effort de traction demandé.
- Désolidariser le moteur de la boîte de vitesse en plaçant la boîte au point mort et d'assurer la marche arrière.

La boîte de vitesses est composée de trois parties :

- Un ensemble de rapport,
- Un jeu de gammes,
- Un inverseur.

1.5.2.1 Ensemble de rapport

L'ensemble des rapports est constitué d'un jeu d'engrenage. L'engrenage est un dispositif mécanique constitué d'au moins deux (02) pignons en prise. Grâce aux caractéristiques des pignons, le rapport de démultiplication ou de vitesse peut être calculé. Ce rapport, nommé raison du train d'engrenage et noté « r » se détermine de la façon suivante en relation avec l'engrenage suivant (Figure 08) :

$$r = \frac{N_b}{N_a} = -\frac{Z_a}{Z_b} \quad (1.10)$$



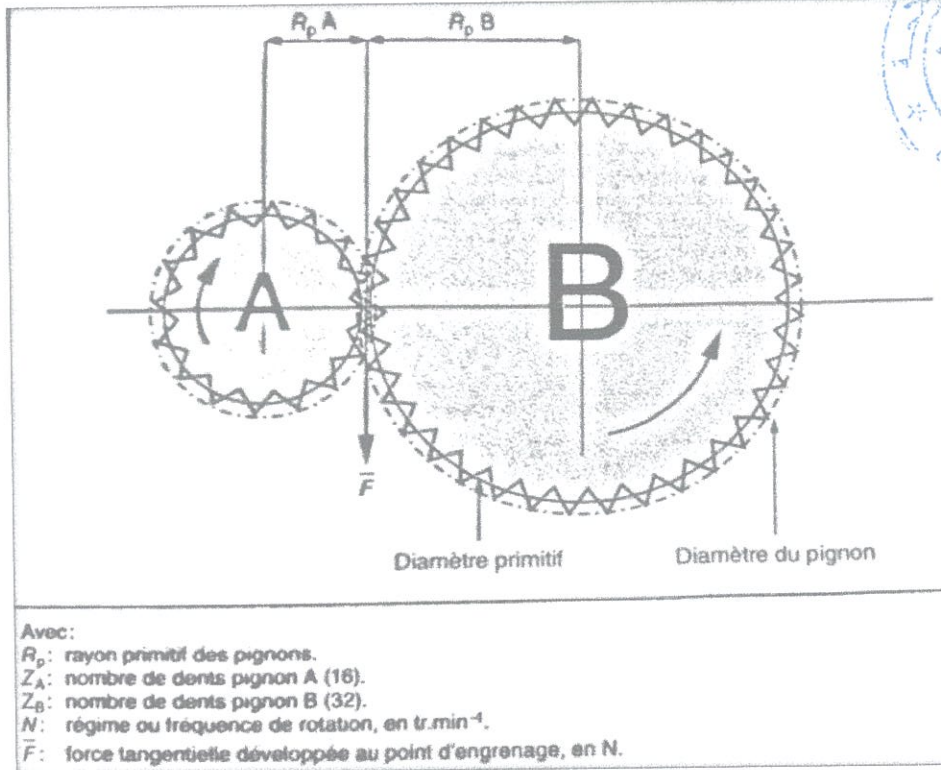


Figure 8. Représentation graphique d'un rapport (Willy de Krem, 2012)

1.5.2.2 Gammes

Ce dispositif démultiplie une ou plusieurs fois le rapport sélectionné. Le nombre de gammes a fortement évolué, mais sur les tracteurs les plus simples, il existe deux (lente et rapide), qui pouvant offrir autant de gammes que de vitesses. Pour les différencier, des lettres sont utilisés (A, B, C, D). En cabine, le conducteur devra donc sélectionner une vitesse et une gamme avec en général deux leviers distincts.

1.5.2.3 Inverseur

L'inverseur enclenche la marche arrière pour tous les rapports (Figure 09).



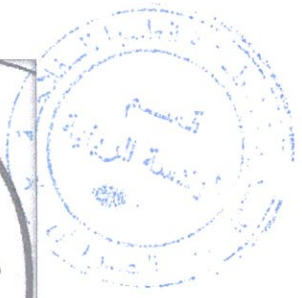
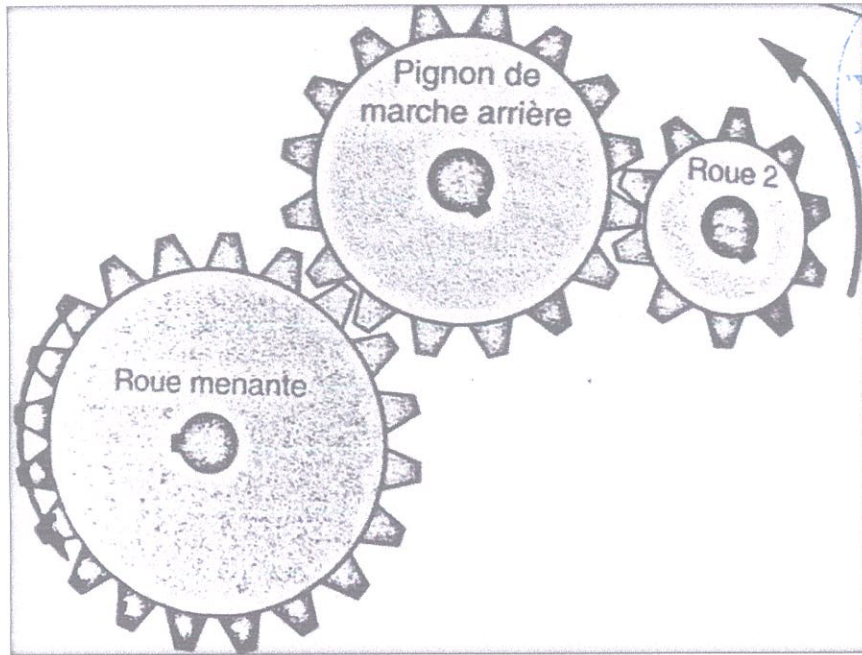


Figure 9. Marche arrière (Willy de Krem, 2012)

✓ Comment fonctionne une boîte de vitesse

Pour passer de P1 à P2 (Figure 10), il suffit d'actionner le levier de vitesses qui met en mouvement la fourchette, cette dernière déplaçant ensuite un baladeur. Ce mouvement va alors lier un engrenage de l'arbre secondaire pour passer les vitesses. En fait, l'arbre primaire met en mouvement l'arbre secondaire à l'aide de l'arbre intermédiaire en synchronisant les pignons des deux arbres.

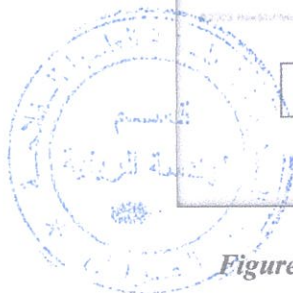
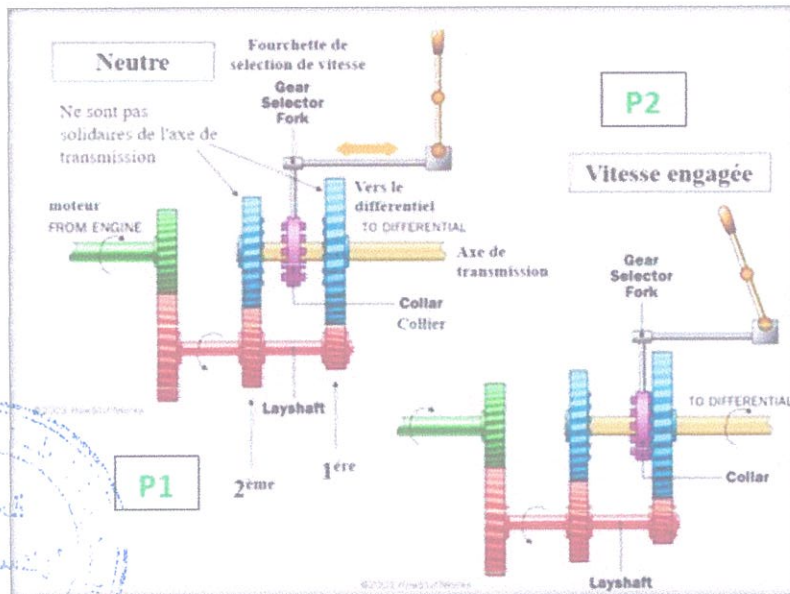


Figure 10. Principe de fonctionnement de la boîte de vitesses

1.5.3 Différentiel

Le différentiel est une pièce mécanique de la transmission permet de faire tourner les roues motrices à des vitesses différentes lors d'un virage. Son rôle est d'augmenter la vitesse de rotation de la roue extérieure par rapport à la roue intérieure. De ce fait, le différentiel permet de transmettre le couple aux deux arbres qui ne tournent à des vitesses différentes. Pour les tracteurs à quatre (04) roues motrices, le différentiel permet d'avoir des vitesses de rotation différentes entre l'essieu avant et arrière.

Le différentiel est constitué de deux pignons coniques appelés planétaires, qui sont liés à chaque demi arbre de roue. Les planétaires sont engrenés à deux autres pignons appelés satellites (Figure 11).

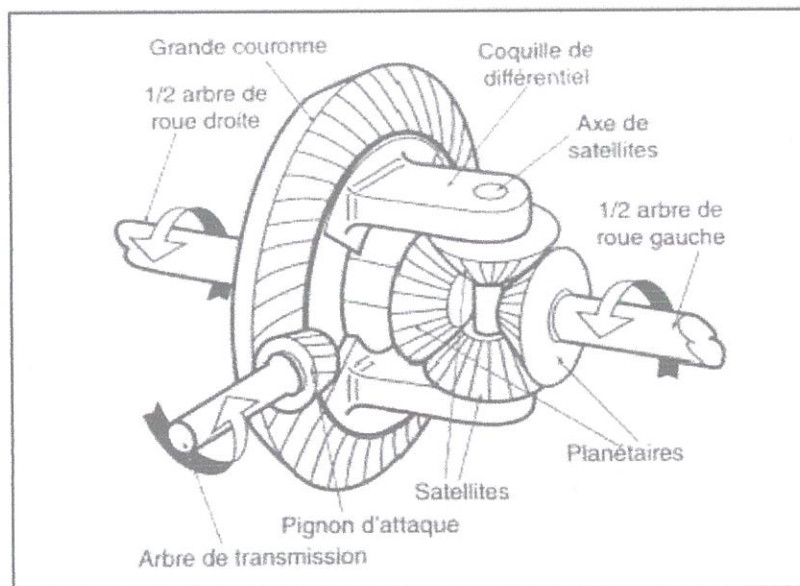


Figure 11. Description du différentiel (Willy de Krem, 2012)

1.5.4 Réducteurs finaux, pont moteur et freins

Les réducteurs finaux sont des engrenages qui augmentent le couple et réduisent la vitesse de rotation. Ils sont placés en fin de transmission en relation avec le pont moteur. Les réducteurs finaux sont composés de pignons qui est un train épicycloïdal composé de trois parties essentielles dans un réducteur de pont avant ou arrière. Le planétaire, au centre du mécanisme, constitue l'entrée du mécanisme. Dans le pont arrière, il est directement relié au différentiel alors que dans le pont avant le mouvement arrive par l'arbre à cardan situé dans l'articulation des roues. Le mouvement est transmis aux satellites qui prennent appui sur la couronne fixe.

Eléments de tracteur

Les satellites roulent donc sur la couronne fixe et emmènent avec eux le porte satellite qui, lui, est relié à la roue (Figure 12).



Figure 12. Réducteurs finaux

En fait, le pont avant, quand il est moteur, transmet la puissance aux quatre (04) roues motrices. Enclenché par un dispositif d'embrayage et un système de différentiel identique à celui de l'arrière (Figure 13).



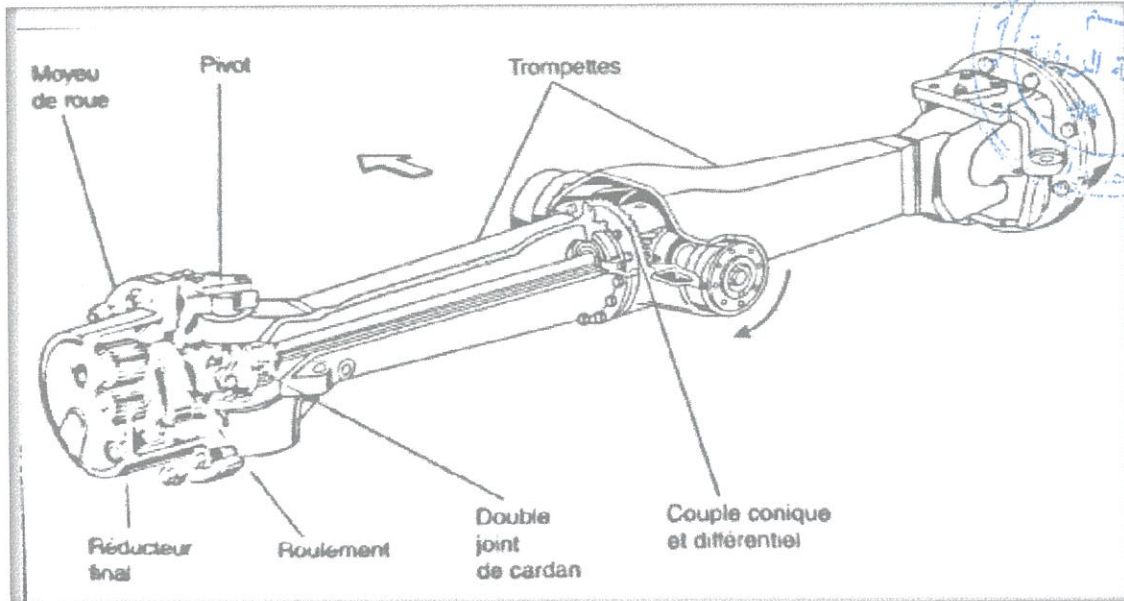


Figure 13. Pont moteur (Willy de Krem, 2012)

Pour les freins, leur rôle principal est de pouvoir stopper la transmission en ralentissant les roues par un phénomène de friction. Ce système transforme l'énergie mécanique de rotation en énergie thermique dissipée et ventilée dans l'environnement. Les freins les plus utilisés sur les tracteurs agricoles sont les freins à disque (Figure 14).

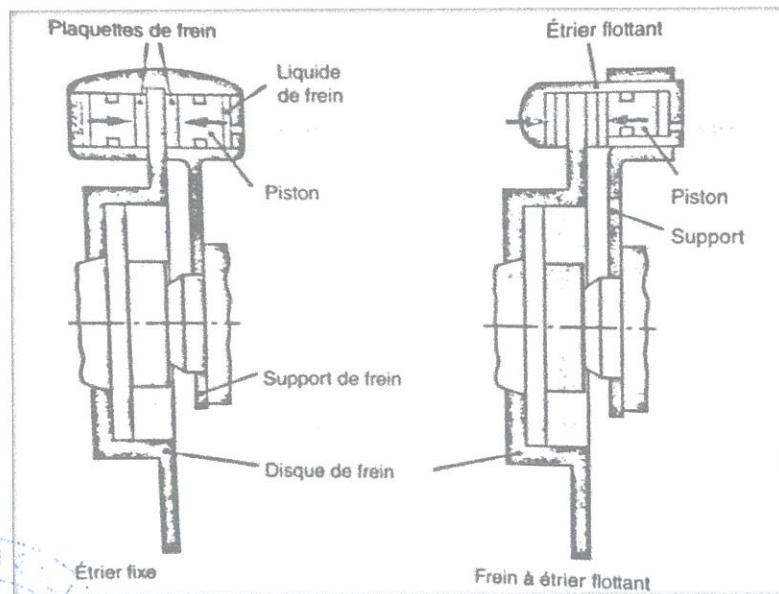


Figure 14. Frein à disque (Willy de Krem, 2012)

1.5.5 Pneumatiques

En fonction de type des pneumatiques : pneu moteur ou pneu directeur, il existe des tracteurs à quatre (04) roues motrices et des tracteurs à deux (02) roues motrices. Les pneumatiques servent à transmettre l'effort de traction (roues motrices) et assurer le guidage (roues directrices).



Chapitre 2 : Pneumatiques des tracteurs agricoles



2.1 Introduction

Les pneumatiques agricoles doivent remplir certaines conditions :

- Supporter les charges qui lui sont imposées aux vitesses d'utilisations sur route ou sur champ.
- Avoir des caractéristiques dimensionnelles permettant le passage sur les cultures en végétation, tout en préservant la stabilité du matériel.
- Assurer l'adhérence nécessaire à l'avancement du tracteur en toutes conditions de relief et de l'état du sol.
- Limiter le tassement et le compactage de sol par sa faible pression
- Faciliter par son aptitude à transmettre les efforts du moteur, ainsi que par sa durée une gestion économique de l'exploitation.

2.2 Type des pneumatiques agricoles

Il existe de nombreux type de pneumatiques agricoles ayant chacun une application particulière. Qu'elle soit le type de pneumatique, le choix doit se faire d'une manière technico-économique. Pour le tracteur, il existe des types pour les roues motrices et les roues directrices. Tandis que pour le matériel agricole, on parle des roues porteuses. Le choix d'un type de pneumatique consiste à trouver un bon compromis pour une utilisation aux champs (adhérence, dimensions) et lors des transports sur route comme au champ (capacité de charge, résistance au roulement, pression au sol...).

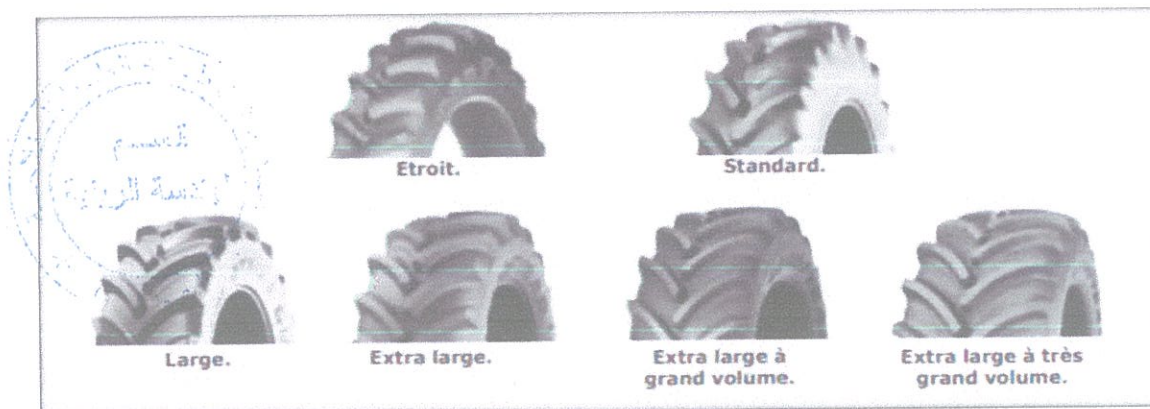


Figure 15. Type de roues motrices tracteur



Figure 16. Type de roues directrices tracteur

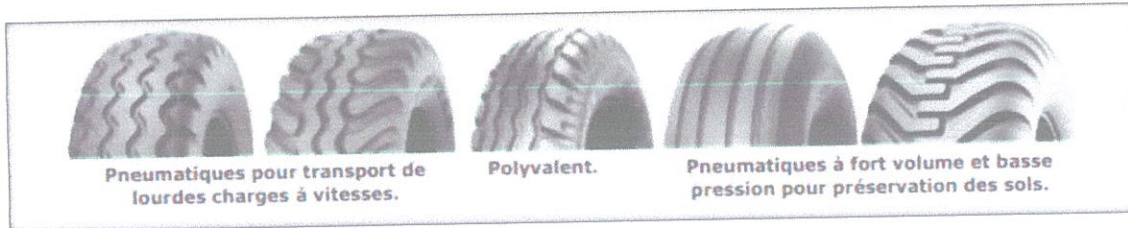


Figure 17. Type de roues porteuses pour matériel

2.3 Caractéristiques et dimensions des pneus agricoles

2.3.1 Caractéristiques des pneus

Les pneumatiques agricoles sont constitués d'une carcasse qui détermine le type de pneu. En fait, la carcasse est une armature en textile disposée en plis. Ces plis sont enrobés de caoutchouc naturel ou de résine synthétique. Il existe deux types de carcasse (Figure 18) :

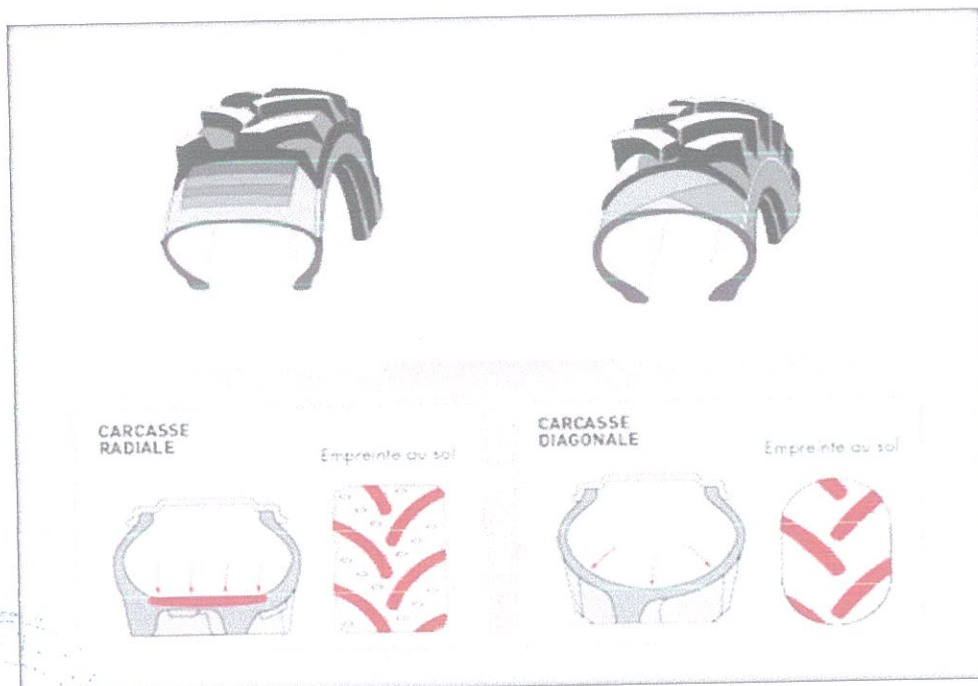


Figure 18. Pneu agricole, type radial et diagonal

Le pneu à carcasse radiale présente quatre avantages majeurs par rapport à un pneu à carcasse diagonale :

▪ Gain de traction :

- Déroulement plus régulier du pneu,
- Empreinte plus large et plus régulière,
- Les barrettes sont davantage en contact avec le sol.

▪ Meilleure préservation du sol :

- Moins de marquage au sol du fait d'une empreinte plus grande,
- Moins de tassement.

▪ Meilleure rentabilité économique :

- Economie de temps,
- Economie de carburant,
- Durée de vie du pneu plus longue.

2.4. Dimensions des pneus

Les pneumatiques agricoles sont caractérisés par un système de marquage spécifique à chaque type de pneu. Qu'il soit radial ou diagonal, le pneu a une charge spécifique à supporter en relation avec la vitesse d'avancement et la pression de gonflage (Figure 19 a, b). Il est important de respecter les caractéristiques mentionnées pour assurer une bonne adhérence avec le sol.



Eléments de tracteur

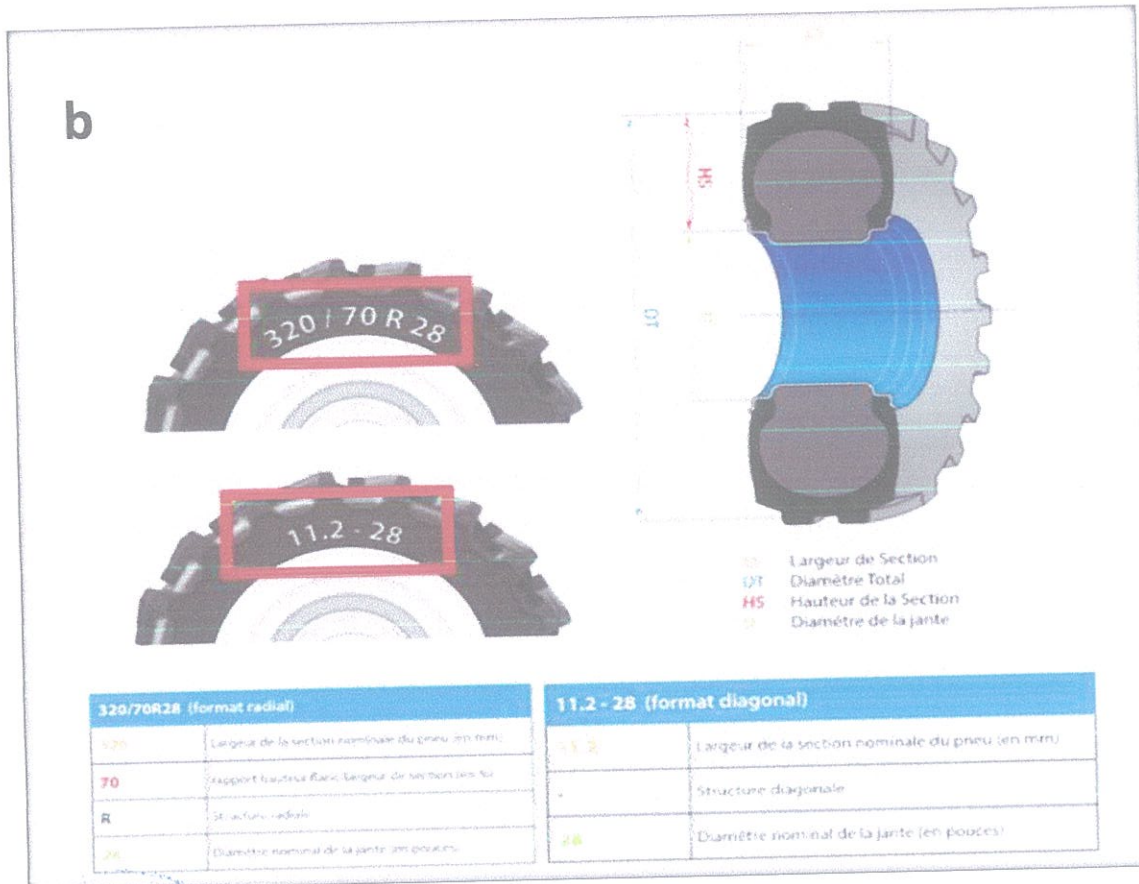
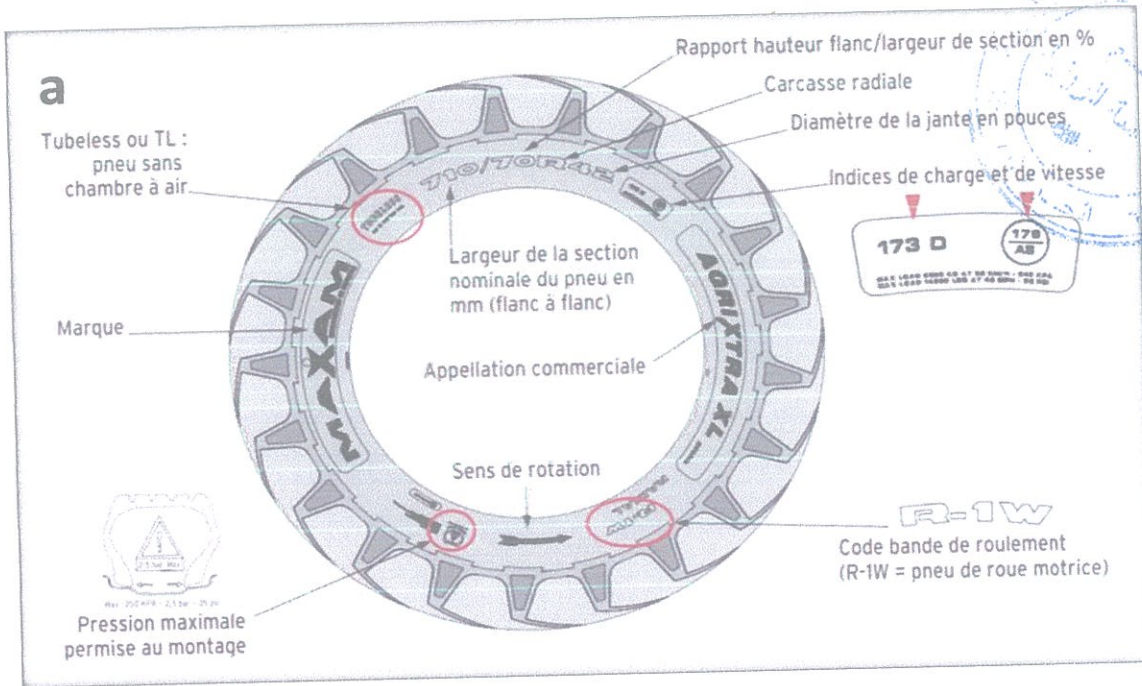


Figure 19(a, b). Marquage des pneumatiques agricoles

D'autres part, pour assurer une très bonne stabilité du pneu, il est important de connaître ces caractéristiques dimensionnelles qui ne sont pas marquées sur la surface. Le pneu agricole est constitué d'une enveloppe et une jante dont les dimensions sont présentées dans la figure 20.

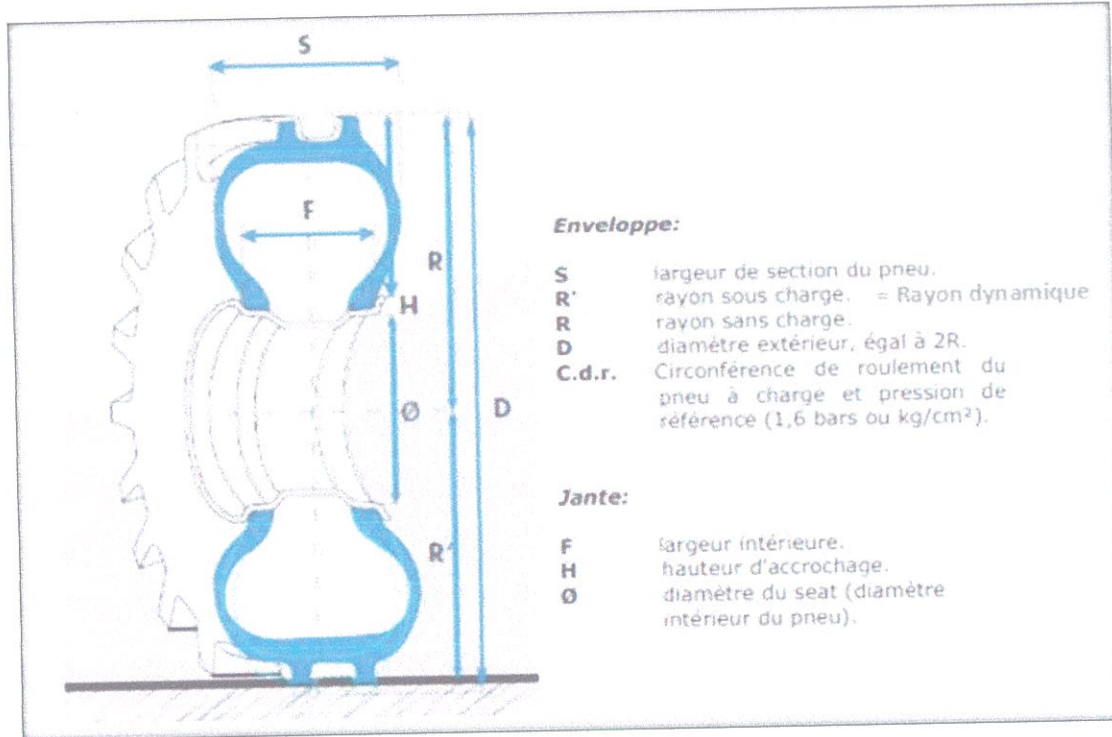


Figure 20. Caractéristiques dimensionnelles du pneu ((Willy de Krem, 2012)

Le calcul du rayon sans charge « R » ou le rayon maximal se fait de la manière suivante :

$$R = H + \frac{\varnothing}{2} \quad (2.11)$$

En pratique, le rayon dynamique ou le rayon sous charge R' a plus d'intérêt, il se calcule comme suit :

$$R' = \frac{L}{2\pi.n} \quad (2.12)$$

Avec n, le nombre de tours que fait la roue motrice sur une distance L.

2.6 Indice de charge et de vitesse

Les indices de charge et de vitesse sont des valeurs mentionnées sur le pneu pour déterminer la charge nominale ainsi que la vitesse d'avancement du pneu. En fait, l'indice de charge est un chiffre allant couramment de 100 à 200 indiquant la charge maximum admissible par le pneumatique à une pression normalisée variable en fonction du type de pneumatique (1.6 bar

Eléments de tracteur

pour les pneus de petite et moyenne puissance). Cette valeur de référence ne correspond pas à une pression de gonflage préconisée mais à une pression nominale. La pression maximale est limitée par la résistance à l'éclatement de la carcasse qui est défini par le **ply-rating** (nombre de plis de la carcasse). Plus le ply-rating est élevé, plus la pression maximale est élevée aussi, par conséquent plus la charge que le pneu d'une taille donnée peut supporter est grande.

Tandis que l'indice de vitesse indique la vitesse d'utilisation du pneumatique.

Exemple :

Indice de charge : 150 = 3 350 kg à 1.6 bar

153 = 3650 kg à 1.6 bar

Indice de vitesse : A6 : 30 km/h

A8 : 40 km/h

B : 50 km/h

D : 65 km/h

Sur un même pneumatique, l'indice de charge et de vitesse sont indiqués ensemble.

Exemple : 153 A8/150 B.

Tableau 2. Indices de vitesses

Code de vitesse	Vitesse (en km/h)	Code de vitesse	Vitesse (en km/h)
A1	5	B	50
A2	10	C	60
A3	15	D	65
A4	20	E	70
A5	25	F	80
A6	30	G	90
A7	35		
A8	40		



Tableau 3. Indice de charge

L.C.	KG	L.C.	KG	L.C.	KG	L.C.	KG	L.C.	KG	L.C.	KG	L.C.	KG
0	45	40	140	80	450	120	1 400	160	4 500	200	14 000	240	45 000
1	46.2	41	145	81	462	121	1 450	161	4 625	201	14 500	241	46 250
2	47.5	42	150	82	475	122	1 500	162	4 750	202	15 000	242	47 500
3	48.7	43	155	83	487	123	1 550	163	4 875	203	15 500	243	48 750
4	50	44	160	84	500	124	1 600	164	5 000	204	16 000	244	50 000
5	51.5	45	165	85	515	125	1 650	165	5 150	205	16 500	245	51 500
6	53	46	170	86	530	126	1 700	166	5 300	206	17 000	246	53 000
7	54.5	47	175	87	545	127	1 750	167	5 450	207	17 500	247	54 500
8	56	48	180	88	560	128	1 800	168	5 600	208	18 000	248	56 000
9	58	49	185	89	580	129	1 850	169	5 800	209	18 500	249	58 000
10	60	50	190	90	600	130	1 900	170	6 000	210	19 000	250	60 000
11	61.5	51	195	91	615	131	1 950	171	6 150	211	19 500	251	61 500
12	63	52	200	92	630	132	2 000	172	6 300	212	20 000	252	63 000
13	65	53	206	93	650	133	2 060	173	6 500	213	20 600	253	65 000
14	67	54	212	94	670	134	2 120	174	6 700	214	21 200	254	67 000
15	69	55	218	95	690	135	2 180	175	6 900	215	21 800	255	69 000
16	71	56	224	96	710	136	2 240	176	7 100	216	22 400	256	71 000
17	73	57	230	97	730	137	2 300	177	7 300	217	23 000	257	73 000
18	75	58	236	98	750	138	2 360	178	7 500	218	23 600	258	75 000
19	77.5	59	243	99	775	139	2 430	179	7 750	219	24 300	259	77 500
20	80	60	250	100	800	140	2 500	180	8 000	220	25 000	260	80 000

2.7 Charge des pneumatiques et ply-rating

Plusieurs modèles de calcul de charge des pneumatiques ont été établis, notamment par Bekker, Sitkei et Komandi. La charge G que peut supporter une roue est en fonction de plusieurs facteurs :

D : diamètre extérieur ou maximal d'une roue gonflée à la pression recommandée,

B : Grosseur du boudin ou largeur du pneu,

H : Hauteur de section ou hauteur du pneu,

P_g : Pression de gonflage.

La relation suivante établie par Steiner et Sohne (1979), permet de calculer la charge maximale admise par les pneus.

Pour les roues motrices :

$$G = 110 + 1.372B^{1.437}D^{0.820}Pg^{0.593} \left(\frac{H}{B} \right)^{0.756} \quad (2.13)$$

Pour les roues directrices :

$$G = 17 + 0.47B^{0.844}D^{1.317} + (Pg + 1.5)(H/B)^{1-0.85} \quad (2.14)$$

Avec B, D et H en (cm) et P_g en (bar)



Par ailleurs, le ply rating noté PR ou nombre de plis d'un pneu peut être déterminé par la relation suivante :

$$PR = 0.787 \frac{G}{D^2} 10^2 \approx 80G \frac{G}{D^2} \quad (2.15)$$

2.8 Pression de gonflage

La pression de gonflage d'un pneumatique influera directement sur l'adhérence du tracteur et déterminera la pression au sol exercée par le tracteur.

Pression au sol = pression de gonflage + 10%

En fait, un pneumatique sous gonflé :

- Fatigue la carcasse.
- Sensibilise les flancs aux frictions et aux pincements.
- Augmente la consommation de carburant.
- Provoque une usure irrégulière des reliefs des pneumatiques.

Tandis qu'un pneumatique sur gonflé :

- Diminue l'adhérence.
- Sensibilise la bande de roulement aux percussions.
- Provoque une usure rapide de la bande de roulement.
- Diminue le confort du conducteur en augmentant les vibrations





Tableau 4. Charge du pneumatique en fonction de la pression

Dimensions.		Charge du pneumatique en kg, en fonction de la pression en bar et pour une vitesse maxi de 30 km/h.					
Métriques	Pouces	0,6 bar	0,8 bar	1,0 bar	1,2 bars	1,4 bars	1,6 bars
285/85 R 24 300/70 R 24	9.5 R 24	680	750	820	900	970	1040
280/85 R 24 320/70 R 24	11.2 R 24	820	910	1000	1090	1170	1260
320/85 R 24 360/70 R 24	12.4 R 24	950	1050	1150	1250	1350	1460
340/85 R 24 380/70 R 24	13.6 R 24	1010	1120	1230	1330	1440	1550
380/85 R 24 420/70 R 24	14.9 R 24	1180	1310	1440	1560	1690	1820

Les charges du pneumatique mentionnées dans le tableau 02 sont propres à quelques références seulement. En fait, un même pneumatique admet des charges maximales variables selon sa pression de gonflage.



Chapitre 3 : Système de liaison tracteur agricole- outil



3.1 Introduction

Une des principales fonctions du tracteur est de tirer une charge qui peut être portée (charrue, cultivateur, etc.), semi portée (remorque benne, tonne à lisiers épandeurs d'amendement, de fenaison, etc.) ou traînée (outils de grandes dimensions, remorque à essieu directeur). De même, le tracteur sert pour animer les outils dont les pièces travaillantes nécessitent l'énergie du moteur.

3.2 Type d'attelage tracteur-outil

3.2.1 Outil porté

Physiquement, le poids d'un outil porté est supporté intégralement par le tracteur. L'outil ne repose donc pas sur le sol, il est relié au tracteur par un attelage à trois points actionné par le relevage hydraulique. Ce type d'attelage donne une bonne maniabilité aux machines, en particulier pour les réglages, les manœuvres et le transport. Ce qui explique l'utilisation des tracteurs puissants dans le cas de travail avec des outils lourds.

3.2.2 Outil semi-porté

Dans ce cas, le matériel est attelé de telle façon qu'une partie de son poids soit supportée par le tracteur et que l'autre partie repose sur un ou plusieurs points du sol. Cette répartition des charges est intéressante pour le matériel de transport des charges (remorque) ou encore des machines destinées à la récolte (presse à fourrage, récolteuse de légumes, etc.). Les vitesses d'exécution sont souvent inférieures à 6 km/h en travaux des champs et peuvent atteindre 50 km/h pour les transports sur route, selon les normes en vigueur.

3.2.3 Outil traîné

Les outils sont adaptés au tracteur de telle façon que l'essentiel du poids soit supporté par le sol. Si l'adhérence est suffisante, le tracteur peut tracter des charges importantes, mais lorsque les efforts de roulement sont importants, l'adhérence du tracteur peut devenir insuffisante.



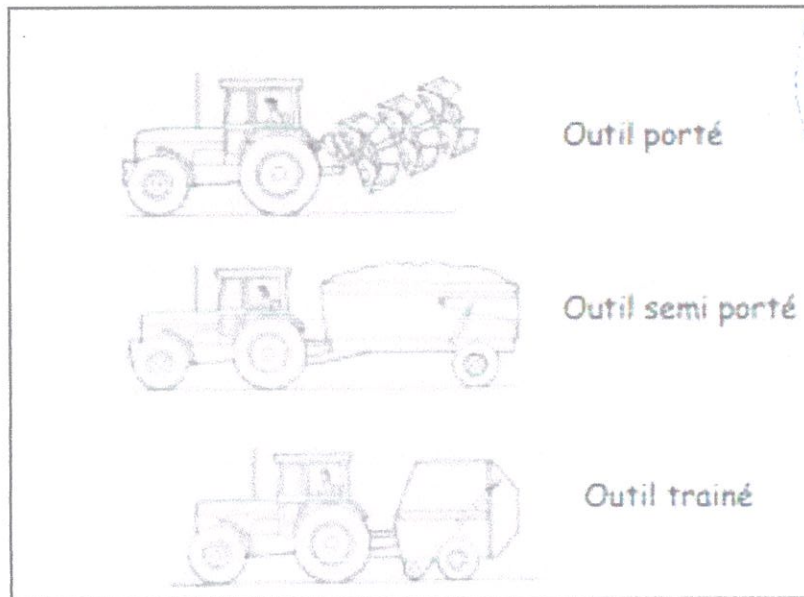


Figure 21. Type d'attelage tracteur-outils

3.3 Système de liaison outil-tracteur

3.3.1 Relevage hydraulique

Les outils de travail du sol sont attachés au tracteur via le relevage 3 points appelé aussi relevage hydraulique. Le relevage hydraulique est un dispositif permet de modifier la position de l'outil par rapport au tracteur. Le système trois points est constitué d'un point fixe appelé « barre de poussé » et deux points inférieurs mobiles ou barres de traction (Figure 22).



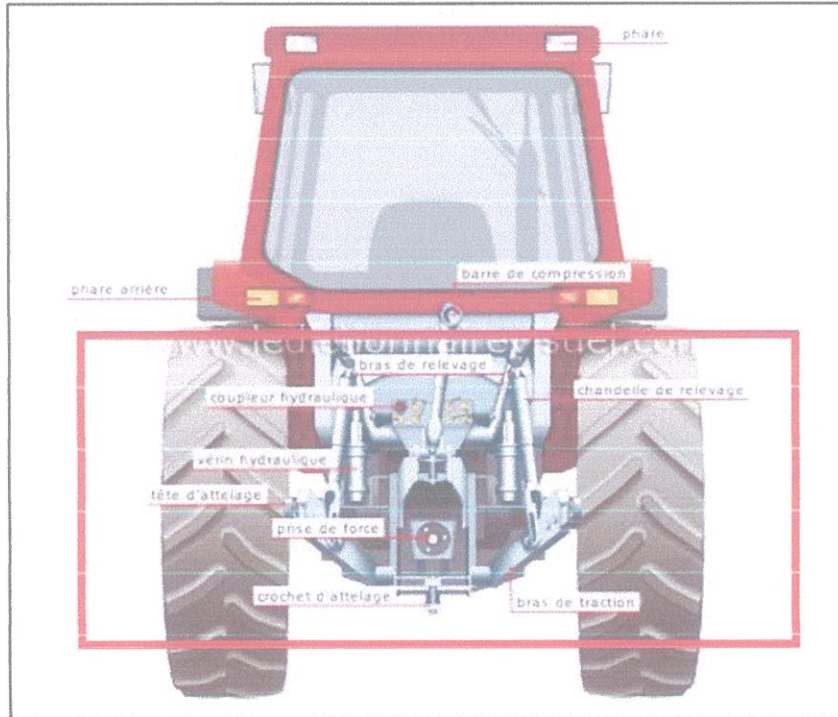


Figure 22. Description de relevage hydraulique

Le relevage hydraulique est présent à l'arrière du tracteur, parfois aussi à l'avant, si le tracteur est de grande puissance. Il permet de positionner les outils en hauteur à l'aide des vérins hydrauliques.

3.3.2 Les vérins

La commande de relevage hydraulique se fait par des vérins hydrauliques. On distingue deux grandes catégories de vérins : vérin à **simple effet** et vérin à **double effet**. Les vérins sont utilisés pour transformer l'énergie hydraulique en énergie mécanique et plus précisément en un mouvement de translation

3.3.3.2.1 Le vérin simple effet

Le vérin n'est commandé hydrauliquement que dans un seul sens, celui de sortie. Le circuit hydraulique se manifeste via une pompe entraînée par le moteur du tracteur. En fait, la pompe envoie l'huile du réservoir vers le distributeur et en actionnant sur la manette de distribution (manette située à côté du siège conducteur), l'huile exerce une pression sur le piston du vérin hydraulique et provoque la mobilité des bras de relevage. Tandis que le surplus d'huile est refoulé vers le réservoir (figure 23). L'entrée du vérin se fait par une commande et l'huile retourne au réservoir. Donc, la pression chute dans la chambre et le poids de la charge ou de

l'outil repousse le piston. De ce fait, la montée de la machine se fait par la pression d'huile et la descente par l'effet de poids de la machine.

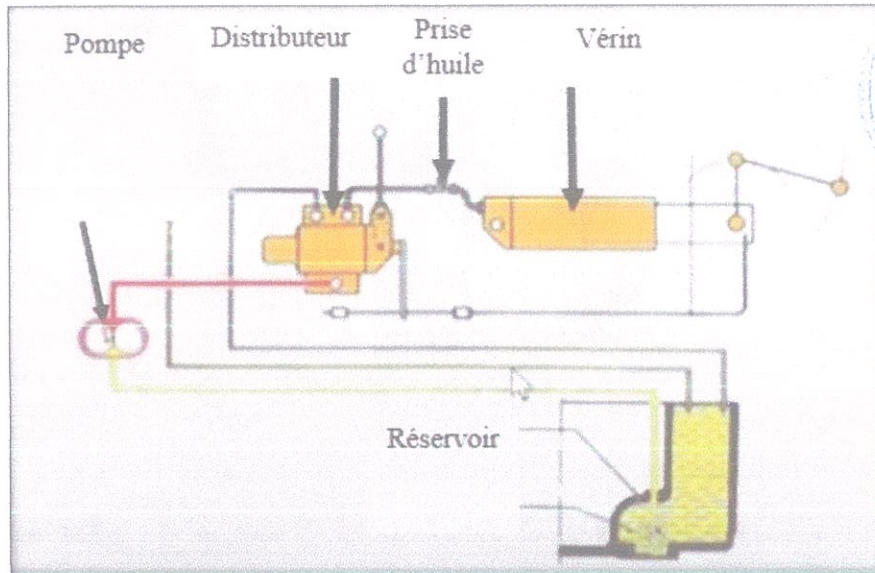


Figure 23. Schéma de circuit hydraulique « Vérin simple effet »

3.3.3.2.2 Le vérin double effet

Les mouvements d'entrée et de sortie du piston sont commandés hydrauliquement. La section active de la sortie du vérin est la surface totale du piston. Lors de l'entrée, c'est la section du piston qui entoure la tige, puisque l'huile ne peut pas agir sur la section de la tige. Ainsi lorsqu'on remplit une chambre, l'autre se vide, et les vitesses de sortie et d'entrée sont différentes. Du coup, la montée et la descente de la machine se fait sous la pression d'huile dans les deux sens (Figure 24).



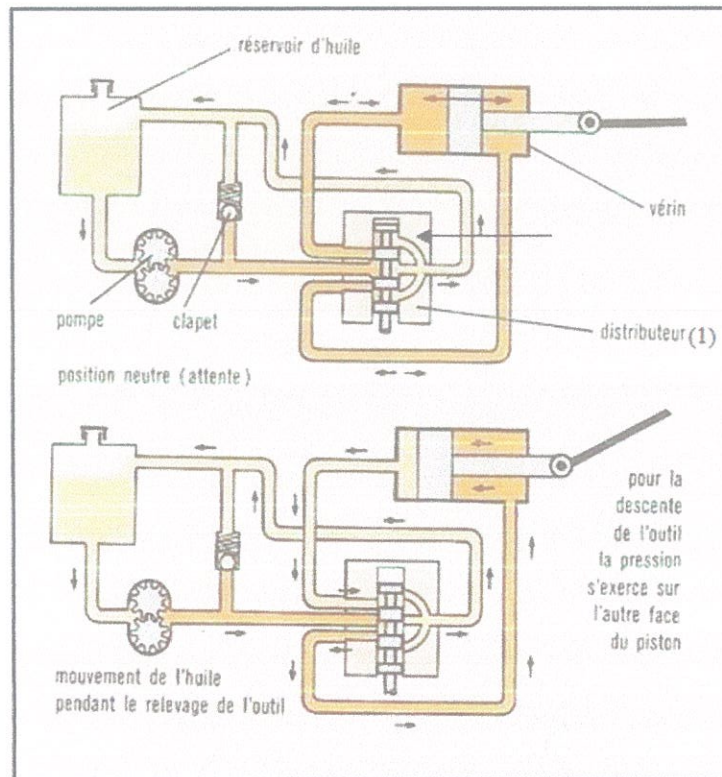


Figure 24. Schéma de circuit hydraulique « Vérin double effet »

3.3.3 Contrôles de relevage hydraulique

Le relevage hydraulique permet de contrôler les paramètres de traction des outils par le contrôle de position et le contrôle d'effort. A l'aide des manettes mécanique ou des commandes électronique, le conducteur peut contrôler la position et l'effort développé par l'outil à l'aide des bras de relevage hydraulique.

- ✓ **Contrôle de position** : permet de régler la hauteur de l'outil par rapport au sol. Cette hauteur doit être maintenue constante et nécessitant peu ou pas d'effort de traction. Sur un relevage mécanique, chaque position de la manette de relevage correspond à une hauteur des bras de relevage. Tandis que sur le relevage électronique, chaque position du bouton de hauteur maxi de relevage correspond à une hauteur de bras de relevage.
- ✓ **Contrôle d'effort** : permet de maintenir une traction constante en soulevant légèrement l'outil derrière en cas de surcharge. Sur les relevages mécaniques, chaque position de la manette de contrôle d'effort correspond à une sensibilité de l'effort de traction. Par ailleurs, sur les relevages électroniques, chaque position du bouton de contrôle d'effort correspond à une sensibilité de relevage de l'outil.

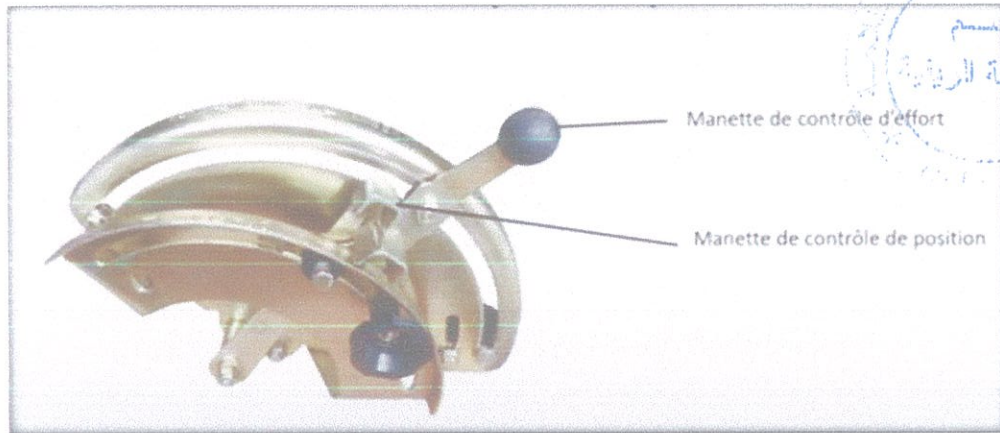


Figure 25. Contrôle d'effort et de position

3.4 Prise de force ou prise de puissance

Qu'ils soient, portés, semi portés ou trainés, certains outils agricoles ne peuvent fonctionner que si leur mécanisme est animé (rotation). Cette animation est rendue possible grâce à la prise de force située à l'arrière et quelque fois à l'avant du tracteur (option). La liaison du tracteur avec l'outil est assurée par deux demi-arbres coulissant afin de permettre une variation de la longueur en fonction de la position du relevage hydraulique et par deux cardans (un à chaque extrémité) pour assurer les emmanchements et les verrouillages côté tracteur et côté machine. L'ensemble est nommé communément "arbre de prise de force" ou "arbre à cardans". Les demi-arbres sont coulissants permettant de s'adapter aux distances tracteur-machine lors des montées et descentes du relevage hydraulique (Figure 26).

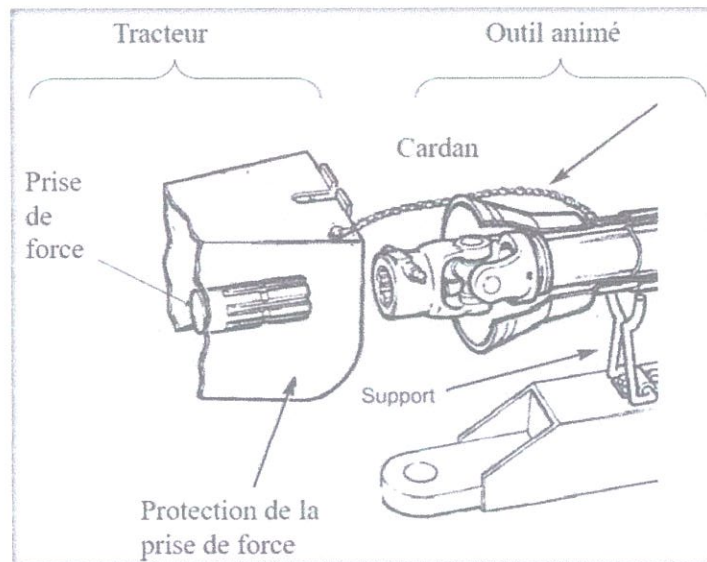
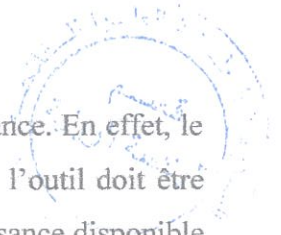


Figure 26. Emplacement prise de force (Willy de Krem, 2012)



La prise de force est un terme qui devrait être remplacé par la prise de puissance. En effet, le tracteur développe un couple moteur pour un régime donné. L'animation de l'outil doit être réalisé par une transmission de puissance et pas uniquement de force. La puissance disponible à la prise de force représente 85-95% de la puissance moteur, avec des régimes normalisés de : 540- 1000 tr/min. Avec la variation de type des tracteurs (petite, moyenne et grande puissance), et pour pouvoir entraîner les outils, les sorties de prise de force coté tracteur avaient des dimensions normalisées (Figure 27). Actuellement pour faciliter l'adaptation des outils animés, les tracteurs sont dotés d'une seule sortie dont les embouts d'emmanchement sont interchangeables (boulon ou circlips).

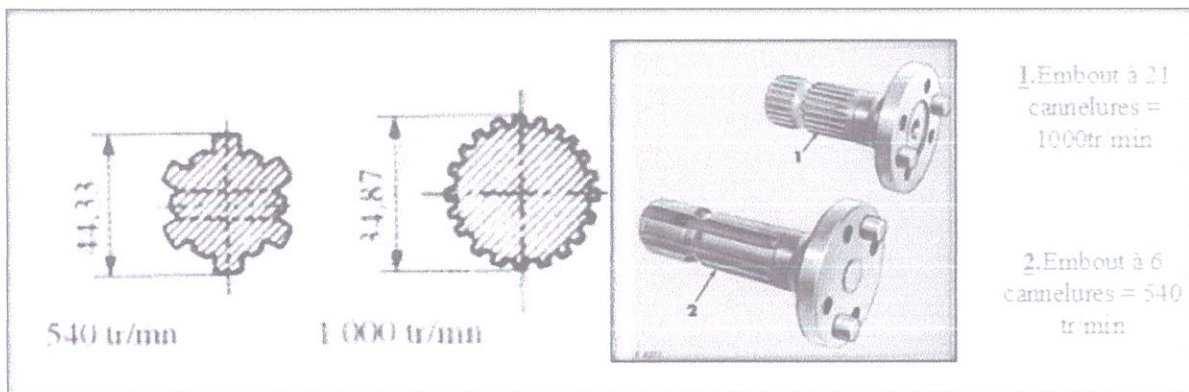


Figure 27. Variation des dimensions d'arbre de la prise de force coté tracteur (Willy de Krem, 2012).

3.5 La chape

La chape est un dispositif de liaison utilisé principalement pour le remorquage et la traction des outils trainés et/ou semi porté. C'est une pièce métallique robuste, en forme U ou sous forme d'un crochet, fixé à l'arrière du tracteur (Figure 28).

Son rôle principal, est de fournir un point d'encrage entre le tracteur et l'outil. Par sa conception robuste, elle assure une durabilité et une résistance élevée pour supporter les charges lourdes.





Figure 28. Chape de tracteur

3.6 Optimisation des attelages agricoles

Avec des outils portés plus lourdes l'adhérence du tracteur est accrue en raison de l'augmentation du poids appliqué sur les roues motrices arrière. En revanche, cet accroissement de poids conduit à une augmentation des efforts de roulement et des risques de tassement du sol et, par ailleurs, l'avant du tracteur est allégé. Il convient donc d'optimiser l'alourdissement et de le répartir sur les roues du tracteur en fonction de leur motricité. De ce fait, un système de lestage doit être associé.

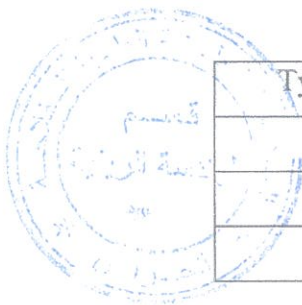
3.7 Coefficient de répartition de poids

Par fabrication, le tracteur à l'état statique n'a pas une répartition égale de son poids sur les essieux avant et arrière. Des coefficients de répartition de charge varie en fonction de type de tracteur, à quatre (04) roues motrices ou à deux (02) roues motrice (Tableau 05).

Tableau 05.

Tableau 5. Coefficient de répartition de charge

Type de tracteur	Avant (%)	Arrière (%)
R4x2	35	65
R4x4 (≠)	50	50
R4x4 (=)	65	35





3.8 Le lestage

3.8.1 Lestage par l'eau

C'est un mode de lestage pratique car le poids supplémentaire apporté par l'eau n'est pas supporté par l'air du pneumatique. Il s'envisage sur des pneus tubeless ou avec chambre à air et nécessite l'adaptation de valve spécifique air/eau. L'enveloppe doit être remplie avec 75% d'eau (minimum et maximum) pour ne pas créer d'effet de balourd à faible vitesse et ne pas dégrader le pneu. La charge est donc supportée par un faible volume d'air (25% du volume). Ce type de lestage convient pour le pont arrière et avant (Figure 29).

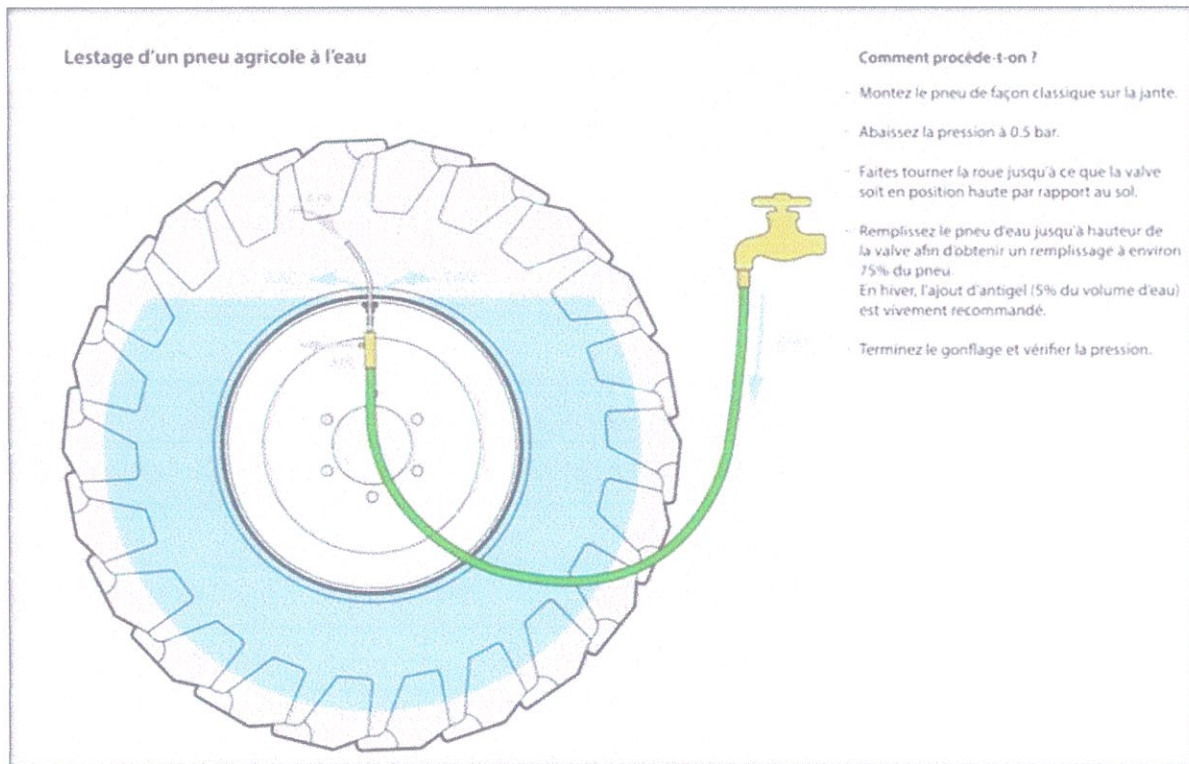


Figure 29. Principe de lestage l'eau (Persoons et al., 1996)

3.8.2 Lestage arrière par masse

Ce type de lestage est très utilisé. Il consiste à placer des masses en fonte sur les jantes arrière du tracteur. Les anneaux placés sur le voile des roues arrière pèsent environ 50 à 75 kg. Ce qui rend l'opération d'installation et de désinstallation assez longue (Figure 30).



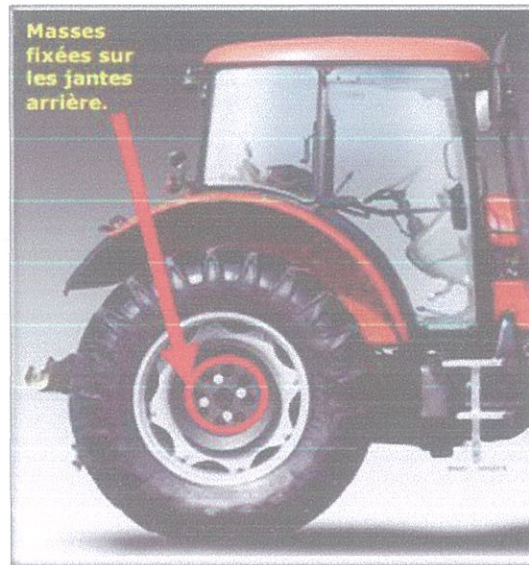


Figure 30. Lestage arrière par masses

3.8.3 Lestage avant

Il se fait par un lestage sur le châssis par la fixation des masses amovibles sur le support d'essieu avant ou l'utilisation d'un relevage avant pour accrochage d'un jeu de masses amovibles (Figure 31).

Les masses amovibles pèsent entre 20 et 40 kg et sont plus faciles à manutentionner. Par contre le lestage sur le relevage par le biais de masses fixées sur un bâti du type "trois points" est réalisé sans effort grâce à la mobilité des bras de levage.



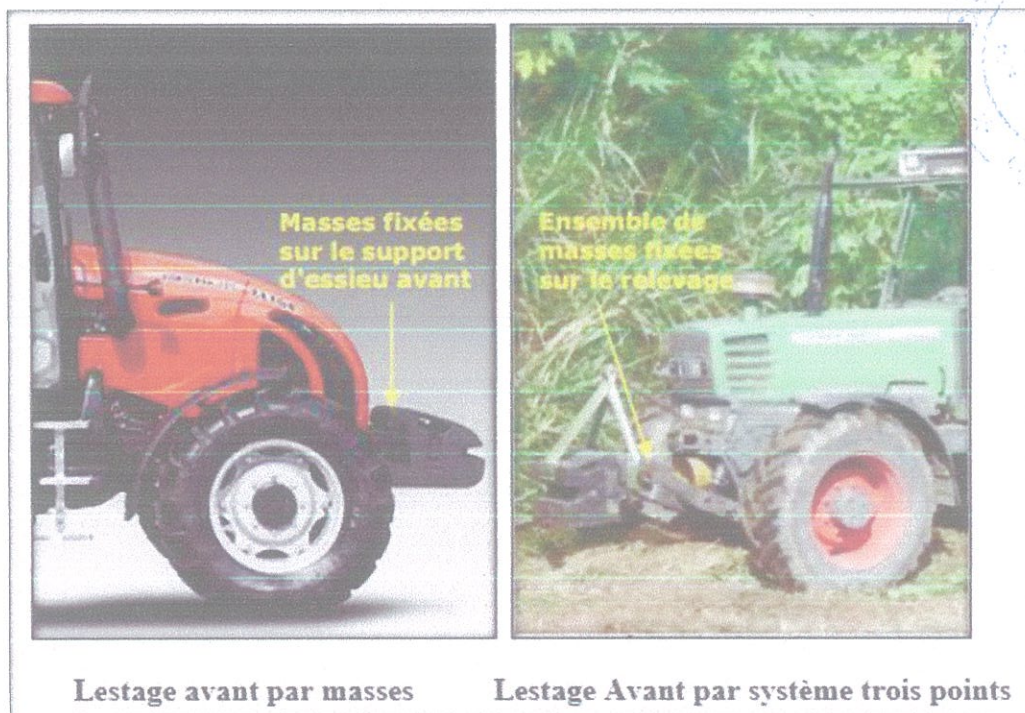


Figure 31. Systèmes de lestage avant

3.9 Le jumelage

Le jumelage consiste à associer deux roues de même diamètre extérieur aux roues motrices grâce à des fixations rapides. Le jumelage peut être partiel lorsque les roues motrices arrière sont jumelées et total lorsque toutes les roues motrices sont jumelées. De plus, le jumelage est possible avec des pneus plus étroits mais de circonférences extérieures identiques (Figure 32).

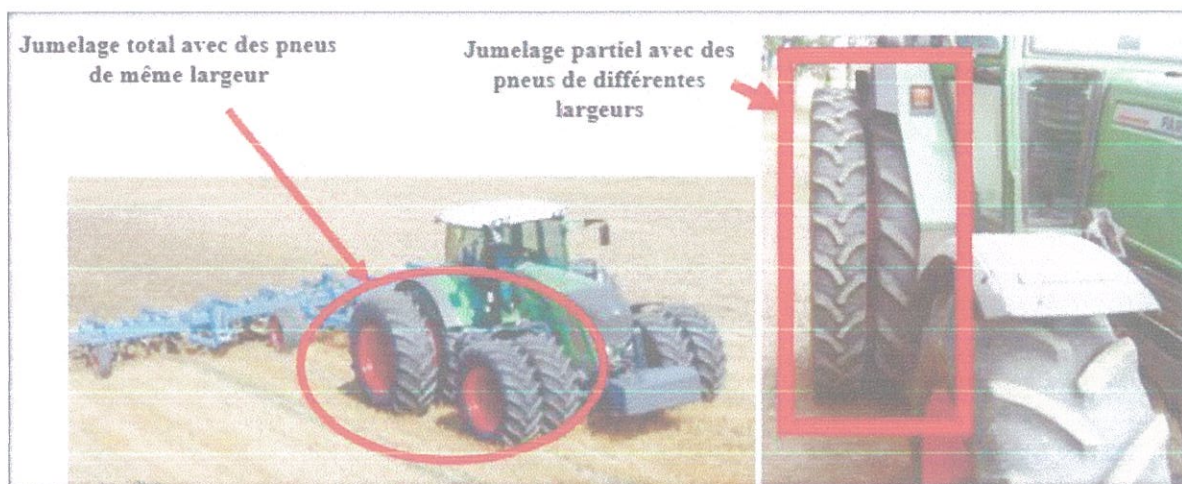


Figure 32. Principe de jumelage des tracteurs agricoles

Eléments de tracteur

Le jumelage pneumatique des tracteurs de grandes puissances permet d'augmenter l'adhérence et la traction des outils. Par ailleurs, le jumelage des roues augmente la largeur hors tout du tracteur et par conséquent la largeur de travail de l'outil. Donc il faut penser au choix des outils adéquats en terme de poids et de largeur de travail.



Chapitre 4 : Dynamique des pneumatiques



4.1 Introduction

La dynamique des pneumatiques dépend de l'ensemble des forces agissantes sur les pneus du tracteur. En fait, une partie du poids du tracteur est supporté par les roues avants et une autre partie par les roues arrières en fonction du type de tracteur (voir tableau 05, chapitre 3). Par ailleurs, le tracteur se déplace sur un sol avec des propriétés physiques variables dans le temps (résistance à la pénétration, taux d'humidité, la cohésion...). La résultante de ces facteurs entraine la locomotion des pneumatiques.

4.2 Locomotion

4.2.1 Forces agissantes sur les pneumatiques

Dans le présent cas, les forces agissantes sont étudiées à une vitesse constante avec un déplacement à vide c'est-à-dire en absence de l'outil à l'arrière du tracteur (Figure 33).

En déplacement, sous l'effet d'une partie de poids de tracteur Q_m , une réaction verticale du sol Y_m se produit. En parallèle, sous l'effet d'un couple aux roues motrices M_m transmis du couple moteur une force de traction brute se produit.

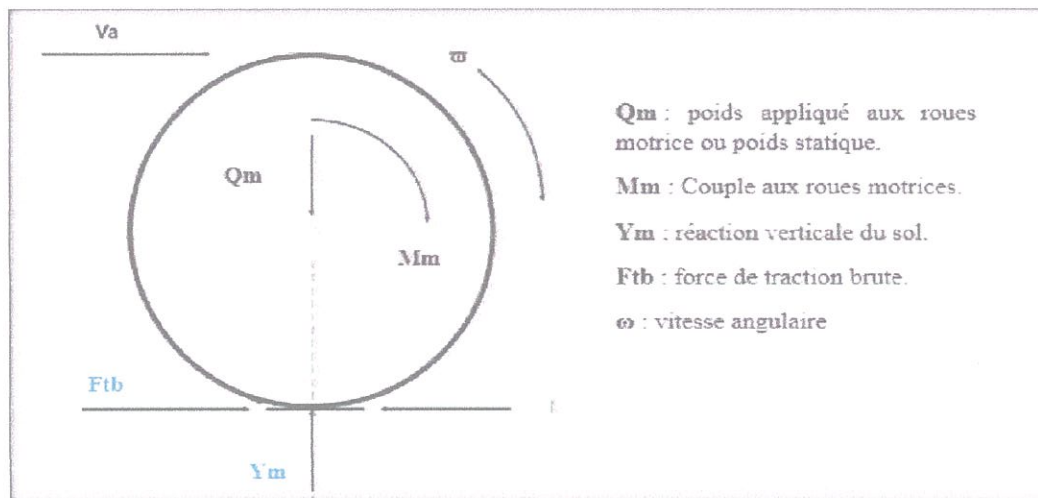


Figure 33. Forces agissantes pour locomotion

4.2.2 Couple aux roues motrices

Le couple présent au niveau des roues motrices provient du couple fournit par le moteur. Pratiquement, le couple aux roues motrices doit être important et la vitesse faible pour assurer



une très bonne adhérence sol/pneu. En fait, le couple moteur est transmis aux roues via la chaîne de transmission et est calculé par la formule suivante :

$$M_m = M_e \cdot i_{tr} \cdot \eta_{tr} \quad (4.16)$$

M_m (N.m/s) : couple aux roues motrices

i_{tr} : rapport de transmission

η_{tr} : rendement mécanique

Le rendement mécanique η_{tr} exprime les pertes de puissance au niveau de la transmission.

Le couple aux motrices M_m varie en fonction du régime moteur. De ce fait, trois (03) valeurs de couple peuvent être calculées :

Au régime nominal $n_n \rightarrow M_m = M_n \cdot i_{tr} \cdot \eta_{tr} \quad (4.17)$

Au régime de surcharge $n_s \rightarrow M_m = M_s \cdot i_{tr} \cdot \eta_{tr} \quad (4.18)$

Au régime à vide $n_v \rightarrow M_m = 0 \quad (4.19)$

4.2.3 Force de traction brute

La force de traction brute F_{tb} est appelée aussi force maximale d'adhérence. La locomotion du pneumatique est en fonction de F_{tb} .

$$\text{Locomotion} = F_{tb} > 0$$

La variation de la force de traction brute est en fonction de la structure du sol et le poids appliqué sur la roue motrice. En fait, l'effet de la structure du sol en relation avec le poids appliqué produit une contrainte tangentielle t appelé résistance au cisaillement du sol (Figure 34).



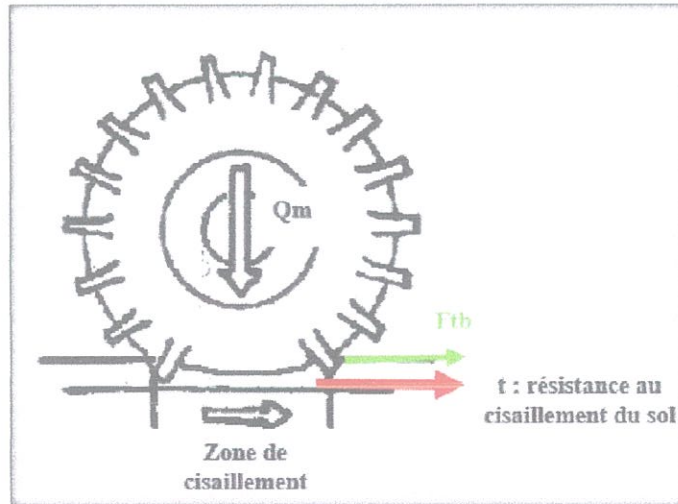


Figure 34. Force de résistance au cisaillement du sol (Beauchamp, 2003)

La résistance au cisaillement du sol peut être déterminé par simulation au laboratoire en utilisant une boîte de cisaillement par translation. Le principe de l'essai consiste à soumettre le sol à une force tangentielle à sa surface (poids) et élaborer le diagramme de la force de cisaillement en fonction du poids appliqué pour déterminer l'angle de frottement (Figure 35).

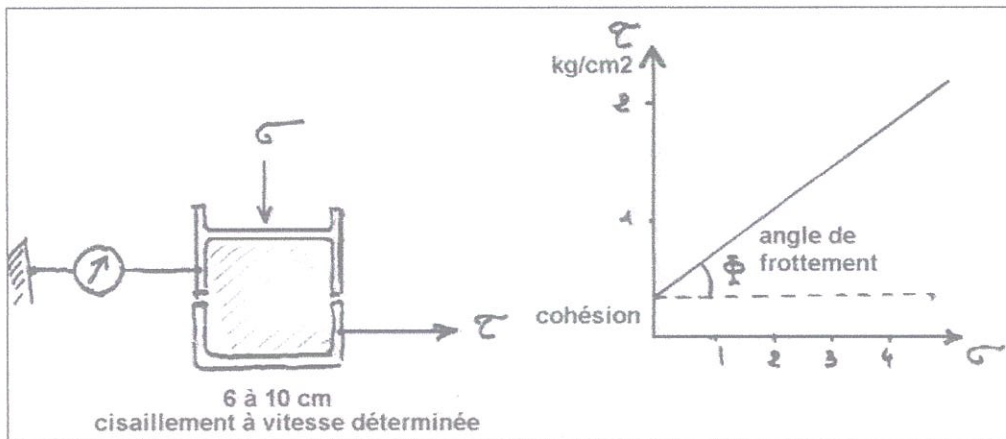


Figure 35. Essais de la résistance au cisaillement du sol (Beauchamp, 2003)

Les essais de laboratoire ne représentent pas la locomotion pneumatique proprement dite mais ce sont des opérations sur le modèle de variation des paramètres mis en jeu. Par conséquent le recours aux essais de terrain par des relations empiriques permet d'expliquer les variations des forces de cisaillement par un coefficient appelé coefficient de traction maximal **Ut max**. De ce fait, la formule de calcul de **Ftb** est donnée par la relation suivante :

$$Ftb = Ut \max Ym \quad (4.20)$$



Avec :

F_{tb} (dN): force de traction brute

Y_m (dN): charge appliquée aux roues motrices

$U_{t \max}$: coefficient de traction maximale

Dans le cas d'un tracteur 4x4 RM, la formule de F_{tb} est présentée comme suit :

$$F_{tb} = U_{t \max} (Y_m + Y_d) \quad (4.21)$$

Y_d (daN) : charge appliquée aux roues motrices avants (roues directrices).

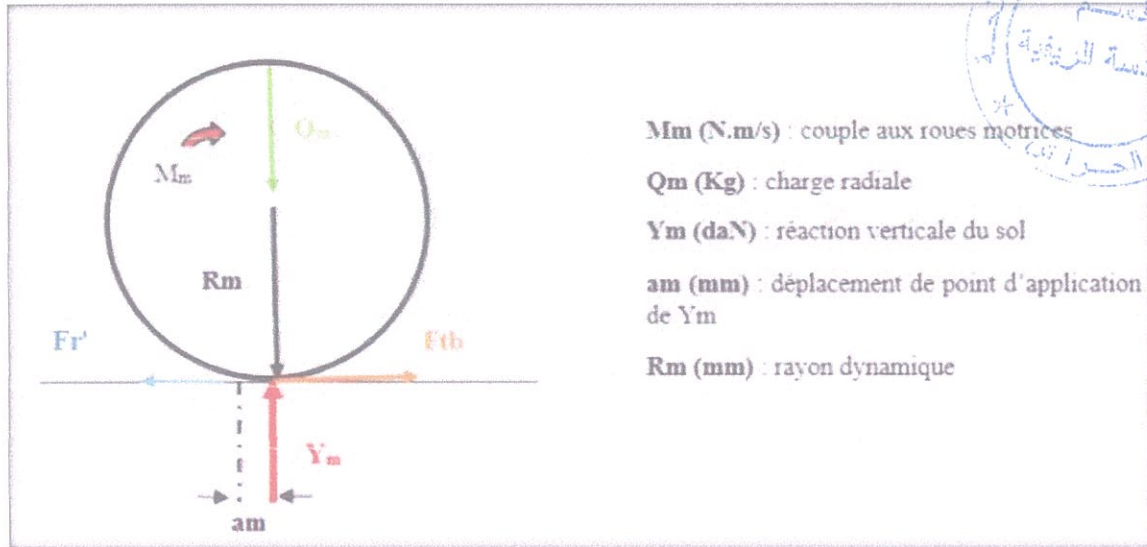
4.3 Dynamique des pneumatiques

Les pneumatiques en déplacement développent la force d'adhérence maximale ou la force de traction brute F_{tb} sous l'effet du couple aux motrices. En pratique, il existe d'autres forces qui se produisent en dynamique des pneumatiques en arrière et en avant du tracteur. Il existe même des déformations au niveau des pneumatiques en contact avec le sol.

4.4 Forces agissantes sur les roues motrices

En déplacement à une vitesse constante, comme il a été constaté précédemment, sous l'effet d'une partie de poids de tracteur Q_m , une réaction verticale du sol Y_m se produit. En parallèle, sous l'effet d'un couple aux roues motrices M_m transmis du couple moteur une force de traction brute se produit F_{tb} . Par ailleurs, lorsque le pneumatique se déplace, le point d'application de la réaction verticale du sol se déplace vers l'avant par une distance a_m . Ce déplacement est lié à la pression de gonflage ainsi que la structure du sol en fonction de la charge appliquée. De même, le sol développe une force opposée à F_{tb} appelée la force de résistance au roulement F_r' (Figure 36).





- M_m (N.m/s) : couple aux roues motrices
- Q_m (Kg) : charge radiale
- Y_m (daN) : réaction verticale du sol
- a_m (mm) : déplacement de point d'application de Y_m
- R_m (mm) : rayon dynamique

Figure 36. Forces agissantes sur la roue motrice

Le couple aux roues motrices M_m fournis par le moteur produit la force F_{tb} , calculée par la formule suivante:

$$M_m = F_{tb} R_m \quad (4.22)$$

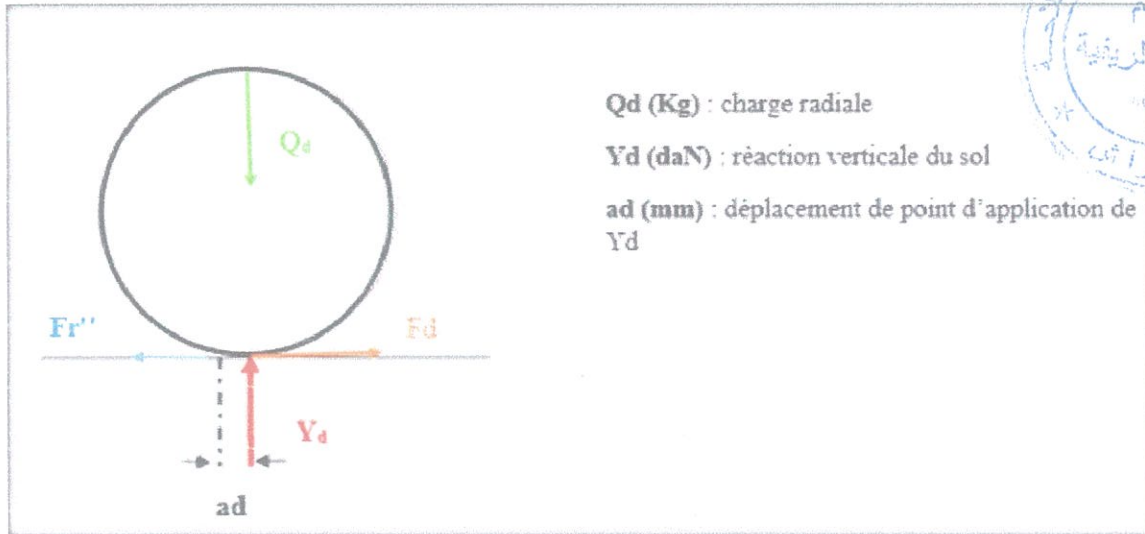
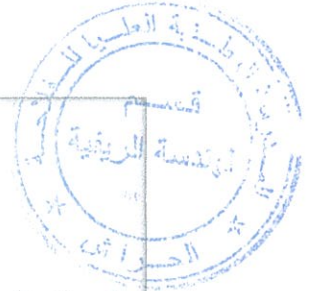
Et d'après l'équation (4.16)

$$F_{tb} = \frac{M_{e\ tr} \eta_{tr}}{R_m} \quad (4.23)$$

4.5 Forces agissantes sur les roues directrices

Les roues directrices que ce soit pour un tracteur 4R ou 4x2R, elles reçoivent le mouvement des roues motrices arrières. Une partie de F_{tb} se produit à l'avant et est appelée force de poussé F_d . En revanche, sous l'effet de l'adhérence et les frottements une force de résistance aux roulement F_r'' se produit également en avant du tracteur. De ce fait, les forces agissantes sont mentionnées dans la figure 37.





Qd (Kg) : charge radiale
Yd (daN) : réaction verticale du sol
ad (mm) : déplacement de point d'application de Yd

Figure 37. Forces agissantes sur la roue directrice

4.6 Equations d'équilibre

4.6.1 Roue motrice

En relation avec la figure 36 :

$$\sum Fy = 0$$

$$\sum Fy = Qm - Ym = 0$$

$$\sum Fx = 0$$

$$\sum Fx = Ftb - Fr' = 0$$

$$\sum Mo2 = Mm - FtbRm - Ym am + Fr'Rm + Qm am = 0$$

Selon l'équation (4.22) :

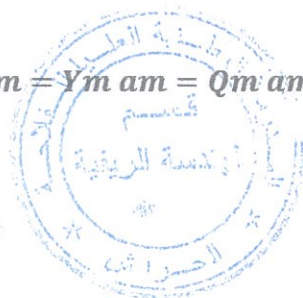
A l'équilibre :

$$Fr' Rm = Ym am = Qm am \tag{4.25}$$

4.6.2 Roue directrice

En relation avec la figure 37 :

$$\sum Fy = Qd - Yd = 0$$





$$\sum F_x = F_d - Fr'' = 0$$

$$\sum Mo_1 = -F_d R_d - Y_d ad + Fr'' R_d + Q_d ad = 0$$

A l'équilibre :

$$Fr'' R_d = Y_d ad = Q_d ad \quad (4.26)$$

4.6.3 Coefficient de résistance au roulement

En relation avec les équations d'équilibre (4.25 et 4.26) :

$$\frac{Fr'}{Q_m} = \left(\frac{am}{R_m} \right) \approx f_m$$

Donc : $Fr' = f_m Q_m \quad (4.27)$

Et

$$\frac{Fr''}{Q_d} = \left(\frac{ad}{R_d} \right) \approx f_d$$

Donc : $Fr'' = f_d Q_d \quad (4.28)$

D'après les relations (4.27) et (4.28) :

$$Fr' + Fr'' = f_m Q_m + f_d Q_d \quad f_m \approx f_d$$

$f_m \approx f_d = f$: coefficient de résistance au roulement.

Le coefficient de résistance au roulement varie en fonction de sol.

$$Fr' + Fr'' = f (Q_m + Q_d)$$

Avec : $Q_m + Q_d =$ poids de tracteur

Donc la force de résistance au roulement Fr est donnée par la relation suivante :

$$Fr = f G \quad (4.29)$$

4.6.4 Variation de coefficient de résistance au roulement

Le coefficient de résistance au roulement f varie en fonction de l'état du sol et la pression de gonflage. Par exemple dans un sol labouré, plus la pression de gonflage augmente le coefficient



f augmente. Tandis que sur un sol en béton, plus la pression de gonflage augmente f diminue (Tableau 06).



Tableau 06.

Tableau 6. Variation de coefficient de résistance au roulement en fonction de l'état du sol

Pression de gonflage (Bar)	Coefficient de résistance au roulement	
	Béton	Sol labouré
0.70	0.028	0.18
1.05	0.023	0.21
1.40	0.022	0.22
2.10	0.016	0.22
2.80	0.016	0.23

Le coefficient de résistance au roulement est calculé par la formule suivante :

$$f = 0.796 - \frac{0.92}{M} \quad (4.30)$$

Avec :

M : indice de mobilité

En fait il existe une relation inversement proportionnelle entre f et **M**. Plus que l'indice de mobilité **M** augmente, le coefficient f diminue. La valeur optimale de **M** varie entre 3 et 5 (Figure 38).

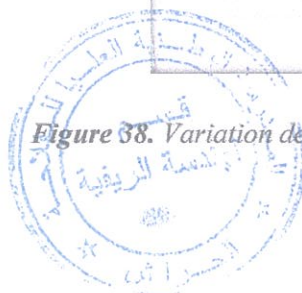
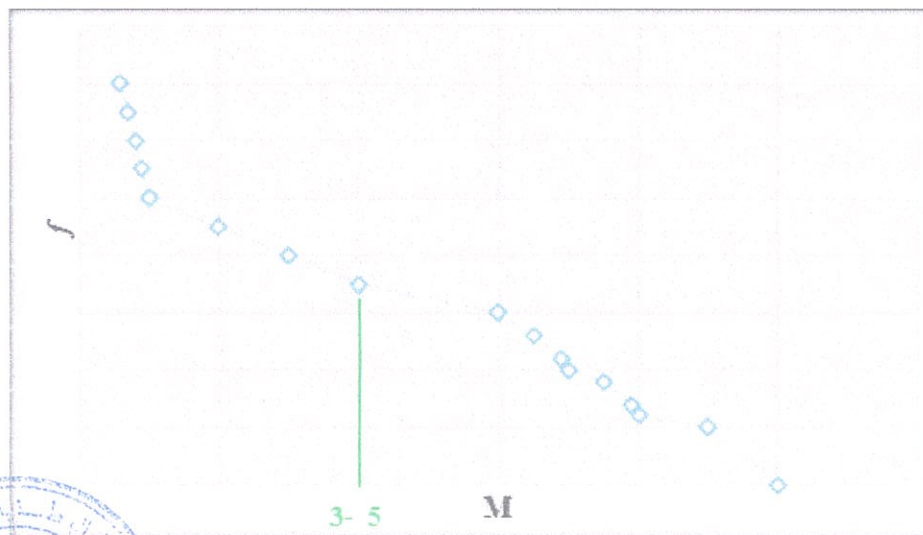


Figure 38. Variation de coefficient de résistance au roulement f en fonction de l'indice de mobilité M



L'indice de mobilité dépend de certains paramètres liés au sol et aux pneumatiques. En fait, M est calculé par la formule suivante :

$$M = \frac{CI b d}{W} \sqrt{\frac{\delta}{h}} \left(1 - \frac{b}{2d}\right) \quad (4.31)$$

Avec :

CI (daN/cm²) : indice de cône ou la résistance à la pénétration du sol

b (m) : largeur de pneu

d (m) : diamètre de pneu

W (Kg) : poids du pneu

H : hauteur de pneu

δ : déformation de pneu ou déflexion.

4.7 Dynamique des pneumatiques en condition de charge

En conditions de charge, le tracteur développe une force de traction F_t . Cette force est liée au poids de l'outil attelé à l'arrière du tracteur. La charge supplémentaire au tracteur est en fonction du poids de ce dernier. En condition de charge, pour un tracteur à 4 roues motrices les réactions verticales du sol sont supérieures au poids total du tracteur. Tandis que pour un tracteur à 2 roues motrices, la réaction verticale à la roue motrice est supérieure à $2/3G$.

Tracteur 4x4 : $Y_m + Y_d > G$ (4.32)

Tracteur 4x2 : $Y_m > 2/3 G$ (4.33)

4.8 Forces agissantes

4.8.1 Force de traction

En présence de la charge, le tracteur développe une force de traction F_t au niveau des barres de traction (Figure 39). Physiquement, F_t rentre dans les équations d'équilibre du système tracteur-outil et est calculée par la formule suivante :

Cas de tracteur à 2 roues motrices

$$F_t = U_t Y_m \quad (4.34)$$

Cas de tracteur à 4 roues motrices

$$F_t = U_t (Y_m + Y_d) \quad (4.35)$$





Avec :

U_t : coefficient de traction

Y_m et Y_d : réactions verticales du sol

4.8.2 Force de traction brute

Force de traction brute ou la force d'adhérence maximale est déterminée par les formules (4.20) et (4.21).

4.8.3 Force de résistance au roulement

Pour la force de résistance au roulement F_r est déterminée par la formule (4.29).

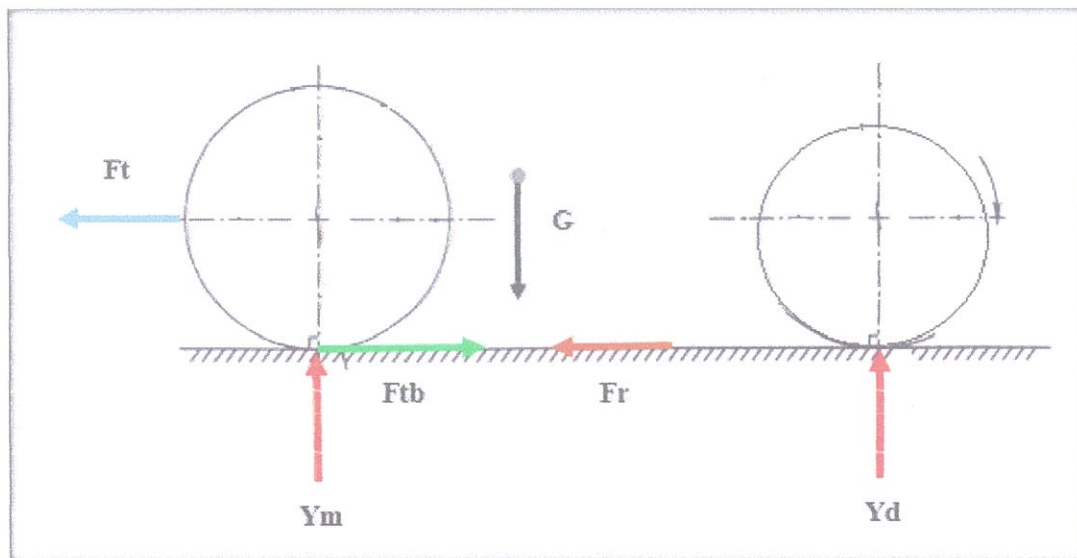


Figure 39. Forces agissantes en condition de charge

4.9 Glissement

En condition de charge, un outil très lourd qui dépasse la capacité de traction du tracteur engendre un glissement important et par conséquent un patinage sur terrain. Le glissement est un des paramètres des performances de traction. Il dépend de poids de l'outil attelé, la vitesse d'avancement et l'état du sol. Des essais expérimentaux sur terrain permettent de donner plusieurs formules de calcul du glissement δ .

4.9.1 Glissement en fonction de la vitesse

En fonction de la vitesse d'avancement du tracteur, le glissement δ peut être déterminé par la formule suivante :



$$\delta (\%) = \frac{V_t + V_r}{V_t} \quad (4.36)$$



En fait, il existe trois cas :

- ✓ Glissement nul : $\delta = 0 \implies V_t = V_r$
- ✓ Glissement partiel : $\delta > 0 \implies V_t > V_r$
- ✓ Glissement total : $\delta = 100\% \implies V_r = 0$

4.9.2 Glissement en fonction du coefficient de traction

Le glissement dépend de la charge attelée par le tracteur. En fait plus la charge augmente, le glissement augmente et le tracteur ne peut pas avancer. De ce fait, la vitesse d'avancement diminue. Le glissement peut être calculé par la formule suivante :

$$\delta (\%) = \frac{0.246 Ut}{1-3.06Ut^3} \quad (4.37)$$

Avec :

δ : glissement (%)

Ut : coefficient de traction

A travers les essais expérimentaux de traction, le glissement optimal varie entre 12-15% avec un coefficient de traction Ut de 0.42 (Figure 40).

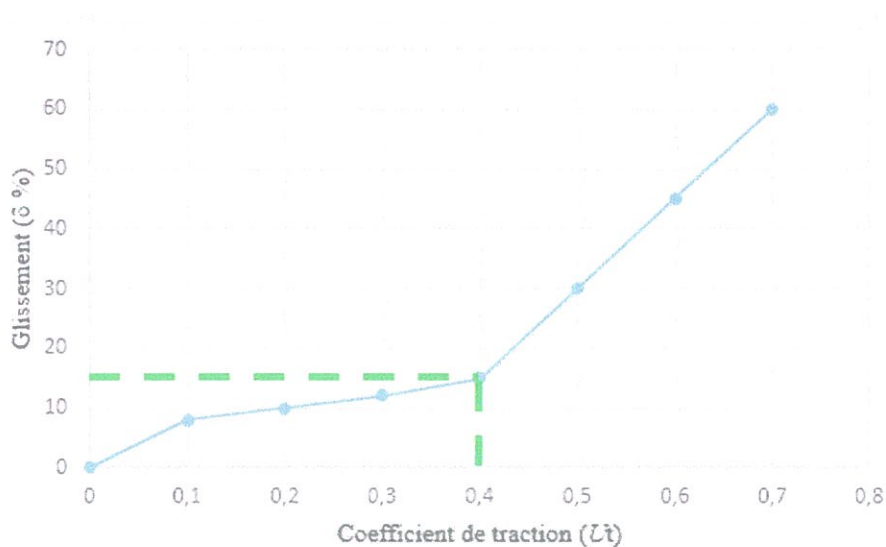


Figure 40. Variation du glissement en fonction du coefficient de traction





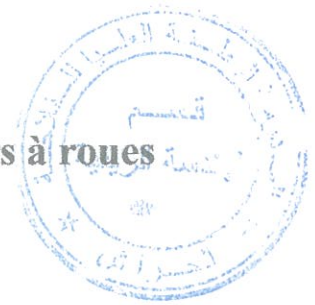
Exercice :

- Soit un tracteur à 4roues motrices de caractéristiques suivantes :

Caractéristiques	CX.100
Puissance nominale	74 kw
Couple effectif max	345 N.m
Régime nominal	2300 tr/min
Régime de surcharge	1600 tr/min
Poids à vide : avant/arrière/total	1380/2280/3660 kg
Poids tracteur alourdi	3960 kg
Empattement	2661

- Déterminer les forces agissantes sur le tracteur avec les formule de calcul.
- Tracer les courbes de variation du coefficient de patinage δ pour le tracteur non alourdi et alourdi en fonction du coefficient de traction μ_t sachant que





Chapitre 5 : Bilan de traction et stabilité des tracteurs à roues

5.1 Introduction

Le tracteur agricole est destiné pour assurer la traction des outils en position de travail ainsi qu'en transport quel que soit la topographie de terrain. Cependant, l'équilibre du tracteur et des outils associés est indispensable afin d'éviter le glissement, le roulement, la compaction des sols et d'atteindre la limite de cabrage. De ce fait, il est important d'étudier la stabilité statique et dynamique du tracteur sur terrain.

5.2 Forces agissantes sur le tracteur « terrain plat »

Le tracteur en position de travail subit plusieurs forces due au sol, aux caractéristiques de l'outils et de même les caractéristiques techniques du tracteur. De ce fait, sur un terrain plat et en position de travail certaines forces sont produites.

5.2.1 Force de résistance au roulement

$$F_r = f (Y_m + Y_d) \quad (5.38)$$

5.2.2 Force d'inertie de translation F_γ

$$F_\gamma = m\gamma \quad (5.39)$$

Avec :

m : masse de tracteur

γ : accélération

5.2.3 Force de résistance de l'air F_a

$$F_a = \pm KAV^2 \quad (5.40)$$

Avec :

K : coefficient aérodynamique

A : surface de contact avec l'air

V : vitesse de l'air



5.2.4 Force de traction Ft

En général, la force de traction est calculé par les formules (4.34) et/ ou (4.35). Dans le cas de travail avec une charrue, la force de traction est calculée par la formule de **Gorjatchkin**.

$$F_t = fG + Kab + \varepsilon abV^2 \quad (5.41)$$

Avec :

Ft : force de traction (N)

f : coefficient de résistance au roulement

G : poids de la charrue (N)

K : coefficient de résistance spécifique du sol (N/m²)

a : profondeur de travail (m)

b : largeur de travail (m)

ε : coefficient de la forme de versoir

V : vitesse d'avancement (m/s)

Pour les charrues actuelles qui sont portées, la force de résistance au roulement est négligée, donc la force de traction est exprimée par la formule suivante :

$$F_t = Kab + \varepsilon abV^2 \quad (5.42)$$

Il existe une autre formule de calcul de la force de traction et est la formule de **Gee Clough**

$$F_t = ab \left(13.30 \gamma a + 3.06 \gamma \frac{v^2}{g} \right) \quad (5.43)$$

Avec :

Ft : force de traction (KN)

a : profondeur de travail (m)

b : largeur de travail (m)

γ : masse volumique du sol (kg/m³)

V : vitesse d'avancement (m/s)





G : gravité (m/s^2)

Ces deux modèles introduisent la profondeur de travail et la largeur du labour, la vitesse d'avancement et les caractéristiques du sol. Pour Gorjatchkin c'est la résistance spécifique du sol par contre Gee Clough introduit la densité apparente du sol. De plus, Gorjatchkin a introduit un paramètre de forme ϵ , des surfaces actives qui est souvent très difficile à déterminer.

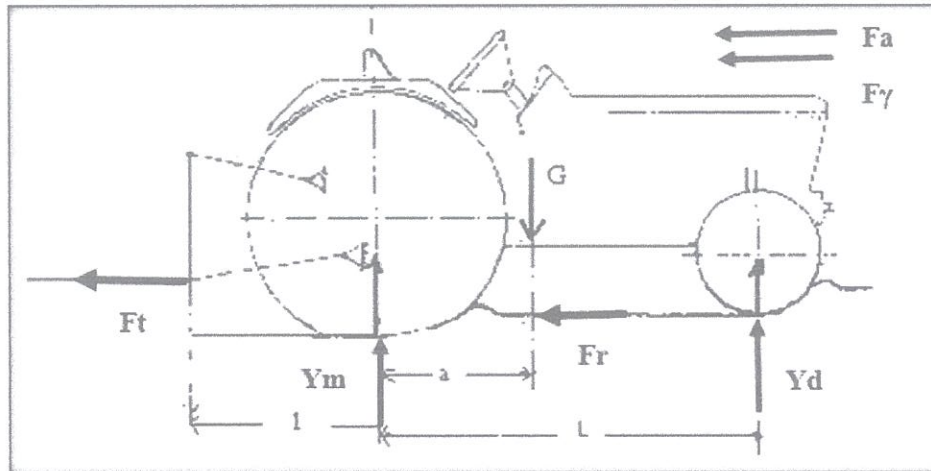


Figure 41. Forces agissantes « terrain plat »

5.3 Forces agissantes sur le tracteur « terrain en pente »

Le risque de cabrage du tracteur en position de travail dans un terrain en pente est très important. De ce fait, il est nécessaire de déterminer l'ensemble des forces agissantes.

5.3.1 Force de résistance au roulement

$$Fr = f (Ym + Yd)$$

5.2.2 Force due à la pente $F\alpha$

$$F\alpha = G \sin \alpha \quad (5.44)$$

5.2.3 Force d'inertie de translation $F\gamma$

$$F\gamma = m\gamma$$

Avec :

m : masse de tracteur

γ : accélération





5.2.4 Force de résistance de l'air Fa

$$F_a = \pm KAV^2$$

Avec :

K : coefficient aérodynamique

A : surface de contact avec l'air

V : vitesse de l'air

5.2.5 Force de traction Ft

$$F_t = fG + Kab + \varepsilon abV^2 \quad (5.41)$$

$$F_t = ab \left(13.30 \gamma a + 3.06 \gamma \frac{v^2}{g} \right) \quad (5.43)$$

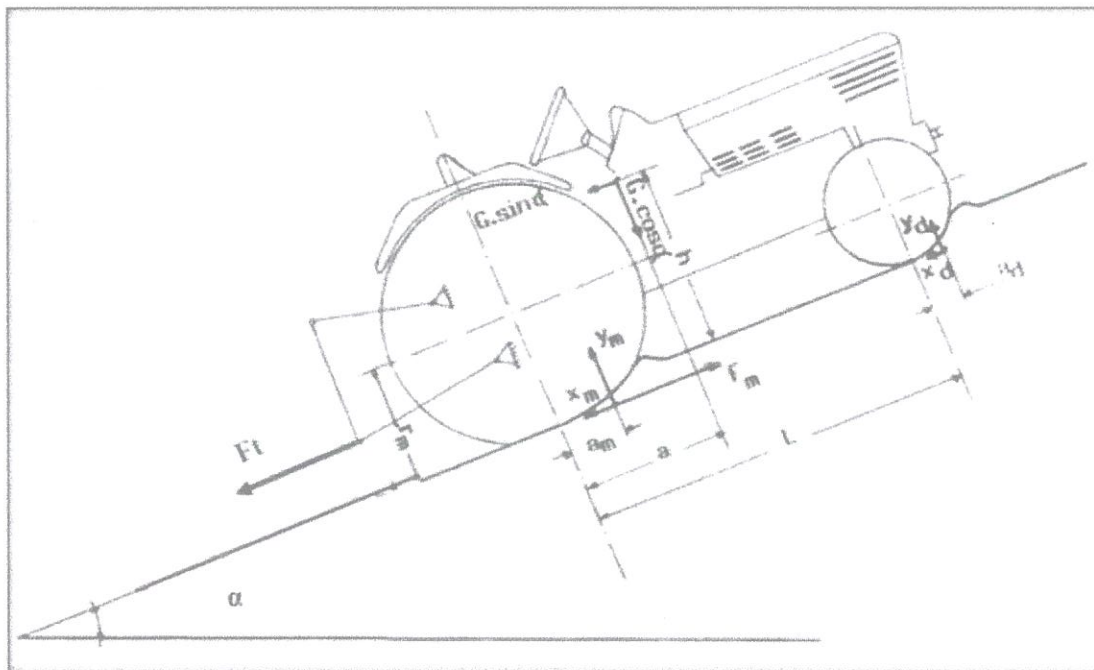


Figure 42. Forces agissantes « terrain en pente »

5.4 Bilan de traction

Pour le travail sur terrain plat, la somme des forces agissantes est :

$$\sum \vec{F}_x = \vec{F}_{tb} + \vec{F}_r + \vec{F}_a + \vec{F}_v + \vec{F}_t$$

Par contre sur un terrain en pente :



$$\sum \vec{F}_x = \vec{F}_{tb} + \vec{F}_r + \vec{F}_a + \vec{F}_\alpha + \vec{F}_\gamma + \vec{F}_t$$

$$\sum F_x = F_{tb} - F_r \pm F_a \pm F_\alpha \pm F_\gamma - F_t$$

En équilibre, $\sum F_x = 0$, donc

$$F_{tb} - F_r \pm F_a \pm F_\gamma - F_t = 0 \quad (\text{Terrain plat})$$

$$F_{tb} - F_r \pm F_a \pm F_\alpha \pm F_\gamma - F_t = 0 \quad (\text{Terrain en pente})$$

En pratique :

Le travail se fait à une vitesse constante, donc : F_a et F_γ sont négligeables. Et dans le cas d'un terrain en pente, le travail se fait selon les courbes de niveau, donc F_α est négligeable.

De ce fait, le bilan de traction est donné par l'équation suivante :

$$\sum F_x = F_{tb} - F_r - F_t \quad (5.45)$$

5.5 Stabilité du tracteur

La stabilité du tracteur sur terrain est en fonction des coordonnées du centre de gravité, l'empattement, la charge ou le poids de l'outil et l'angle de la pente dans le cas d'un terrain en pente.

5.6 Stabilité statique

L'étude de la stabilité statique du tracteur prend en considération, le tracteur à vide en pente. En fait, le tracteur peut être en monté ou en descente.

5.6.1 Etude de la stabilité en monté

La condition générale pour que le tracteur soit stable en monté, est que la réaction verticale du sol sur la roue directrice Y_d (roue avant) soit différent de 0.

Soit un tracteur caractérisé par un poids G , coordonnées de centre de gravité du tracteur : a et h et l'empattement L . Selon la figure (43), Y_d est déterminée par la somme des moments $\sum M_o$.



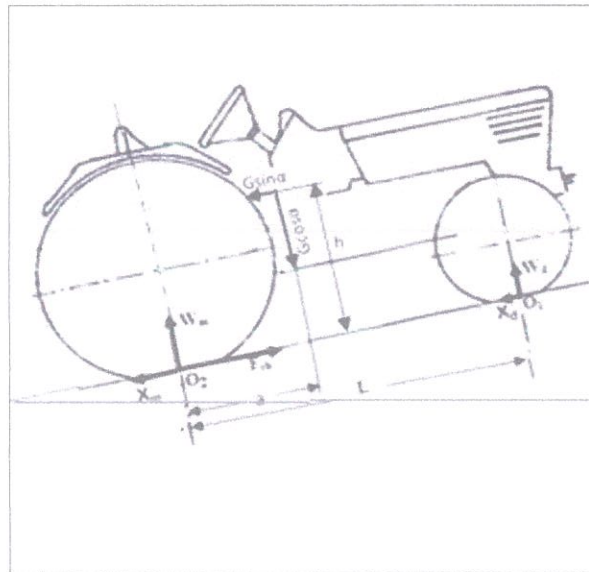


Figure 43. Tracteur en monté

$$\sum M_{O2} = 0$$

$$\sum M_{O2}^Z = G_a \cos \alpha - G_h \sin \alpha - Y_d \cdot L = 0$$

$$Y_d = \frac{G_a \cos \alpha - G_h \sin \alpha}{L} \quad (5.46)$$

En cas de renversement, $Y_d = 0$, de ce fait, il y a un angle critique qu'il ne faut pas le dépasser.

$$\alpha_{critique} = \text{Arc tg } \frac{a}{h} \quad (5.47)$$

5.6.2 Etude de la stabilité en descente

Dans le cas de descente, le tracteur est soumis à une force de poussée sous l'effet de son poids. La condition générale pour que le tracteur soit stable en descente, est que la réaction verticale du sol sur la roue motrice Y_m (roue d'arrière) soit différent de 0.

Soit un tracteur caractérisé par un poids G , coordonnées de centre de gravité du tracteur : a et h et l'empattement L . Selon la figure (44), Y_m est déterminée par la somme des moments $\sum M_{O1}$.



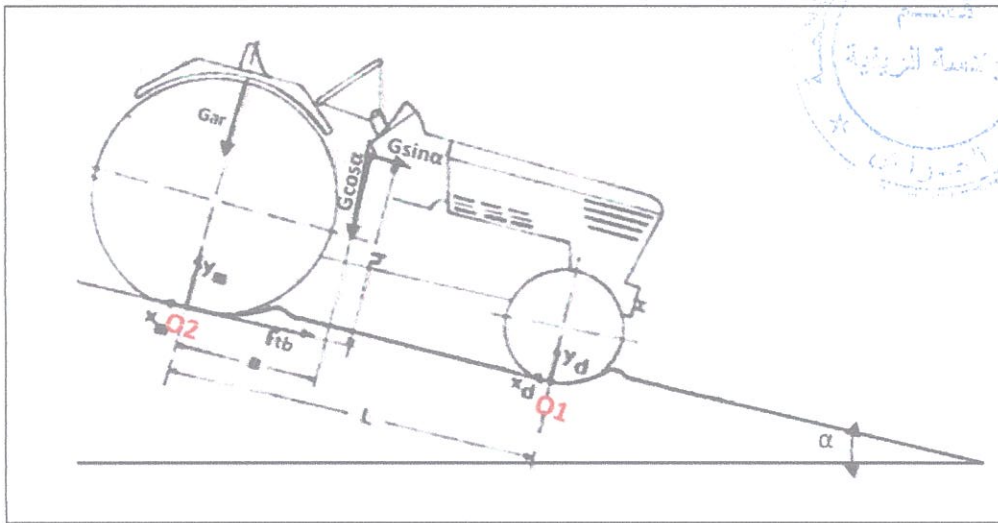


Figure 44. Tracteur en descente

$$\sum Mo1 = 0$$

$$\sum Mo1 = G(L - a) \cos \alpha - Gh \sin \alpha - Ym L = 0$$

$$Ym = \frac{G(L-a) \cos \alpha - Gh \sin \alpha}{L} \quad (5.48)$$

En cas de renversement, $Ym = 0$, de ce fait, il y a un angle critique qu'il ne faut pas le dépasser.

$$\alpha \text{ critique} = \text{Arc tg } \frac{L-a}{h} \quad (5.49)$$

5.7 Stabilité dynamique

L'étude de la stabilité dynamique du tracteur est en relation avec l'attelage d'un outil.

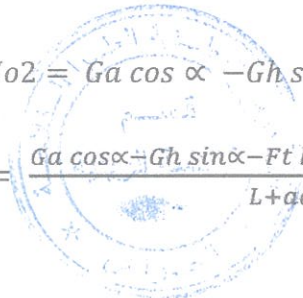
5.7.1 Tracteur-outil semi porté ($\alpha > 0$)

Dans le cas d'un outil semi-porté, une partie de son poids (soit 50%) est supporté par le tracteur. De ce fait, la stabilité du tracteur dépend de la valeur de la réaction verticale au sol par rapport aux roues d'avant (Yd). Selon la figure 45, l'équation des sommes des moments est :

$$\sum Mo2 = 0$$

$$\sum Mo2 = Ga \cos \alpha - Gh \sin \alpha - Ft ht - Ft tgB - Ym am - Yd (L + ad) = 0$$

$$Yd = \frac{Ga \cos \alpha - Gh \sin \alpha - Ft ht - Ft tgB - Ym am}{L + ad} \quad (5.50)$$





Dans le cas d'un outil semi-porté, la pente limite la force de traction. En fait, plus que la pente augmente, la force de traction diminue.

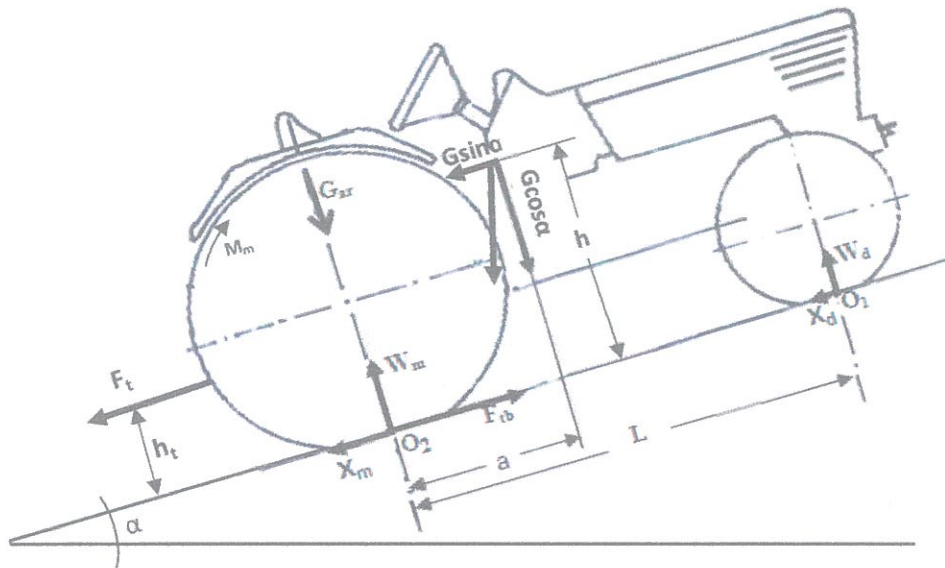


Figure 45. Tracteur- outil semi porté

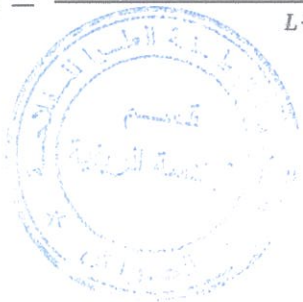
5.7.2 Tracteur- outil porté ($\alpha > 0$)

Dans le cas d'un outil porté, la totalité de son poids est supporté par le tracteur. De même, la stabilité du tracteur dépend de la valeur de la réaction verticale au sol par rapport aux roues d'avant (Yd). Selon la figure 46, l'équation des sommes des moments est :

$$\sum Mo2 = 0$$

$$\sum Mo2 = Ga \cos \alpha - Gh \sin \alpha - Qa \cos \alpha - Qhq \sin \alpha - Ym \cdot am - Yd (L + ad) = 0$$

$$Yd = \frac{Ga \cos \alpha - Gh \sin \alpha - Ym \cdot am - Qa \cos \alpha - Qhq \sin \alpha}{L + ad} \tag{5.51}$$



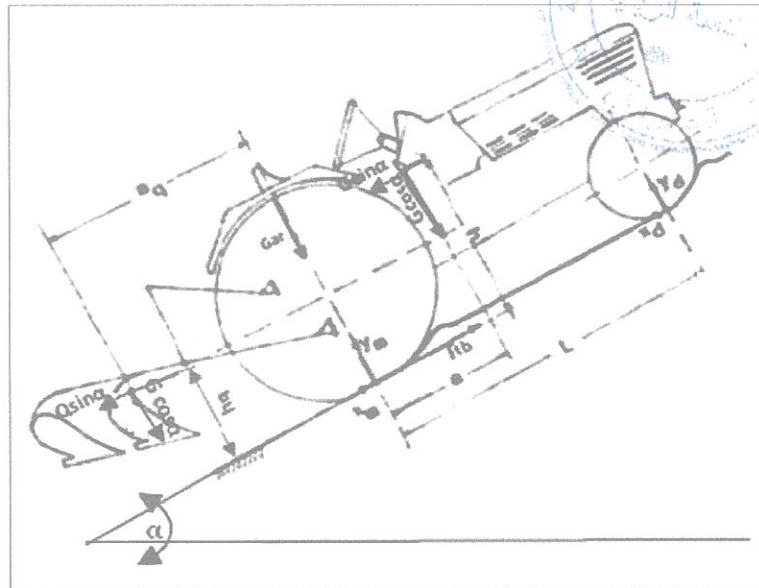


Figure 46. Tracteur-outil porté (cas de la charrue)

5.7.3 Tracteur – outil porté ($\alpha = 0$)

L'étude de la stabilité de l'attelage sur un terrain plat, permet de déterminer la charge limite que le tracteur doit supporter. En fait, sur un terrain plat, l'effet de la pente est éliminé. Selon la figure 47 :

$$\sum Mo2 = 0$$

$$\sum Mo2 = Ga - Q aq - Yd L = 0$$

$$Yd = \frac{Ga - Q aq}{L} \quad (5.52)$$

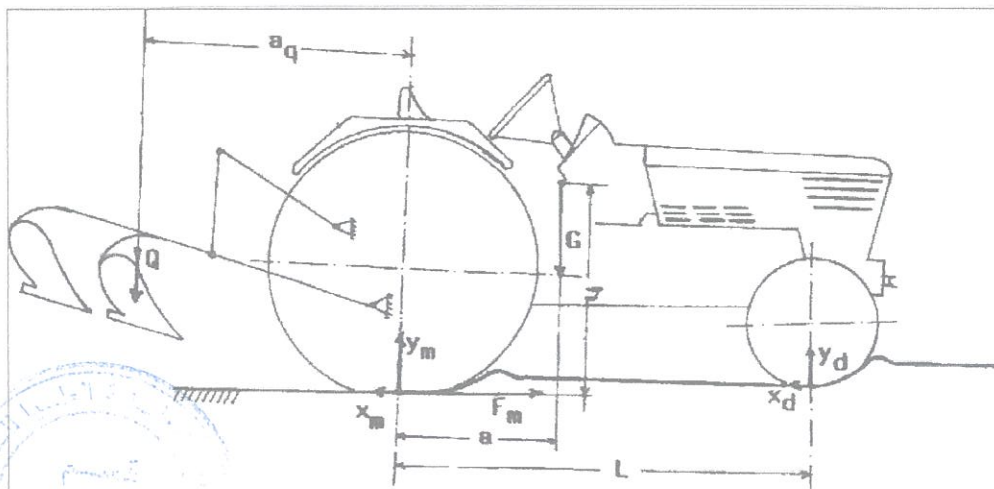


Figure 47. Attelage tracteur-outil porté (cas de la charrue)

Eléments de tracteur

A partir de l'équation (5. 52), une bonne stabilité du tracteur dépend de poids du tracteur lui-même par rapport au poids de l'outil.

$$\text{Bonne stabilité} \implies G a > Q a q$$

D'où on déduit le coefficient de stabilité εq qui assure la stabilité et la manœuvrabilité du tracteur.

$$\varepsilon q = \frac{Q a q}{G a} \quad (5. 53)$$



Chapitre 6 : Performances de traction



6.1 Introduction

La plupart de l'énergie du moteur est perdue au cours de la transformation de l'énergie chimique en énergie mécanique, avec des pertes depuis le moteur au pont moteur et finalement au système de propulsion (roues). En fait, environ 20% à 55% de l'énergie disponible du tracteur est gaspillée à l'interface sol-système de locomotion, ce qui influe sur les performances de traction du tracteur.

6.2 Performances de traction

Un tracteur performant doit :

- ✓ Convertir toute l'énergie du moteur en travail utile, en traction à la barre,
- ✓ Maximiser le rendement thermique du moteur et le pont moteur,
- ✓ Tirer un profit maximal du système de traction,

En pratique, la plupart de l'énergie potentielle du moteur est perdue au cours la transformation de l'énergie chimique en énergie mécanique. De ce fait, il est important de déterminer le bilan de puissance et les paramètres de traction du tracteur pour pouvoir étudier les performances de traction.

6.3 Bilan de puissance

La puissance issue du moteur est partiellement transmise aux organes de locomotion. Cette transmission partielle est liée aux pertes mécaniques causées par la chaîne de transmission, le roulement et le patinage. Les pertes de puissance depuis le moteur jusqu'aux organes de roulement sont exprimées par les équations suivantes :

6.3.1 Puissance perdue à la transmission

$$P_{tr} = P_n (1 - \eta_t) \quad (6.54)$$

6.3.2 Puissance perdue au roulement

$$P_f = F_r V_t \quad (6.55)$$

6.3.3 Puissance perdue au glissement

$$P\delta = Pm \delta \quad (6.56)$$



6.3.4 Puissance de traction

$$Pt = Ft Vr \quad (6.57)$$

A partir des formules (6.54/6.57), la puissance nominale du tracteur est donnée par l'équation suivante :

$$Pn = Ptr + Pf + P\delta + Pt + Pr \quad (6.58)$$

Avec :

Pr est la réserve de puissance.

Cette réserve de puissance constitue le rendement du moteur pour vaincre les forces de frottement au cours de la chaîne de transmission ainsi que les forces extérieures citant : la pente, la force d'inertie et la force due à l'air.

6.4 Les paramètres de traction

Les paramètres de traction sont des indices mesurés et calculés à partir de certains essais de traction sur terrain pour cibler les performances de traction. En fait les performances de traction d'un tracteur sont déterminées par :

- ✓ La force de traction ou le coefficient de traction,
- ✓ La puissance de traction
- ✓ La vitesse réelle,
- ✓ Le glissement,
- ✓ Efficience de traction,
- ✓ Poids spécifique,
- ✓ La consommation horaire.

6.4.1 Force de traction et coefficient de traction

Ces deux paramètres sont liés et dépendent des caractéristiques techniques du tracteur. La force de traction est la force que le tracteur peut développer pour tirer les outils dans des conditions optimales. La force de traction optimale est différente de la force de traction brute et la force de

traction nette. Par ailleurs, le coefficient de traction correspond à une valeur optimale qui ne dépasse pas 0.42.

$$Ft_{opt} = Ut_{opt} (Ym + Yd) \quad (6.59)$$

6.4.2 Puissance de traction

La puissance développée en traction est le résultat obtenu à partir de la force de traction et la vitesse de travail du tracteur, elle est donnée par la formule (6.57).

6.4.3 Vitesse réelle

La vitesse réelle est celle qui s'affiche sur le compteur de vitesse du tracteur. Généralement la vitesse réelle est moins faible que la vitesse théorique vu les conditions de terrain et le poids tracté.

6.4.4 Glissement

Le glissement se produit au niveau des roues et est due aux forces de résistance au roulement et la charge importante. Le glissement exprimé en % et est calculé par les formules 4.36 et 4.37 (chapitre 4).

6.4.5 Efficience de traction η_t

L'efficience de traction ou le rendement de traction est un paramètre calculé à partir de la formule suivante :

$$\eta_t = \frac{Pt}{Pm} \quad (6.60)$$

Avec :

Pt : puissance de traction

Pm : puissance aux roues motrices

L'efficience de traction varie en fonction du glissement, le coefficient de traction et le coefficient de résistance au roulement, et est donné par la formule suivante :

$$\eta_t = Ut \frac{1-\delta}{Ut+f} \quad (6.61)$$

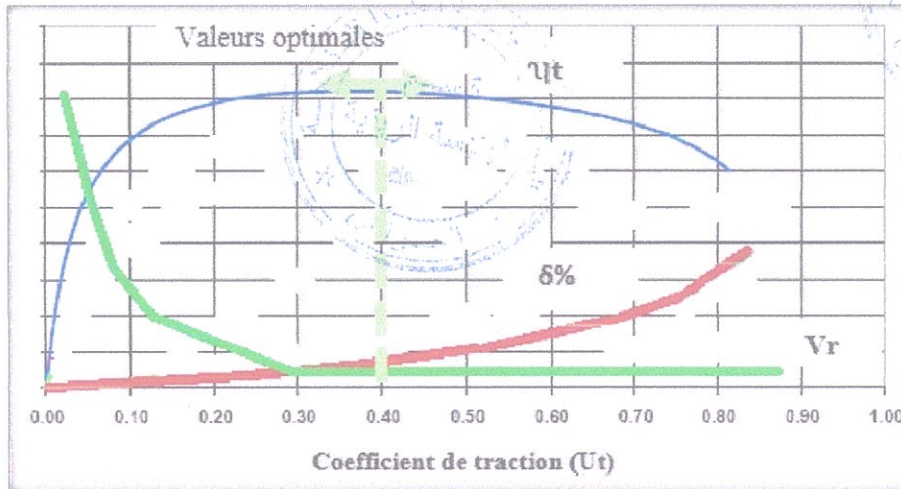


Figure 48. Variation de l'efficacité de traction, le glissement et la vitesse réelle en fonction du coefficient de traction

En fait, plus que la force de traction augmente, le glissement augmente et l'efficacité de traction avec la vitesse réelle diminuent.

6.4.6 Poids spécifique d'exploitation

Le poids spécifique d'exploitation G_s est déterminé par la formule suivante :

$$G_s = \frac{\text{Poids au roues motrices}}{\text{Puissance au roues motrices}} \text{ (Kg/Kw)} \quad (6.62)$$

A vide: $50 \text{ kg/kw} > G_s > 60 \text{ kg/kw}$

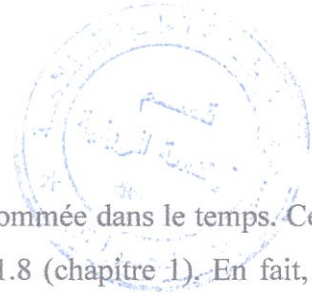
En charge : $80 \text{ kg/kw} > G_s > 100 \text{ kg/kw}$

Par construction, le tracteur est caractérisé par :

- ✓ Le poids constructif G_c : est le poids du tracteur sans huile sans carburant et sans masses d'alourdissement.
- ✓ Le poids d'exploitation G_e : est le G_c avec lubrifiant, carburant et masses d'alourdissement.
- ✓ Le poids spécifique constructif G_x : c'est un poids calculé à partir du poids constructif et la puissance nominale du moteur.

$$G_x = \frac{G_c}{P_n} \text{ (Kg/Kw)} \quad (6.63)$$

En terme de performance de traction, le G_s est le poids le plus explicatif.



6.4.7 Consommation horaire

La consommation horaire correspond à la quantité du gasoil consommée dans le temps. Cette caractéristique propre du moteur est déterminée par la formule 1.8 (chapitre 1). En fait, un tracteur performant consomme moins de gasoil en plein champs dans les conditions optimales.

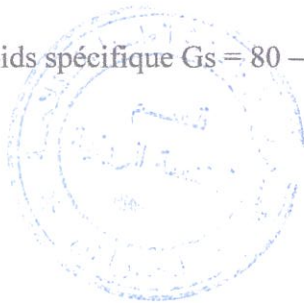
6.5 Etude des performances de traction

L'étude des performances de traction a deux principaux objectifs :

- ✓ Utilisation optimale du tracteur en relation avec les machines et le sol. C'est-à-dire choisir les caractéristiques de la machine pour déterminer la force de traction. En fait, la force de traction d'un outil varie en fonction de la profondeur de travail, la largeur de travail, le type des pièces travaillantes et le système d'attelage.
- ✓ Utilisation optimale de tracteur en fonction des caractéristiques techniques du moteur. C'est-à-dire, il faut déterminer la puissance effective, le couple effectif, la consommation horaire et spécifique en fonction des trois (03) régimes du moteur.
- ✓ Utilisation optimale des pneumatiques avec le bon choix de type de pneumatique, la pression de gonflage ainsi que le poids de lestage.

En conclusion, il faut déterminer les paramètres de traction en fonction des paramètres du moteur en respectant des intervalles bien précis (Figure 49) :

- Coefficient de traction optimal $U_t = 0.4 - 0.42$
- Glissement $\delta\% = 10\% - 15\%$
- Poids spécifique $G_s = 80 - 100 \text{ kg/Kw}$



Eléments de tracteur

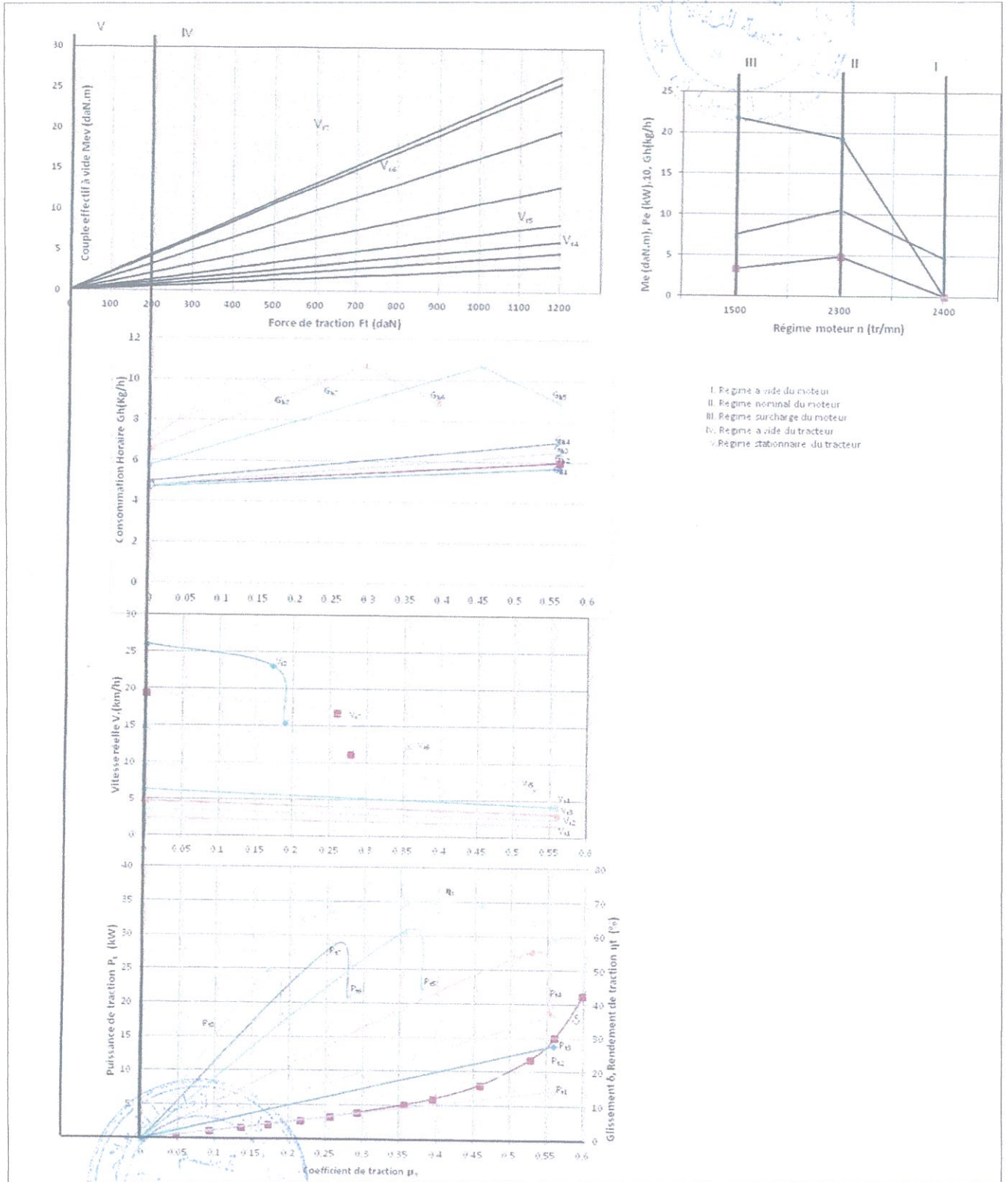


Figure 49. Nomogramme de performance de traction

Liste des références

- Beauchamp Jacques, 2003. Mécanique des roches et des sols. (<https://www.u-picardie.fr/beauchamp/eadaa/mecasol.htm>).
- Karl Theodor Renius. 2019. Fundamentals of tractor design. Springer. P : 297.
- Les liaison tracteurs- outils. Ouvrage collectif. Educagri éditions, 2006. P : 74.
- Persoons E., Johnson D., Raucent B. 1996. Machines agricoles : Etude technique du tracteur agricole. Faculté des Sciences Agronomiques, Université Catholique de Louvain. P : 108.
- Ranjbarian S, Askari M, Jannatkah J. 2017. Performance of tractor and tillage implements in clay soil. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences 16(2):154-162.
- Willy de Krem. 2012. Tracteurs : comprendre, choisir, entretenir. Machinisme et équipements. Edition France Agricole. P : 342.

