PIROT R., PERRET S., MANICHON H. (éds.), 1997.
Le travail du sol dans les systèmes mécanisés tropicaux.
Actes du colloque, 11-12 septembre 1996, Montpellier, France.
Montpellier, France, Cirad-Sar, collection Colloques, 160 p.

Mesures de performances des équipements agricoles au champ

Roland PIROT
Cirad-Sar, Unité géographie, agronomie et mécanisation,
73 rue J. F. Breton, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

Résumé : Dans le contexte économique actuellement difficile, les entreprises agricoles doivent être de plus en plus performantes et leurs responsables doivent prendre des décisions dans des situations délicates. En ce qui concerne l'utilisation de matériels agricoles, la possibilité de réduction des coûts concerne principalement trois postes : l'investissement initial et son maintient en état de marche ; la performance des matériels (consommation en carburant, puissance nécessaire...) ; la performance des chantiers (temps de travaux, qualité du travail...). Pour choisir en connaissance de cause, l'agriculteur va mettre en œuvre une méthode de réflexion qui lui permet de raisonner ses choix. Il doit disposer de références techniques pour alimenter cette réflexion. En simplifiant, pour l'utilisation des matériels agricoles, ces références techniques sont la façon d'utiliser la puissance en fonction des conditions d'interventions. Le Cirad-Sar a mis au point certains appareillages qui permettent de mesurer en grandeur réelle, les performances des matériels et des chantiers agricoles. Ils sont utilisés pour analyser l'utilisation de la puissance délivrée par le tracteur pour en évaluer les pertes. Cette chaîne de mesure peut chiffrer : la consommation en carburant, et donc la puissance développée ; le glissement (interface sol-tracteur) ; la vitesse réelle de travail ; l'effort de traction nécessaire pour tirer l'outil ; la profondeur de travail. Ces paramètres, associés à d'autres critères de décision, permettront d'aider au choix et à la gestion des équipements agricoles

Un objectif : diminuer les charges de mécanisation

Aujourd'hui les agriculteurs doivent prendre des décisions dans des conditions de production difficile. Les coûts sont élevés et le marché s'internationalise ce qui entraîne une concurrence importante. Si ceci est vrai pour les pays européens ou américains, il l'est d'autant plus pour les pays en voie de développement et principalement l'Afrique traditionnelle. L'Afrique vient, en plus, de subir une dévaluation dans un contexte de pauvreté technologique qui l'oblige à importer une grosse partie des équipements de production.

Pour les agriculteurs de certaines zones de production motorisée, l'un des objectifs prioritaire est donc de réduire les charges avec une contrainte supplémentaire qu'est la protection de l'environnement (principalement protection des sols). Parmi ces charges, les charges liées à la mécanisation prennent une part importante, il est donc judicieux de se pencher sur leur structure. Pour illustrer ce propos, ces charges de mécanisation sont estimées à 25 % des coûts de production pour une région de grande culture en France. En comparaison, au Sénégal, en riziculture irriguée, les charges de mécanisation représentent 33 % des charges totales et ne concernent, de plus, que la préparation du sol et la récolte.

Si l'on regarde les coûts d'un chantier de travail du sol (tableau I), on se rend compte que trois postes sont particulièrement élevés. Il s'agit :

- de l'intérêt du capital et des amortissements ;
- de la dépense en carburant ;
- des charges d'entretien et de réparation.

L'importance du premier poste montre l'attention particulière à apporter au choix des équipements qui, de nos jours, ne sont plus subventionnés. La hauteur de ce poste est fonction de trois éléments : l'intérêt du capital, le niveau d'investissement, le temps de fonctionnement annuel.

L'intérêt du capital est un paramètre peu modifiable, il est fonction de la situation politico-économique. L'équipement, dans ces régions d'Afrique, ne peut plus être individuel, il est, soit collectif (association de paysans), soit la propriété d'une entreprise de travaux agricoles. Le choix du niveau de puissance se raisonnera plus en termes de capacités des matériels plutôt que de surface à travailler. Il s'agira donc de choisir d'une part le niveau de puissance du tracteur nécessaire et suffisant et d'autre part des outils adaptés au niveau de puissance du tracteur. D'une façon assez globale, le prix d'une cellule motrice est directement lié à son niveau de puissance. Quant au temps de fonctionnement annuel, les charges horaires sont inversement proportionnelles au temps d'utilisation annuel.

La dépense énergétique peut aussi être maîtrisée : elle est liée à trois principaux facteurs :

- le mode de conduite du chauffeur : le choix du rapport de vitesse, celui du régime moteur, l'adéquation entre l'outil et la cellule motrice sont autant de facteurs qui vont influer sur la consommation ;
- les temps de travaux et la période d'intervention : l'utilisation d'outil combinés peut réduire la dépense ; le choix judicieux d'un outil peut limiter le nombre de passages, et faciliter l'intervention à un moment plus propice ;
- la qualité du réglage et de l'entretien des matériels : le mauvais réglage ou entretien entraîne une demande énergétique supérieure : un soc de charrue mal affûté peut demander 20 % de puissance nécessaire en plus.

L'importance des charges d'entretien et de réparations est moindre que les deux précédentes dans des conditions normales d'utilisation. Cependant, dans les conditions difficiles que sont celles des Ped, ces charges peuvent augmenter de façon importante par manque de connaissances techniques. Une bonne formation de base pourrait pourtant facilement pallier ce type de problème.

En fait, bien maîtriser ses dépenses de mécanisation équivaut en grande partie à bien choisir son niveau de puissance et à bien utiliser la puissance disponible. D'où l'intérêt de connaître les dépenses énergétiques des différents matériels et leurs structures (puissance utile, pertes) en fonction des conditions d'intervention et des résultats que l'on cherche à obtenir.

Une méthode : connaître la façon d'utiliser la puissance

Rappels

Le tracteur est une source d'énergie destinée à animer un outil et malheureusement, comme dans tout transformateur d'énergie, il y a des pertes. Aujourd'hui, les cellules motrices sont de plus en plus souvent équipées de systèmes permettant de mesurer les paramètres influant sur les performances, et de là minimiser les pertes, mais ils sont peu utilisés.

L'énergie est dissipée de deux façons : de façon utile, c'est-à-dire qui permet de réaliser le travail et de façon « inutile », qui correspond à des pertes qu'il faut minimiser.

La puissance disponible

La puissance est fournie par le carburant transformé en énergie mécanique dans le moteur. Déjà à ce niveau, les 2/3 de l'énergie contenue dans les carbu-

Tableau I. Coûts d'un chantier de travail du sol (Havard 1996).

Détails des charges		Montant en FF/h		
		Tracteur	Cover crop	Ensemble
Frais fixes	Intérêt du capital	23,43	3,76	27,28
	Assurances	P.M.	P.M.	P.M.
	Charges d'abri	P.M.	P.M.	P.M.
	Impôts et taxes	P.M.	P.M.	P.M.
Frais variables	Amortissement	41,67	10,00	51,67
	Entretien et réparations	20,83	5,00	25,83
	Carburant	60,00	0	60,00
	Lubrifiant	19,80	0	19,80
	Salaires	12,5	0	12,5
Frais généraux		0		0
Prix de revient horaire en FF		169,23	18,75	188,08

rants sont perdus, le 1/3 restant est utilisable suivant trois formes (figure 1) :

- à la prise de force, la liaison moteur-prise de force est presque directe, la quasi-totalité de la puissance moteur est alors disponible ;
- à la barre, le transfert de la puissance se fait par la boîte de vitesse jusqu'aux roues ;
- aux prises hydrauliques, le moteur du tracteur entraîne une pompe à huile. L'énergie est disponible aux prises hydrauliques.

Les pertes

A chacune de ces différentes formes correspondent des pertes plus ou moins importantes :

- entre le moteur et la prise de force : pertes dans les transmissions (assez faibles) ;
- entre le moteur et les roues (ou essieu) : pertes dans les transmissions (assez faibles) ;
- entre les roues et le sol : pertes par glissement et roulement (quelquefois importantes) ;

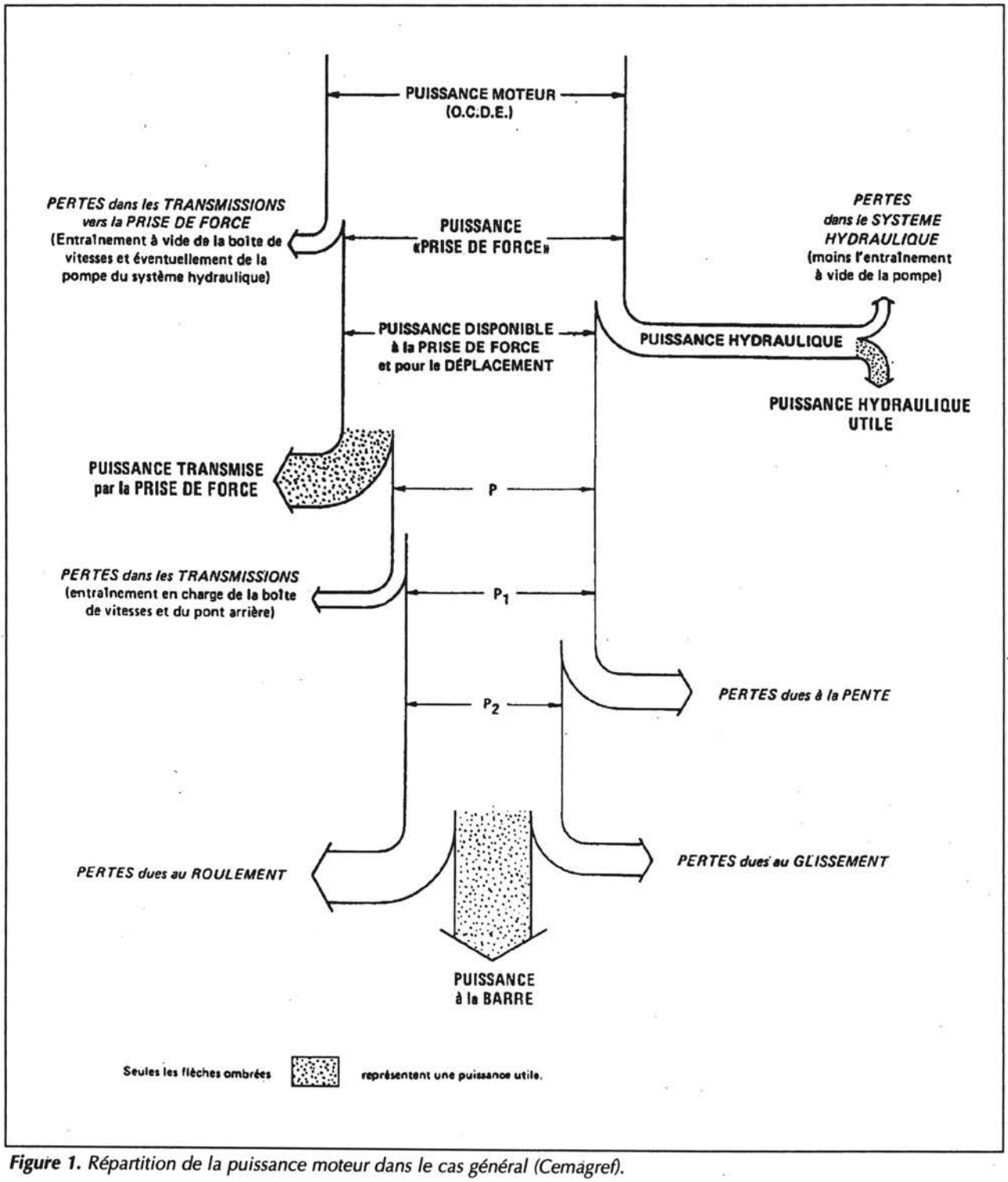

Figure 1. *Répartition de la puissance moteur dans le cas général (Cemagref).*

- dans les circuits hydrauliques : pertes par écoulement de l'huile ;
- pertes exogènes : pertes dues à la pente.

Certaines seront relativement constantes (pertes dans les transmissions), d'autres seront fonction des conditions extérieures (pertes par glissement, par roulement et dues à la pente).

Les économies possibles

Elles sont fonction du type de préoccupation. Du point de vue du tractoriste, il s'agira d'une recherche particulière de l'optimum mécanique par :

- l'entretien du tracteur et de ses outils (important en Ped) ;
- l'adaptation et le réglage des outils (choix de la dimension des outils...) ;
- l'utilisation correcte de l'ensemble tracteur-outil : choix du rapport de boite, du niveau de charge et du régime du moteur, des conditions d'intervention...

L'agronome procédera à un choix des façons culturales donc des outils (choix qualitatif). La préoccupation du gestionnaire sera d'organiser efficacement les chantiers.

Dans ce document, nous ne traiterons que du premier type de préoccupation et c'est dans cette optique qu'un équipement métrologique embarqué a été mis au point.

Un équipement pour mesurer les performances des matériels aux champs

Il s'agit de composants qui sont installés sur le tracteur ou les outils agricoles et qui vont permettre l'enregistrement de certains paramètres caractéristiques.

Cet équipement (figure 2) est constitué de :

- une série de capteurs qui vont quantifier des paramètres physiques en une grandeur électrique ;
- une centrale d'acquisition de données qui gère l'acquisition, effectue éventuellement un premier traitement et stocke les résultats ;
- un système de liaison entre les capteurs et la centrale ;
- un système de liaison avec l'ordinateur pour le transfert des programmes ou des données.

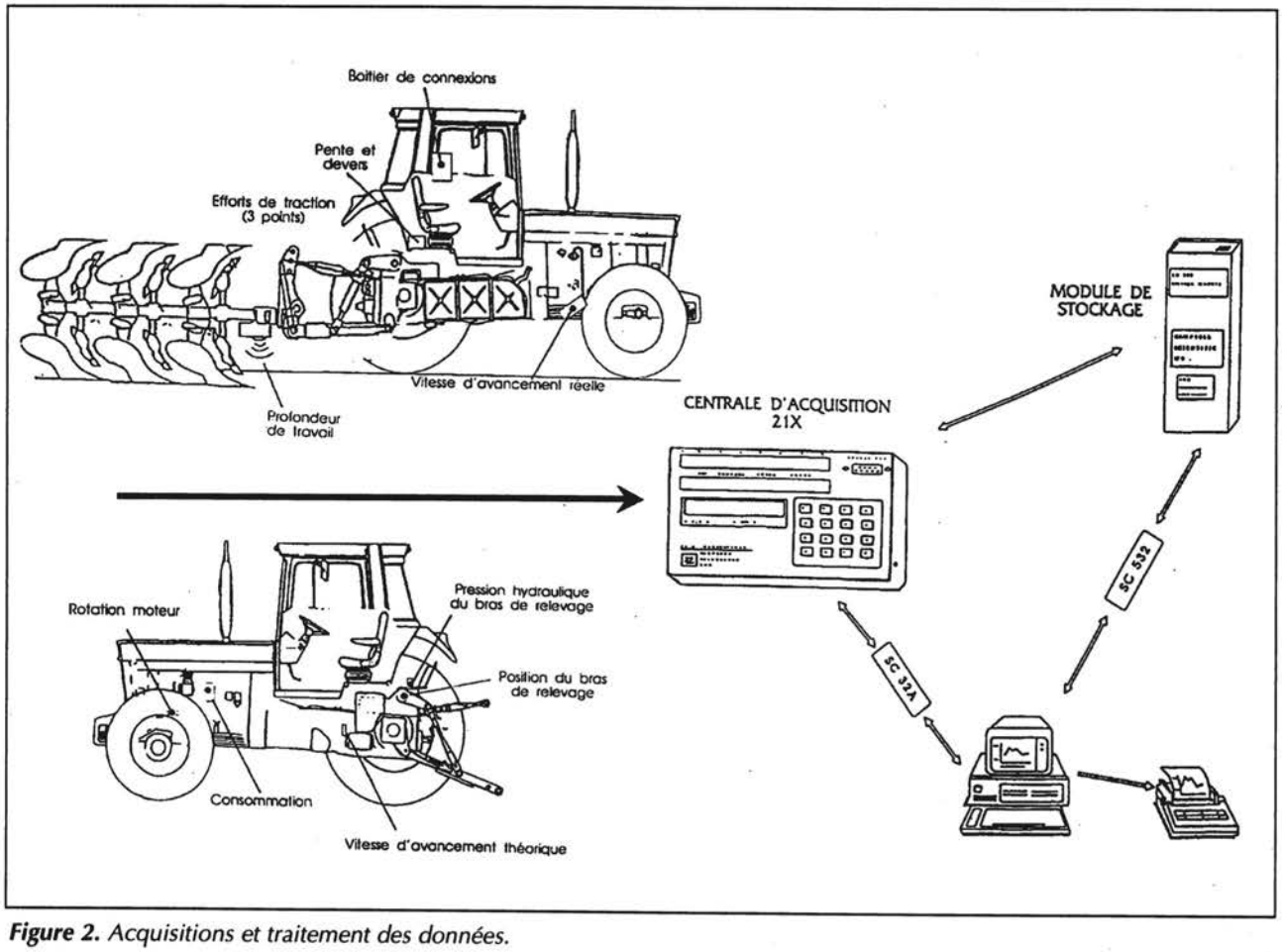

Figure 2. *Acquisitions et traitement des données.*

Les capteurs

Les capteurs (tableau II) transforment les grandeurs physiques (exemple : rotation, vitesse...) en une grandeur électrique. Pour la plupart, originaires de l'industrie, ils sont de trois types dont deux couramment utilisés[1] : les capteurs analogiques et les capteurs logiques.

Dans les capteurs analogiques, la grandeur électrique est fonction de la grandeur physique (généralement proportionnelle), exemple le thermocouple. Dans les capteurs logiques, la grandeur physique est transformée en une série d'impulsions en fonction du temps, on les appelle aussi compteur : exemple le compte-tours.

La centrale d'acquisition

Les capteurs sont connectés à la centrale d'acquisition qui, par l'intermédiaire d'un programme, va gérer la lecture des mesures des différents capteurs et les stocker.

Après différents essais, notre choix s'est porté sur le modèle 21X ou Cr10 de Campbell scientific qui a les qualités suivantes :

- matériel portable ;
- alimenté par batteries ;
- entrées logiques, analogiques (et numériques avec programmation) ;
- pré-traitement interne possible ;
- temps de scrutation de 0,0125 s à 1,8 h ;
- allocations mémoire : 20 000 pour le 21X, 30 000 pour le Cr10 ;
- affichage digital des lectures en temps réel ;
- communication avec micro-ordinateur par interface et programme spécifique ;
- programmation directe par clavier intégré ou par logiciel.

Les enregistrements sont effectués de façon autonome, les données sont stockées dans la mémoire de la centrale d'acquisition. Les essais terminés, elle est connectée à un ordinateur et les enregistrements sont transférés sous forme de fichiers lisibles sur un tableur.

1. Les capteurs numériques sont peu utilisés, dans ce cas le signal est transformé en codage binaire.

Les données déduites des données enregistrées

Les capteurs mesurent des paramètres physiques simples comme des vitesses de rotation, des températures... De ces mesures, on peut calculer certains paramètres plus élaborés.

La puissance développée

En ce qui concerne les tracteurs agricoles, la puissance développée est déduite de la vitesse de rotation du moteur et de la consommation horaire. Le calcul se fait généralement par voie graphique à partir des courbes de référence à l'aide d'un petit programme informatique ou, quand on dispose d'un logiciel de modélisation, par voie mathématique (figure 3).

Le patinage

Le patinage est déduit à partir de la vitesse réelle (mesurée par le radar) et de la vitesse théorique (vitesse des roues x circonférence de la roue) :

Tableau II. Différents types de capteurs utilisés avec la chaîne de mesure.

Capteurs	Paramètres mesurés	Signal	Précision
Radar	distance réelle	logique	±1 % + E_{ts}
Détecteur de proximité	vitesse des roues	logique	E_{ts}
Détecteur de proximité	régime moteur	logique	E_{ts}
Débitmètre	consommation	logique	±1 % + E_{ts}
Inclinomètre	pente	analogique	±1 %
Barreau dynamométrique	force	analogique	±0,1 %
Capteur ultrasonique	distance au sol	analogique	±1 %
Capteur de pression	pression	analogique	±1 %
Codeur absolu	position angulaire distance (conversion)	analogique	±0,1 %
Potentiomètre	position angulaire	analogique	±1 %
Codeur	outil/chauffeur	numérique	

E_{ts} : erreur due au temps de scrutation.

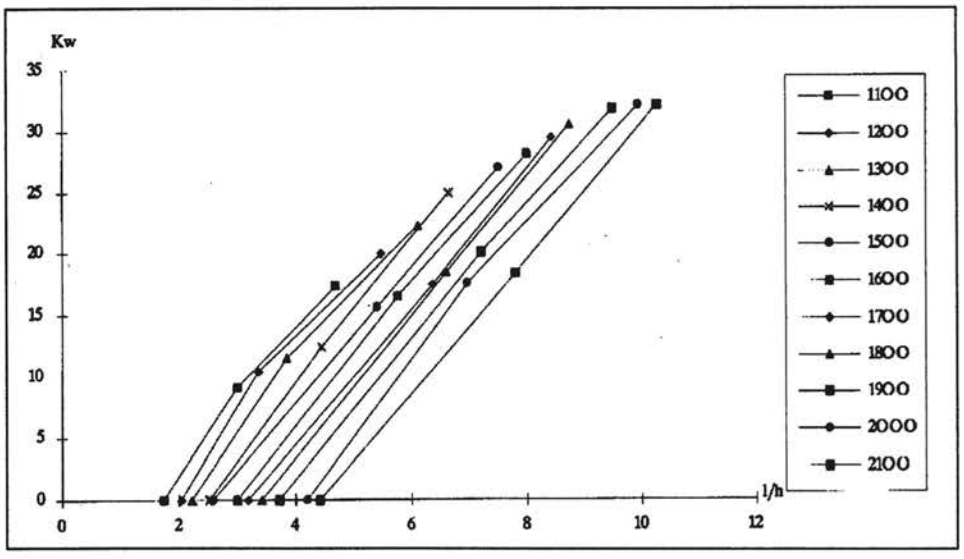

Figure 3. *Puissance en fonction de la consommation par centaines de tour moteur.*

$$patinage = \frac{V_{théorique} - V_{réelle}}{V_{théorique}} \times 100$$

$V_{théorique}$ = vitesse théorique
$V_{réelle}$ = vitesse réelle

Les temps de travaux

L'information sur la position des bras de relevage nous permet de savoir si l'outil travaille ou non (bras de relevage baissés = outil au travail), dans ce cas, on peut calculer la surface horaire travaillée :

$$Surface_{horaire} = \frac{D_{parcourue} \times l_{travail}}{T_{total}} \times 100$$

$D_{parcourue}$ = distance parcourue au travail (mesurée par le radar).

$l_{travail}$ = largeur moyenne de travail.

T_{total} = temps total.

Puissance à la barre

Quand l'effort à la barre n'est pas mesuré, on peut obtenir la puissance à la barre en déduisant les différentes pertes (figure 1).

$$Puissancebarre = (1)PU_{PdF} - (2)Pe_{transm} - (1)Pe_{pat} - (2)Pe_{roul} - (1)Pe_{pente}$$

PU_{PdF} = puissance à la prise de force mesurée au banc dynamométrique.

Pe_{transm} = pertes dans les transmissions.

Pe_{pat} = pertes au patinage.

Pe_{roul} = pertes au roulement, fonction du poids du tracteur et de l'état du sol.

Pe_{pente} = pertes dues à la pente.

(1) mesuré (2) estimé.

Traitement des données

Le volume des données recueillies est généralement important. Il ne fera l'objet d'un traitement spécial, avec un tableur ou un logiciel de statistique, que lorsqu'elles correspondront à un essai spécifique : c'est le cas de l'expérimentation (voir exemple en annexe 1).

Pour des relevés plus répétitifs tels que le suivi des performances, il est préférable de recourir à un programme de dépouillement automatique. Ce programme aura pour avantage le traitement rapide des données mais aussi l'inconvénient de rigidifier les conditions d'acquisition et le type de résultats obtenus. Le Cirad-Sar a mis au point un programme (TRACTEUR) pour analyser les performances d'un équipement pendant la réalisation d'une opération culturale (voir exemple de données et de résultats en annexe 2).

Pour des études fines reliant conditions d'intervention et performances, il est difficile de travailler dans des parcelles homogènes impossibles à mettre en place, par contre, il est préférable d'utiliser les hétérogénéités qui nous donnent une large gamme de conditions initiales. La géostatistique nous permet alors de cartographier les différentes données.

Cette démarche n'est faisable que s'il est possible d'associer en chaque point de la parcelle, conditions d'intervention et performances du matériel. Certaines méthodes statistiques nous permettent d'établir une cartographie des paramètres si l'on peut les positionner. S'il n'est pas difficile de positionner les paramètres relatifs au sol (humidité, densité), les paramètres caractérisant les performances du tracteur en mouvement nécessitent un système de positionnement en temps réel. Plusieurs systèmes sont disponibles sur le marché dans une gamme de prix étendue. Compte tenu de l'évolution du système Gps, tant pour la qualité que pour son coût, il y a de bonne chance pour qu'il devienne un outil privilégié pour ce type d'étude.

En conclusion

Pour effectuer le relevé des performances des équipements agricoles, la chaîne de mesure, élaborée par le Cirad-Sar est globalement au point. Cette chaîne permet différents types de travaux :

- des expérimentations fines en milieu contrôlé permettant d'associer des résultats agronomiques à des rendements énergétiques des machines qui les réalisent ;
- des suivis de performances des équipements en milieu réel, dans ce cas, c'est le côté plus technico-économique qui est l'objet de l'étude et, faute de système automatique, les conditions d'intervention ne peuvent qu'être sommairement relevées et enregistrées ainsi que le lieu d'intervention du matériel ; c'est, dans ce cas, le nombre des observations qui est privilégié à la finesse de l'observation.

Dans le cas de suivis prolongés, il faut étudier les méthodes de traitement et d'analyse rapide de ces données.

Références bibliographiques

HAVARD M., 1996. Mécanisation agricole : Exemple d'outils et de méthodes de calcul économique. Dossier de cours CIRAD-SAR, 19 p. + annexes.

HAVARD M., LE GAL P.Y., PIROT R., 1994. Towards a decision support system integrating different kinds of knowledge to choose and manage field equipement. In International conférence on agricultural engineering. AgEng'94, Milan, Italie. p. 1052-1060.

MOUSSET J., 1994. La modélisation du travail pour le conseil en agroéquipement. Recueil des communications de la journée d'étude "Organisation du travail", Cedag, 13-12-1994, Rennes, 7 p.

PIROT R., 1992. Automation of in-field data recording : recent research work at CIRAD-SAR In *Proc.* Ag'Eng Congress, Upsala, Sweden, 1-4 june 1990, 2 p.

PIROT R., 1996. L'acquisition et la gestion de références en agriculture : la cas des équipements en PED. Document de travail CIRAD-SAR, 12 p.

PERRET S., PIROT R., BARRET P., GALLET P., DEURVILHER D., 1994. Etude et définition d'un appareillage électronique d'acquisition de données embarqué sur tracteur. CIRAD-SAR, 20 p + annexes.

PERRET S., RAZAKA B., PIROT R., 1994. In field measurement of tillage implements performances : practical applications in soil tillage relations studies. In International conférence on agricultural engineering. AgEng'94, Milan, Italie, p. 647-648.

VITLOX O., DEPOORTER J., KETS R., 1992. Essais des tracteur à la prise de force. Station de Génie Rural. CRA de Gembloux. Note technique n° 57.

Annexe 1

Exemple de résultats dans le cas d'une expérimentation visant à définir l'humidité du sol optimale pour l'intervention d'un équipement tracteur-charrue (Perret, 1994)

Mesures effectuées sur chaque parcelle élémentaire (la longueur est fonction de la vitesse de déplacement et du temps de scrutation de la centrale d'acquisition, la largeur est la largeur de travail de l'outil).

Tracteur	Outil	Sol
Vitesse réelle (m s^{-1})*	Puissance à la barre (kW)*	Humidité volumique (g cm^3)***
RPM moteur (tour min^{-1})*	Profondeur de travail (m)*	Densité sur mottes (g cm^{-3})***
Consommation GO (l h^{-1})*	Largeur de travail (m)***	Résistance à la pénétration (M Pa)***
Puissance prise de force (kW)**		Poids de la bande travaillée (kg)**
Glissement (%)**		

*relevés effectuées par la chaîne de mesure au champs
**données calculées
***mesures relevées manuellement

Résultats synthétiques obtenus après traitement des données

(Les parties en grisé correspondent aux conditions optimales pour chaque paramètre)

Sol	humidité de surface	>35%	35-39%	<39%
	résistance à la pénétration	importante	modérée	faible
	risque de compaction	non	non	oui
Tracteur	glissement	modéré	modéré	important
	demande énergétique globale	importante	modérée	importante
	pertes d'énergie	modérées	faibles	importantes
Résultats	lit de semence	grosses motte dures	petites mottes fiables	et terre fine

Annexe 2

Exemple de résultats obtenus pour des relevés de performances de matériels au champ (Pirot 1990).

Données brutes du fichier Cross.Def

Temps h : m : s	Vitesse m/s	R.P.M. Tr/min	Consommation 1/h	Pente %	Devers %	Profrondeur Cm	Outil 1=Trav	Rep. N°
10:56:16	1,119	2004	07,92	3,15	-25,0	+45,88	0	0
10:56:21	0,810	1992	10,80	,244	-15,4	+45,99	0	0
10:56:26	0,533	2016	10,08	-7,28	-38,3	+46,10	0	0
10:56:31	1,012	1992	10,80	1,44	-38,6	+46,23	0	0
10:56:36	0,628	1992	08,64	-3,12	-26,7	+45,82	0	0
10:56:41	0,887	1956	20,88	-4,42	-27,4	+48,32	1	0
10:56:46	1,301	1656	25,92	-9,92	-36,0	+51,91	1	2
10:56:51	1,679	2088	29,52	-6,42	-22,1	+45,93	1	2
10:56:56	1,562	2052	30,24	-,293	-3,43	+48,74	1	2
10:57:01	1,430	2016	30,96	,594	-4,22	+54,20	1	2
10:57:06	1,350	1896	29,52	1,93	-1,78	+52,55	1	0
10:57:11	1,501	2016	30,96	,233	-6,86	+53,52	1	0
10:57:16	1,554	2028	30,96	1,91	-2,16	+52,59	1	0
10:57:21	1,616	1980	30,24	-2,10	-10,8	+51,74	1	0
10:57:26	0,410	2052	15,12	9,77	-2,89	+45,64	0	0
10:57:31	1,077	1992	16,56	2,19	17,5	+45,77	0	0

Les résultats techniques

Date : 1.12.
Marque du tracteur : Massey Ferguson.
Type du tracteur.
Lieu : Maurice.
Type de sol : humide.
Etat de surface : terrain avec énormément de souches.
Outil : pulvériseur.
Durée de l'essai : 0 h 5 mn 20 s.
Temps de travail : 0 h 2 mn 55 s Pourcentage de fourrières : 45,3 %.
Surface moyenne horaire travaillée avec les fourrières : 0,88 ha/h.
Surface moyenne horaire travaillée sans les fourrières : 1,61 ha/h.
Consommation horaire avec les fourrières : 20, 06 l/h.
Consommation horaire au travail : 27,01 l/h.
Moyenne des consommations spécifiques au travail : 0,30 l/kw/h σ : 0,01 1/Kw/h.
Moyenne des puissances Pto pendant le travail : 91,58 kw σ : 13,55 kw.
Puissance maximale Pto pendant le travail : 107,31 kw.
Effort maximal : 64,16 kN ; minimal : 27,04 kN ; moyen : 8,55 kN.
Vitesse moyenne du travail : 5,04 km/h ; glissement moyen : 19,6 %.
Nbre d'enrayures : 4 ; enrayure max : 69,22 m ; enrayure min : 52,12 m.
Prof. travail max : 57,4 cm ; min : 45,9 cm ; moy : 50,3 cm σ : 2,7 cm.
Largeur moyenne de travail : 3,20 m.
Remarques : sans.