

Déterminer l'impact environnemental de la consommation de carburant des tracteurs agricoles : simulation et comparaison

Consommer moins est devenu le leitmotiv des constructeurs de machines agricoles mais surtout des agriculteurs pour qui le poids économique des matières premières et notamment du carburant pèse de plus en plus lourd sur leurs exploitations. C'est l'occasion pour cette étude de nous faire part des recherches sur les outils permettant des comparaisons fines entre matériels intégrant des données recueillies en situation réelle d'utilisation.



Dans le contexte actuel, le problème de l'énergie devient crucial, dans les exploitations agricoles comme dans les autres secteurs économiques. En effet, la mécanisation des pratiques culturales est assurée par des machines, essentiellement des tracteurs, fonctionnant au fuel, dont

les prix ne cessent de grimper sous l'effet d'une demande mondiale en pleine croissance. En outre, le fonctionnement des tracteurs contribue aux émissions de gaz à effet de serre qui modifient le climat. La maîtrise de la consommation des tracteurs devient donc un enjeu à la fois économique et environnemental de premier plan.

La limitation de la consommation de carburant passe par le développement d'un matériel plus économe en énergie. Mais l'évaluation des performances énergétiques des matériels n'est pas simple, en particulier quand on souhaite l'aborder en termes de pratiques culturales. Les opérations agricoles sont en effet très variées et correspondent à des consommations tout aussi hétérogènes (Pick, 1989). Plusieurs auteurs se sont intéressés à caractériser la consommation d'un tracteur en fonction d'une opération culturale donnée (Hansson, 1999 ; Lindgren, 2005). La méthode la plus classique est celle qui a prévalu à la construction des cycles normatifs pour les tests de pollution. Elle consiste à définir les durées que passe un tracteur dans un régime et une puissance donnés pour une opération donnée. Le

problème de cette approche est qu'elle repose sur des valeurs relatives qui expriment la demande de puissance et le régime moteur en fonction des performances nominales du moteur. D'un tracteur à l'autre, la puissance demandée varie en proportion des puissances nominales, ce qui est gênant pour effectuer de l'inter-comparaison de matériel pour un même usage. En outre, le type de profil de mission établi est bien peu représentatif de l'usage réel. L'objectif de ce papier est de tenter d'évaluer les consommations ou émissions polluantes de différents tracteurs qui pourraient être utilisés à l'occasion d'une journée de travail. On souhaite ainsi pouvoir se poser la question du dimensionnement de la puissance d'un tracteur et de son impact.

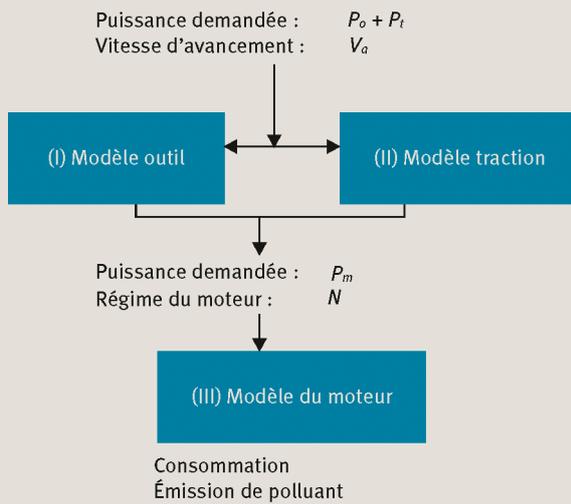
Pour cela, les travaux menés sont basés sur une approche mécanique du système tracteur-outil. Ils ont pour but la mise au point d'un outil de simulation numérique visant à lier mesures aux bancs et expérimentations de terrain. Dans un premier temps, les résultats obtenus permettront d'estimer la consommation de carburant, puis, par la suite, de pouvoir comparer les performances de différents tracteurs dans une situation donnée. Enfin, nous avons cherché à élaborer un indice environnemental, plus accessible, destiné à représenter les performances énergétiques et environnementales des machines. Cet article reprend ces différentes étapes, en s'appuyant sur un cas spécifique pour illustrer la méthode.

Mise au point d'un outil de comparaison de consommation

Principe général

Le simulateur de tracteur mis au point dans cette étude est basé sur deux principes traditionnellement retenus pour décrire le comportement de véhicule (Serrano, 2006 ; Lindgren, 2002 ; Wipke, 1999) : la conservation de l'énergie et le bilan des forces qui s'appliquent à l'ensemble tracteur-outil. L'approche retenue est une description modulaire analogue à celle retenue dans Wipke (1999) et qui peut être schématisée dans la figure 1. Le modèle a été développé sous Matlab pour une approche backward pour l'analyse des mesures de terrain et forward pour le diagnostic de consommation d'un matériel sur un chantier donné.

1 Schéma de principe du simulateur de tracteur



Le modèle repose sur une expression stationnaire du bilan de forces : les termes d'accélération et d'inertie dans les arbres de transmission sont négligés, contrairement aux options retenues dans Lindgren (2002) et Wipke (1999). Ce choix est lié à la fréquence d'échantillonnage des campagnes expérimentales, d'un enregistrement par minute. Cette fréquence masque les phénomènes transitoires d'inertie, dont les temps caractéristiques sont de l'ordre de quelques secondes

Modèle outil (I)

Les variables d'entrées retenues dans le modèle sont les variables qui permettent de décrire le chantier d'épandage : la puissance demandée au moteur permet d'alimenter un outil de travail et couvre les besoins en traction nécessaire au déplacement de la machine. À ce stade de la campagne expérimentale, nous ne disposons pas d'une information permettant de caractériser les besoins en puissance P_o d'un outil tel qu'un épandeur. Nous faisons donc l'hypothèse

que l'ensemble de la puissance demandée au moteur au cours des essais de terrain est destiné à couvrir les besoins en traction P_t , ce qui revient à supposer que $P_o = 0$.

Modèle de traction (II)

La puissance de traction est le produit de la force de traction par la vitesse d'avancement :

$$P_t = F_t V_a \quad 1$$

La force de traction nette est fonction du type de sol et des performances des pneumatiques du tracteur. Les forces horizontales qui s'exercent sur les roues sont la force de traction et la résistance à l'avancement. Elles sont reliées au couple exercé sur l'essieu pour chaque roue motrice :

$$T = F_w e + F_r R \quad 2$$

Le coefficient de résistance au roulement est donné par $\rho = e / R$, où R est le rayon de la roue et e la distance entre le centre de la roue et le point d'application des forces, e étant proportionnel à la déformation du pneu. Le coefficient de traction pour une roue permet d'exprimer la proportionnalité entre la force de traction nette et le poids F_w qui s'applique à l'essieu, ce qui s'écrit $K = F_T / F_w$. En introduisant ces deux coefficients dans l'équation 2, il vient alors $T = (\rho + K) F_w R$, relation qui s'applique aussi bien à la roue avant (f : front) qu'à la roue arrière (r : rear) :

$$F_T = F_{Tr} + F_{Tf} = \kappa_r F_{wr} + K_f F_{wf} = \kappa_r \frac{T_r}{R_r(\rho_r + \kappa_r)} + \kappa_f \frac{T_f}{R_f(\rho_f + \kappa_f)} \quad 3$$

On suppose que la répartition des charges est égale entre l'avant et l'arrière, conformément à l'hypothèse retenue par Grisso (2006). Les essais réalisés par Holm (1969) montre en outre $\rho_r = \kappa_r = \rho_i + k_i = \rho + k$. Ce rapport est une fonction du glissement s . Enfin, le couple à l'essieu est proportionnel au couple moteur, le facteur de proportionnalité étant lié au rapport de boîte engagé Z_i . On obtient ainsi :

$$F_T = \frac{\kappa}{\kappa + \rho} R Z_i T_m \quad 4$$

La vitesse d'avancement est liée au régime moteur par la relation :

$$v_a = \frac{12\pi R}{100} N_m Z_i (1 - s) \quad 5$$

Les équations 4 et 5 permettent ainsi, à partir des caractéristiques d'un chantier, de remonter aux caractéristiques de fonctionnement du moteur. Ces relations nécessitent de disposer, outre la puissance demandée en traction et de la vitesse d'avancement, de grandeurs relatives au glissement, au rendement de traction et au rapport de boîte engagé. Les rendements de traction ainsi que l'étagement des boîtes sont déterminés à partir des valeurs d'essais en traction. On peut alors exprimer le régime et le couple moteur qui permettront au tracteur d'animer l'outil et travailler à la vitesse choisie.

Modèle moteur (III)

Le modèle moteur doit permettre de diagnostiquer la consommation de carburant en fonction des régimes et couples demandés pour les travaux. Pour déterminer le lien entre consommation, puissance et moteur, on utilise des données caractéristiques du moteur obtenues en laboratoire. L'encadré 1 présente les essais de type OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), et ceux conformes à la norme ISO 8178 utilisés, ainsi qu'un récapitulatif des points de mesures correspondant à ces deux types d'essais (figure 2).

On sait depuis longtemps que le couple, le régime, la puissance et la consommation d'un moteur sont des variables liées entre-elles. Aujourd'hui, même avec les technologies utilisées sur les moteurs de tracteurs, on peut admettre que le rendement du moteur est suffisamment régulier

1 LES DIFFÉRENTS TYPES D'ESSAIS ET POINTS DE MESURE CORRESPONDANTS

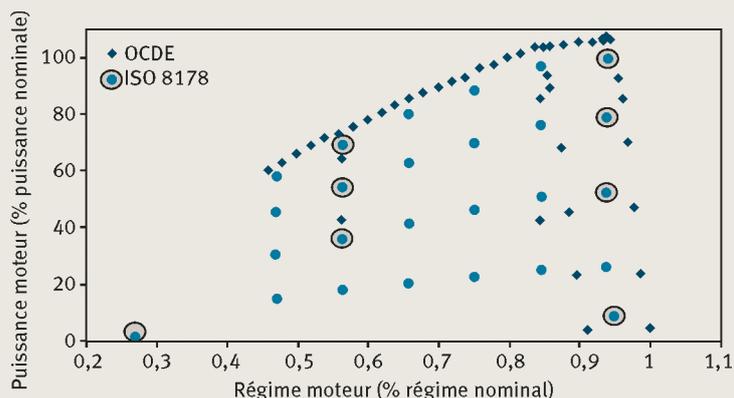
Essais OCDE

De nombreux tests sont réalisés sur les tracteurs dans le cadre des codes OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques). Plus particulièrement, le code 2 porte sur les essais de performance des tracteurs agricoles et forestiers : parmi eux, ce sont les mesures de puissance à la prise de force et en traction qui seront utilisées dans la méthode mise en place. L'essai à la prise de force nous sert à déterminer les caractéristiques d'un modèle de consommation en fonction de la puissance et du régime moteur. L'essai de traction nous fournit une estimation des rendements de transmission du tracteur. Sur la figure 2, on reporte les points de mesures de l'essai prise de force dans le diagramme régime-couple.

Norme ISO 8178

La norme ISO 8178 porte sur l'analyse des gaz d'échappement du moteur installé sur les tracteurs. Plus particulièrement, les tracteurs agricoles sont concernés par le cycle C1 de cette norme, qui traite du cas des véhicules non routiers et équipements industriels non routiers à moteur diesel. La norme établit le protocole de mesures des émissions de gaz polluants en régime permanent (NO_x, CO, HC). Plusieurs mesures sont réalisées dans le domaine de fonctionnement du moteur, puis une moyenne pondérée des points obtenus permet d'obtenir une seule valeur illustrative de la pollution du moteur testé. Des valeurs sont relevées pour le régime de ralenti, au régime du couple maximum et au régime nominal. Pour ces deux derniers régimes, on charge le moteur à 100, 75 puis 50 % du couple disponible au régime choisi.

2 Mesures réalisées en laboratoire dans un cadre normalisé



pour qu'on puisse établir une relation entre une variable en fonction de deux autres. Harris (1992) a développé un modèle mathématique exprimant le couple T comme une fonction de la vitesse du moteur N et de la différence entre la consommation de carburant pour un point donné et celle obtenue avec un couple nul $f = F - F_0$. Cette fonction empirique, utilisée également dans les travaux de de Souza (1989), est un polynôme d'ordre 3 dont les coefficients sont calculés à partir des tests de performance d'un moteur (mesures de puissance à la prise de force) :

$$T = a_{11} + a_{12}f^2 + a_{13}f^3 + (a_{21}f + a_{22}f^2 + a_{23}f^3)N + (a_{31}f + a_{32}f^2 + a_{33}f^3)N^2 \quad 6$$

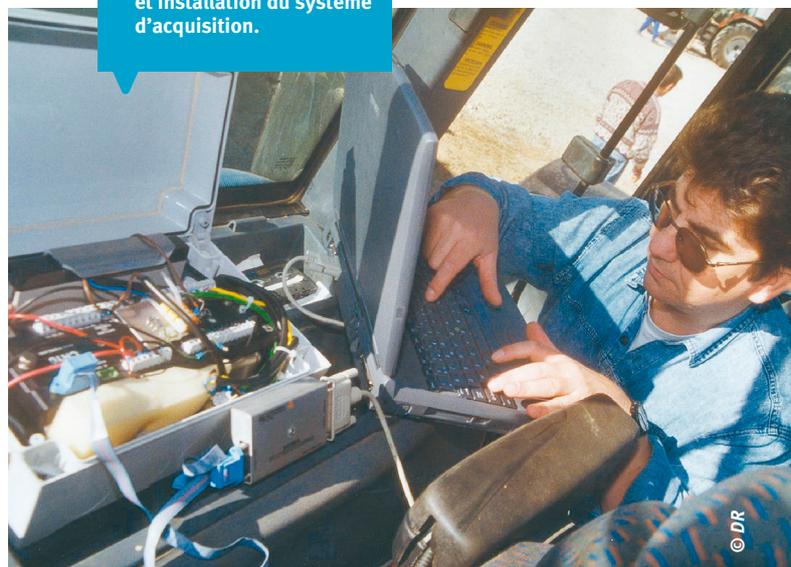
L'ensemble de ces équations constitue l'outil de diagnostic de consommation. Celui-ci sera utilisé pour comparer différents matériels sur le chantier agricole présenté dans ce qui suit.

Expérimentations de terrain

Dispositif expérimental

Les mesures utilisées ici ont été réalisées dans le cadre du projet de l'Agence nationale de la recherche ANR EcoDéfi (Éco-conception et développement de méthodologies de fabrication innovantes de machines d'épandage). La campagne a été menée conjointement avec le CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) et la FNCUMA (Fédération nationale des coopératives d'utilisation de matériel agricole), avec la participation de la CUMA des Cinq Charmes, dans la Sarthe (photo 1).

1 Instrumentation des sites et installation du système d'acquisition.



Les analyses qui suivent sont basées sur le premier tracteur instrumenté, un John Deere 7430, pour lequel nous avons rapidement disposé d'enregistrements. Le système d'acquisition se compose d'une centrale CR1000-2M de chez Campbell, d'un thermocouple de type K, d'un radar et d'un détecteur de proximité, de chambres de consommation 5 cc (Sparex). Les variables mesurées sont la vitesse d'avancement v_a (Km.h⁻¹), le régime moteur N (rpm), la consommation f (L.h⁻¹), la température des fumées T_f (°C). Le temps de scrutation est de 5 secondes et l'enregistrement se fait toutes les minutes.

Analyse d'une journée de travail

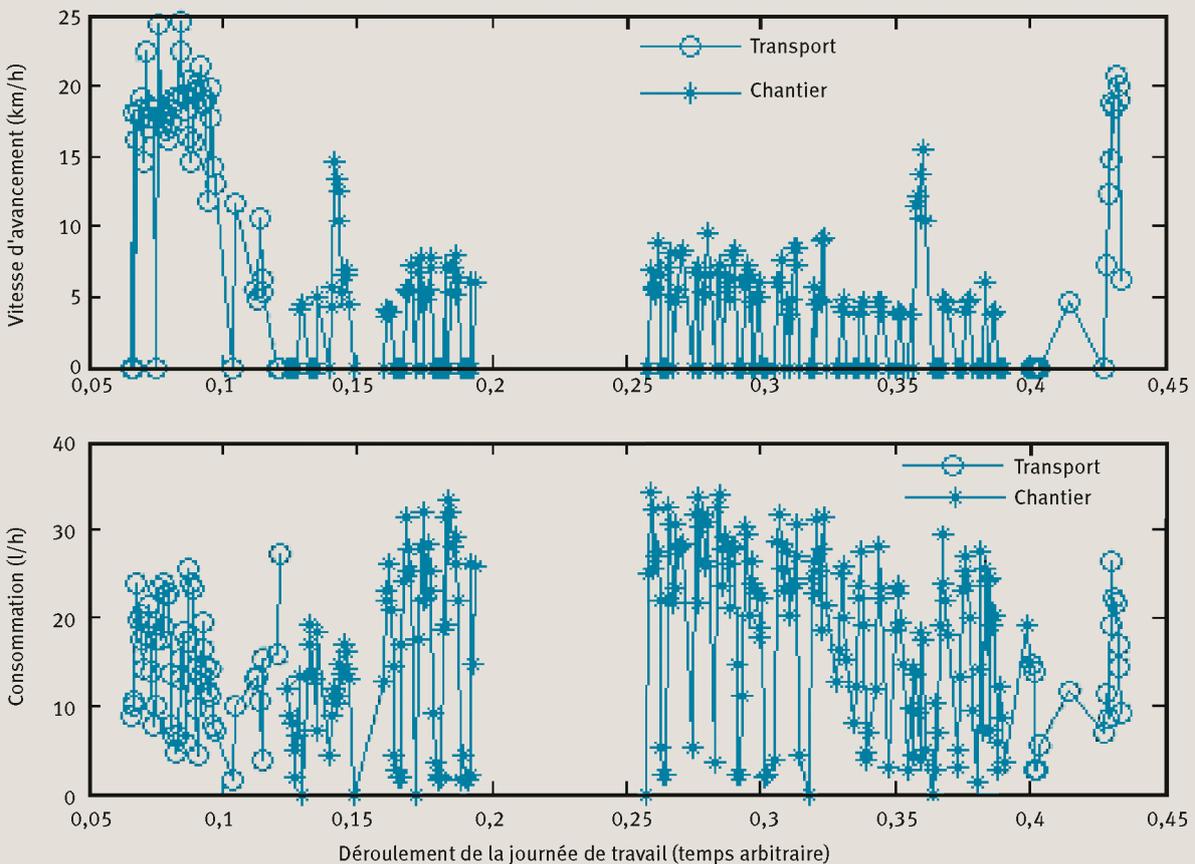
Les mesures de terrains sont récupérées régulièrement auprès des sites expérimentaux. Le premier enregistrement dont nous avons disposé comporte un peu plus de 31 heures d'enregistrement. L'horodatage des résultats permet d'identifier les séquences de travail les plus longues et de sélectionner ainsi les journées de travail. Le premier enregistrement comporte quelques journées de travail aux champs, en particulier une à laquelle nous nous intéressons ici et dont les caractéristiques (faible vitesse d'avancement, demande de puissances importantes, longueur du travail et déroulement) s'apparentent à un travail du sol. Le déroulement de cette journée est représenté sur la figure 3.

On observe que la journée est bordée par deux séquences de transport au cours desquelles la vitesse d'avancement est supérieure à 10 Km.h⁻¹. Pendant ces phases, la consommation de carburant fluctue entre 7 et 25 L.h⁻¹. Sur la partie au champ, la vitesse d'avancement fluctue autour de 3,3 Km.h⁻¹. Les demi-tours sont clairement identifiés par les séquences marquées à vitesse nulle. La consommation oscille entre des valeurs très élevées, supérieures à 20 L.h⁻¹ et des valeurs beaucoup plus faibles. Ces faibles consommations ne sont pas systématiquement corrélées aux opérations de demi-tours identifiées sur la base des vitesses. Ces opérations de manœuvre représentent un pourcentage de temps relativement élevé (48 % du temps passé dans les opérations en champ – tableau 1).

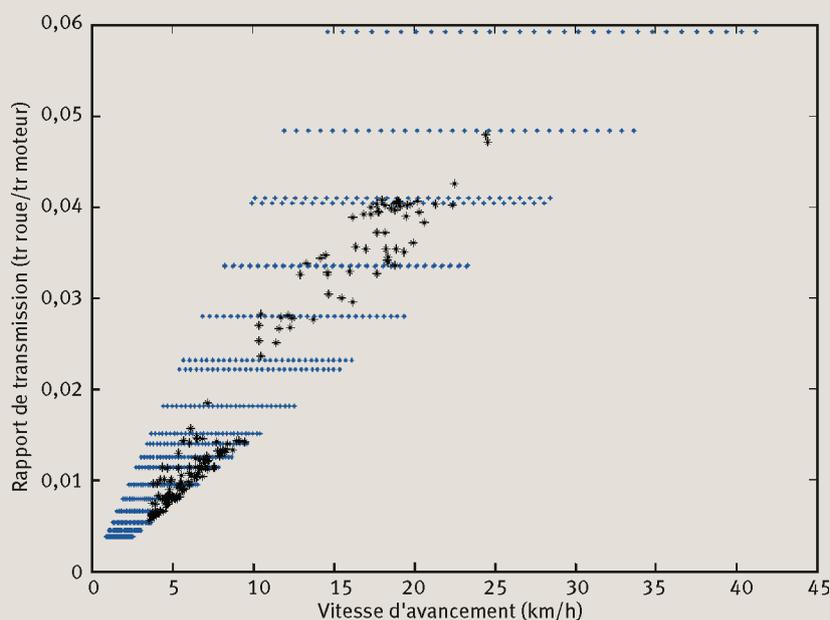
1 Caractéristiques de la journée de travail du 28 mars 2008, surface de travail estimée à 15 ha

	Transport (matin+soir)	Phase de travail
Consommation moyenne (L.h ⁻¹)	12,4	17,6
Carburant utilisé (L)	17,4	66,8
Durée (minutes)	84	227
Vitesse (Km.h ⁻¹)	11,3	3,25
Distance (Km)	15,9	12,3

3 Vitesse d'avancement et consommation horaire mesurées au cours de la journée de travail



4 Étagement de la boîte de vitesses du John Deere 7420 (•) et représentation des valeurs enregistrées sur le terrain (+)



► Analyse de la stratégie de conduite sur le chantier

Dans un premier temps, il est nécessaire, pour utiliser le modèle établi précédemment, de définir les rapports de boîte de vitesse engagés dans les enregistrements ainsi que le glissement. Nous ne disposons pas de mesures nous permettant d'accéder directement à ces grandeurs. Le produit $(1-s)Zi$ est calculé à partir des mesures recueillies de N et v_a pour tous les points de mesures enregistrés, en transport comme au cours du travail au champ. On peut en déduire les valeurs de glissement, qui est en moyenne de 6 % sur les séquences de transports et de 8 % sur les séquences au champ. Cette valeur est plutôt faible et elle est également entachée par l'erreur commise en supposant que le rapport moyen est constant durant la minute d'enregistrement. Néanmoins, les valeurs trouvées sont suffisamment plausibles pour être considérées comme une estimation moyenne acceptable. Le rapport de vitesse engagé en est dérivé et la stratégie de conduite ainsi observée sur le terrain est baptisée S2.

Estimation de la puissance du moteur

Dans le dispositif de mesure, une sonde de température permet de mesurer la température des gaz d'échappement. On sait que la température varie proportionnellement à la puissance dans un régime donné (Sumner, 1984). Connaissant cette proportionnalité, il est donc possible de remonter à la puissance développée par le moteur, en supposant que cette dernière est suffisamment constante. Pour déterminer les facteurs de proportionnalité entre température et puissance, un étalonnage par mesure sur banc est nécessaire. Ces tests n'ayant pas été réalisés, nous ne pouvons pas utiliser la température comme indicateur de puissance. Pour estimer cette dernière, nous utilisons alors le modèle de Harris (équation 6) qui nous permet de diagnostiquer

le couple pour un régime et une consommation donnés. Les coefficients du modèle sont déterminés à partir des mesures réalisées dans le cadre OCDE pour un tracteur John Deere 7420, la version 7430 n'ayant pas encore fait l'objet d'un rapport OCDE. Le modèle 7420 est un modèle de puissance équivalente au 7430, mais il correspond à une technologie de moteur un peu plus ancienne. Pour chaque enregistrement, on dispose ainsi d'une valeur de puissance estimée à partir de la consommation et du régime mesurés.

Indicateurs environnementaux et performance du matériel utilisé

Profil de mission pour l'épandage

Traditionnellement, un profil de mission se définit comme le temps passé dans un régime et à une puissance donnés. C'est le type de dénomination le plus couramment utilisé pour définir la façon dont un moteur de tracteur est utilisé (Hansson, 1999). Pour la journée étudiée, on peut donc obtenir un profil de mission en cumulant les durées passées dans un mode de fonctionnement moteur donné. Les résultats de ce calcul sont présentés dans le tableau 2.

Les caractéristiques de ce profil sont comparées aux caractéristiques moyennes d'usage moyen tel qu'il est défini dans la norme d'émissions. On remarque que le temps passé dans le régime nominal à pleine charge est proportionnellement plus important dans les mesures EcoDéfi que dans la norme. Inversement, le temps passé au ralenti est très faible dans les mesures EcoDéfi. Ces différences s'expliquent essentiellement par le fait que l'estimation de puissance n'a pu être faite pour les bas régimes. De fait, ces faibles régimes sont sous-représentés dans nos mesures. En l'absence d'une estimation correcte de puissance sur le terrain, il sera donc difficile de construire un profil de mission correspondant à l'épandage.

2 Principaux modes de fonctionnement d'un moteur (engins non routiers, norme ISO8178) et coefficient de pondération des modes pour un usage moyen et pour la journée du 28 mars 2008

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8
Régime	Nominal				60 % du régime nominal			Ralenti
Couple (%)	100	75	50	10	100	75	50	0
Pondération usage moyen Norme ISO 8178 (%)	15	15	15	10	10	10	10	15
Pondération Ecodéfi ¹ (%)	23	6	4	3	6	5	24	1

¹ Hors les enregistrements pour lesquels la puissance estimée a été négative, soit 27 % du temps total, non pris en compte.

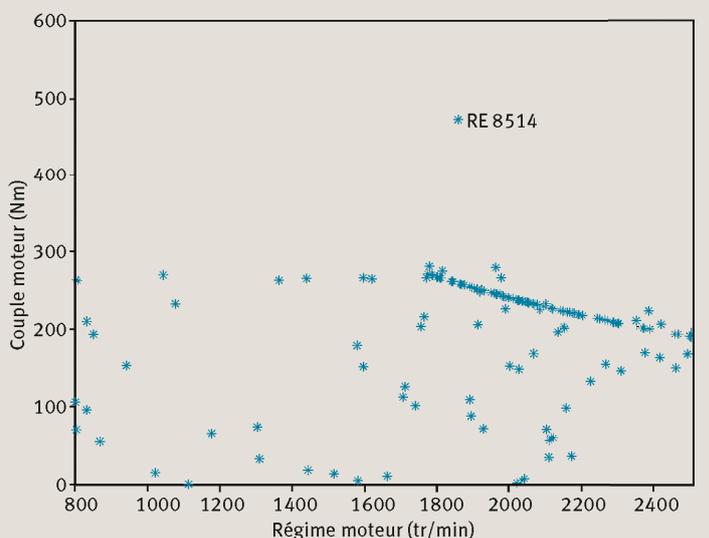
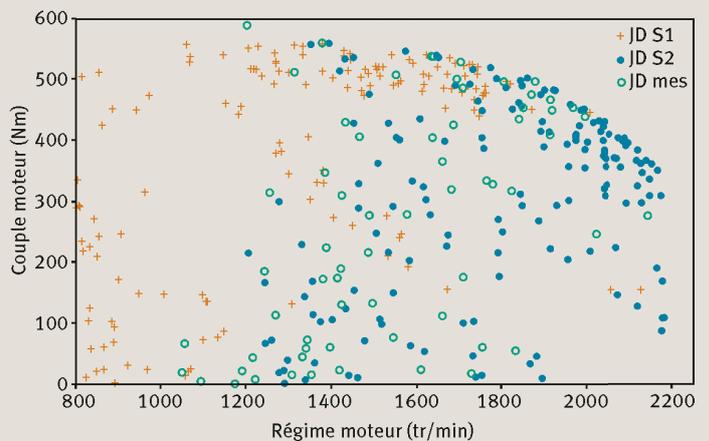
Performances et comparaison de matériels

Partant des besoins en force de traction et vitesse d'avancement, nous avons vu précédemment comment remonter au régime et à la puissance du moteur. Il est pour cela nécessaire de connaître également le rapport de boîte engagé. La détermination de ce rapport se fait par l'intermédiaire d'une stratégie de changement de rapport. La stratégie S2 mesurée sur le terrain ne s'applique qu'au tracteur utilisé pendant les essais. Pour des tracteurs équipés de boîtes de vitesse différentes, il est nécessaire de modéliser d'autres stratégies de conduite. Une stratégie simple consiste à choisir le rapport de boîte qui minimise la consommation. C'est la stratégie baptisée S1 et adoptée dans ce qui suit. Elle est comparée à la stratégie de l'opérateur sur le terrain (figure 5) : les points de fonctionnement de la stratégie S1 sont globalement décalés à gauche par rapport à la stratégie S2 adoptée par l'opérateur. Conformément aux résultats obtenus par Grisso (2006), on observe ainsi que la minimisation des consommations de carburant passe bien par la minimisation du régime moteur : c'est ce que Grisso (2006) appelle la stratégie GUTD (*Gear Up, Throttle Down*). Cependant, l'ampleur du décalage à gauche nous paraît surestimée : les points à très faibles régimes (inférieurs à 1 000 tr.min⁻¹, en moyenne sur 1 minute) correspondent au minimum de consommation, mais le moteur présente dans cette zone un risque important de calage qui nous amène à juger la stratégie développée peu réaliste dans cette zone. La même stratégie de changement de rapport est utilisée pour le Renault 815-4 (figure 5, en bas). Ce tracteur, ancien et peu puissant, a été choisi pour cette comparaison car nous disposons d'un ensemble important de mesures de consommation et de pollution pour ce tracteur. De plus, le tracteur est à notre disposition, ce qui nous permet, le cas échéant, d'envisager des mesures complémentaires. Mais le manque de puissance de ce tracteur ne lui permet pas de réaliser le travail dans des conditions analogues au John Deere 7420. Aussi, lorsque la puissance demandée sur le terrain dépasse les capacités du tracteur Renault, nous avons diminué la vitesse d'avancement du tracteur, la force de traction requise étant ainsi toujours identique. Par contre, la vitesse d'exécution des travaux se trouve par conséquent réduite par la faible puissance délivrée par le Renault. On remarque également que le Renault fonctionne la plupart du temps dans des régimes moteurs très élevés et à un couple toujours très proche du couple maximum délivré

par la machine. Ce décalage à droite vient du fait que la puissance demandée au Renault est très souvent au maximum de ses capacités de puissance.



5 Estimation des couples et régimes du moteur pour le John Deere 7420 (en haut) et pour le Renault 815-4 (en bas) pendant un même chantier agricole



3 Récapitulatif des caractéristiques de consommation de carburant, durée d'exécution et distance parcourue simulée pour la journée du 28 mars 2008

Tracteur		JD7420	JD7420	JD7420	REN8541	JD7420	JD7420
Stratégie		S2:TR	S1: MIN	PONDER.	S1:MIN	TERRAIN PARTIEL	TERRAIN
Chantier	Points	108	100	108	108	100	227
	Conso (L)	45,9	37,4	29,1	30,9	42,3	66,8
	Distance (Km)	11,3	10,5	11,3	11,3	11,3	12,3
	Durée (h)	1,8	1,67	1,8	2,35	1,8	3,8
Transport	Points	47	44	47	45	44	84
	Conso (L)	18,6	15,9	10,7	14,4	12,5	17,4
	Distance (Km)	13,3	12,4	13,3	12,6	13,3	15,9
	Durée (h)	0,78	0,73	0,78	0,88	0,73	1,40

► Pour un même chantier, on visualise bien sur la figure 5 que la distribution des points de fonctionnement est très différente selon le tracteur utilisé. Entre le graphique du haut et celui du bas, la répartition des points de fonctionnement est visiblement fonction du matériel utilisé et peut être éloignée des points de la norme. Cette différence explique notre réticence vis-à-vis de coefficients de pondération de points de fonctionnement moteur de la norme ISO 8178 qui seraient utilisés pour des classements de matériel. Les deux cartographies obtenues nous permettent donc de bien visualiser pourquoi un profil de mission sous la forme d'un graphique régime/couple n'est pas aussi systématiquement généralisable que ce qu'envisage Hansson (1999).

Indicateurs environnementaux

On recherche ensuite à reconstituer les consommations de carburant sur un chantier. Le tableau 3 rassemble les caractéristiques simulées pour la journée du 28 mars 2008. Les paramètres descriptifs retenus sont la consommation de carburant qui représente ici l'impact sur l'environnement. Les autres critères retenus sont liés à la durée du travail et à la distance parcourue, cette dernière permettant de caractériser la taille de la parcelle. Dans la dernière colonne « TERRAIN », on récapitule l'ensemble des indicateurs tels qu'ils ont été mesurés sur le terrain pour chacune des deux opérations de transport et de chantier identifiées dans la journée de travail.

Dans l'avant-dernière colonne « TERRAIN PARTIEL », on reprend les données pour lesquelles l'ensemble des simulations a pu être réalisé. Cet ensemble de points extraits correspond à l'essentiel des distances parcourues, que ce soit pour le transport ou pour le chantier. Par contre, il n'a été possible de simuler qu'un peu moins de la moitié du temps passé dans le tracteur : en effet, tous les points au ralenti ou en manœuvre à très faible vitesse ne sont pas pris en compte, soit parce que la méthode ne permet pas de les représenter (cas débrayé : vitesse d'avancement nul, 48 % du temps au champ), soit parce que les couples régime/

consommation sont trop faibles pour qu'on parvienne à estimer correctement la puissance demandée au moteur. Ces consommations simulées sont calculées à partir du modèle de Harris, en utilisant respectivement les stratégies de conduite S1 (terrain : S2:TR) et S2 (optimale, S1:Min) pour le tracteur John Deere. Les points reconstitués correctement par le modèle ne représentent qu'un tiers de la consommation passée dans le champ et deux tiers de la partie transport. La contribution des points non simulés reste donc à ce stade trop importante pour pouvoir être négligée. En comparant la consommation des relevés partiels à celle calculée pour le tracteur John Deere 7420 avec le modèle présenté ici, on observe comme précédemment une nette surestimation de la consommation (46 L en champ au lieu de 42). L'origine de cet écart réside dans un artefact numérique dans l'inversion du modèle d'Harris qui conduit à une surestimation systématique des consommations à faible puissance. Le changement de stratégie de conduite permettrait un gain de l'ordre de 14 % (transport) à 20 % (chantier) de consommation. Le gain attendu est sans doute légèrement surestimé du fait du manque de réalisme de la stratégie S1.

Si on utilise un modèle à pondération du type profil de mission, on sous-estime nettement la consommation. Hansson (1999) rencontre également cette difficulté. Lindgren (2005) introduit par la suite les effets instationnaires pour remédier à ce défaut. Le tracé des consommations par points, non présenté ici, montre en fait que le modèle à coefficients de pondération permet d'estimer assez bien les consommations faibles et intermédiaires. Mais la consommation est plutôt sous-estimée à pleine charge. En effet, nous avons utilisé les points de test OCDE entourant les points de la norme ISO 8178 pour estimer la matrice des consommations. On utilise ainsi une valeur moyenne qui représente assez mal les très fortes charges demandées dans les opérations en champs. Sur la partie transport, la consommation est d'ailleurs plus proche de celle mesurée, même si elle reste toujours plus faible.

Enfin, il est possible de comparer les indicateurs obtenus pour le John Deere et le Renault, avec la même stratégie de changement de rapport de boîte. On observe que la consommation de carburant est systématiquement plus faible pour le Renault : la diminution nous paraît significative pour la partie au champ, compte tenu du fait que les estimations réalisées avec le modèle sont moins éloignées des observations de terrain. Pour la partie transport, l'écart est moindre et reste inclus dans la marge d'incertitude de la méthode. Pour les deux parties, on augmente de 25 % le temps consacré au même chantier, ce qui représente ici plus d'une heure sur l'ensemble de la journée.

Conclusion et perspectives

Cet article présente la méthodologie mise au point pour simuler le fonctionnement d'un tracteur au cours d'une journée de travail et en déduire une estimation de sa consommation. Le modèle utilisé reste relativement sommaire et repose sur les équations simplifiées des forces et de puissance. L'avantage de cette formulation est de pouvoir facilement extraire l'ensemble des paramètres retenus à partir des mesures de terrain et des tests en laboratoire généralement disponibles pour un tracteur donné. Cependant, les résultats obtenus sont à ce stade parcellaires et de nombreux obstacles ont été identifiés au cours de ce travail. Une partie des obstacles est associée au dispositif expérimental : l'estimation des puissances fournies par le moteur au cours des travaux est sans doute l'élément qui engendre la plus grande part d'incertitude dans les résultats présentés. D'autre part, la durée d'enregistrement comportant des manœuvres est très importante et représente une proportion non négligeable de la consommation. L'augmentation de la fréquence d'acquisition nous paraît être un moyen adapté pour mieux documenter ces phases et en améliorer la description. La reconception du dispositif expérimental, en intégrant notamment des données transitant dans les réseaux CAN des tracteurs, vont nous permettre de

poursuivre les campagnes de terrain afin d'en extraire de nouvelles séquences caractéristiques du travail agricole. Le simulateur permet de reconstituer les consommations de carburant sur un chantier de travail du sol. Certains problèmes restent à régler dans les modèles mathématiques utilisés, en particulier pour décrire les épisodes où le tracteur est utilisé à faible charge. Une stratégie de conduite économique a été proposée. Le réalisme de la description reste aussi à améliorer avant de l'utiliser pour du conseil à la conduite. Néanmoins, à travers cet exemple, on montre comment il est possible d'estimer des consommations et des durées de chantier pour différents tracteurs. On peut utiliser le modèle pour estimer les gains de carburants associés à différents types de conduite. Le simulateur permet également de comparer des tracteurs de puissances différentes et d'associer à chacun des temps de travail en regard de consommation, ce que ne permet pas la démarche traditionnelle de classification des machines. Cependant, la faiblesse des gains de consommation à espérer nous fixe des objectifs de précision du modèle qui reste à atteindre dans la poursuite de ces travaux. ■

Les auteurs

Stéphanie Lacour

Cemagref, centre d'Antony, UR TSAN, Technologies pour la sécurité et les performances des agroéquipements,
BP 44, Parc de Tourvoie, 92163 Antony Cedex
stephanie.lacour@cemagref.fr

Thierry Langle

Cemagref, centre d'Antony, UR TSAN, Technologies pour la sécurité et les performances des agroéquipements,
BP 44, Parc de Tourvoie, 92163 Antony Cedex
thierry.langle@cemagref.fr

Émilie Dieudé-Fauvel

Cemagref, centre de Clermont-Ferrand
UR TSCF, Technologies et systèmes d'information
pour les agrosystèmes
Domaine des Palaquins, 03150 Montoldre
emilie.dieude-fauvel@cemagref.fr

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- DE SOUZA, E.G., MILANEZ, L.F., 1991, Prediction of tractor performance on concrete, *ASAE*, vol. 34(3), p. 727.
- GRISSE, R., PERUMPRAL, J., ZOZ, F., 2006, An empirical model for tractive performances of rubber-tracks in agricultural soils, *J. of Terramechanics*, vol. 43, p. 225-236.
- HANSSON, P.A., NOREN, O., BOHM, M., 1999, Effects of specific operational weighting factors on standardized measurements of tractor engine emissions, *J. agric. Engng Res.*, n° 74, p. 347-353.
- HARRIS, H.D., 1992, Prediction of tractor engine performance using OECD standard test data, *J. of agric. Engng Res.*, vol. 53, p. 181-193.
- LINDGREN, M., 2005, 'A transient fuel consumption model for non-road machinery, *Biosystems Engineering*, vol. 91, p. 139-147.
- LINDGREN, M., HANSSON, P.A., 2002, Effects of engine control strategies and transmission characteristics on the exhaust gas emissions from agricultural tractor, *Biosystems Engineering*, vol. 83(1), p. 55-65.
- SERRANO, J.M., PEÇA, J.O., DA SILVA, M., PINHEIRO, A., CARVALHO, M., 2006, Tractor energy requirements in disc harrow systems, *Biosystems Engineering*, n° 98, p. 286-296.