



HAL
open science

Classification énergétique des tracteurs d'occasion

Catherine Gaubert, Didier Debroize, Stéphanie Lacourt, Frederic Cointault,
Christine Fant

► **To cite this version:**

Catherine Gaubert, Didier Debroize, Stéphanie Lacourt, Frederic Cointault, Christine Fant. Classification énergétique des tracteurs d'occasion. Innovations Agronomiques, 2013, 30, pp.253-265. 10.17180/7bk7-wa26 . hal-04652133

HAL Id: hal-04652133

<https://hal.inrae.fr/hal-04652133v1>

Submitted on 18 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Classification énergétique des tracteurs d'occasion

Gaubert C.¹, Debroize D.², Lacour S.³, Cointault F.⁴, Fant C.⁵

¹ FNCUMA, 43 rue Sedaine, 75011 Paris

² Chambre d'agriculture de Bretagne, Station des Cormiers, 35140 Saint-Aubin-du-Cormier

³ Laboratoire de génie des procédés pour l'environnement, l'énergie et la santé (LGP2ES-EA21), Irstea, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, CS 10030, 92761 Antony cedex

⁴ Agrosup Dijon, UMR 1347 Agroécologie, 26 boulevard Petitjean 21079 Dijon cedex

⁵ Agrosup Dijon, 26 boulevard Petitjean 21079 Dijon cedex

Correspondance : catherine.gaubert@cuma.fr

Résumé

Lors du Grenelle de l'environnement, la réduction de la dépendance énergétique des exploitations a été affichée comme un enjeu majeur. Pour répondre aux objectifs du Plan de Performance Energétique, un consortium de partenaires issu du Réseau Mixte Technologique Agroéquipement Energie (www.agroequipement-energie.fr), accompagné par le Ministère de l'Agriculture et l'ADEME, a souhaité développer une classification énergétique des tracteurs. L'objectif de la classification est de pouvoir fournir aux agriculteurs de nouveaux critères de choix, liés à la consommation d'énergie des tracteurs pour orienter leurs investissements dans des tracteurs neufs ou d'occasion, correspondant mieux à leurs besoins et travaux.

La classification a été produite en s'appuyant sur les résultats de l'ensemble des passages au banc d'essai réalisés par les opérateurs de bancs d'essai mobiles (plus de 3000 par an). L'indice CIBEM (Classification Indice Banc d'Essai Moteur), est un indice caractérisant l'efficacité énergétique du moteur du tracteur. Il est calculé en comparant l'efficacité énergétique du tracteur par rapport à une référence variant selon la puissance du tracteur. Il aboutit à l'obtention d'une note (de A à G), et d'un référentiel se basant sur les mêmes principes que les classifications utilisées pour l'électroménager. Pour chaque tracteur d'occasion passé au banc d'essai, une étiquette énergétique sera apposée sur le compte-rendu de diagnostic. Elle doit permettre aux agriculteurs de faire des choix de tracteurs énergétiquement plus acceptables. Pour les conseillers agricoles, elle leur permet d'accroître la pertinence des conseils donnés aux agriculteurs dans les phases de renouvellement des tracteurs. Enfin, la mise à jour régulière de la base de données de classification va permettre de suivre l'évolution dans le temps de l'état de santé du parc de tracteurs.

Mots clés : consommation de carburant, tracteurs, protocole d'évaluation, indicateur de performance, usage, matériel d'occasion

Abstract: Energy classification of used tractors

During the Grenelle of the environment, reduction of energy dependence of farms was posted as a major issue. To meet the objectives of the Plan of Energy Performance, a consortium of partners from the technological joint network based on the energy in agricultural engineering (www.agroequipement-energie.fr), accompanied by the Ministry of Agriculture and the ADEME has sought to develop an energy classification of tractors. The purpose of the classification was to provide new criteria of choice, related to the energy consumption of the tractors to farmers to direct their investments in new or used tractors, corresponding to their needs and work.

The classification has been produced in relying on the results of all of the performances measurement to the bench tests carried out by the operators of mobile test bed (more than 3000 per year). Index CIBEM (Classification index bench of test engine) is characterizing the energy efficiency of the engine

of the tractor. It is calculated by comparing the energy efficiency of the tractor to a reference related to the power of the tractor. It leads to a score (A to G), and repository based on the same principles as the classifications used for household appliances. For each tractor measured by the test bed, an energy label will be attached to the report of diagnosis. It should enable farmers to make choices of energetically more acceptable tractors. For farm advisors, it allows them to increase the relevance of the advice given to farmers in the stages of renewal of tractors. Finally, the regular update of the classification database will make it possible to follow the changes of the state of the park of tractors.

Keywords: fuel consumption, tractors, assessment protocol, indicator of performance, use, equipment for sale.

Introduction

Dans le cadre du Plan de Performance Énergétique lancé en 2009 par le Ministère en charge de l'Agriculture, l'objectif ambitieux et nécessaire d'atteindre à l'horizon 2013, 30% des exploitations agricoles à faible dépendance énergétique a été fixé. Deux solutions complémentaires s'offrent aux agriculteurs : réaliser des économies d'énergies directes et indirectes ou produire et utiliser des énergies renouvelables.

La consommation en carburant des exploitations agricoles française s'élève à 2 millions de tonnes équivalent pétrole, soit en moyenne 17 400 litres par exploitation. Ce poste de dépense demeure l'un des plus importants pour les exploitations dans leurs charges de mécanisation. Avec en moyenne 4 tracteurs par exploitation et 50 % en moyenne des consommations directes d'énergie de l'agriculture, la traction constitue un point important à prendre en considération pour travailler sur les économies d'énergie, et donc l'allègement des charges d'exploitations. Faire prendre conscience aux agriculteurs de l'impact du choix de leur équipement sur leur consommation d'énergie future, tel est l'enjeu de ce projet de mise en place d'une classification énergétique des tracteurs d'occasion. Ce projet a été porté par un consortium de partenaires issus du Réseau Mixte Technologique Agroéquipement Energie :

- **Le réseau des opérateurs banc d'essai tracteurs** : l'association AILE, la Chambre régionale d'agriculture de Poitou-Charentes, la FRCuma de Bourgogne, la FRCuma Rhône Alpes / Association Top Moteur Sud-Est, la FDCuma des Landes / Top Machine Aquitaine, la FRCuma Languedoc-Roussillon / Pôle Régional Agroéquipement ;
- **Des organismes de développement reconnus pour leurs expertises** : la FNCUMA, Union des Cuma Pays de Loire Section Vendée, Chambre régionale d'agriculture de Bretagne, la Chambre d'agriculture des Deux-Sèvres, TRAME / BCMA ;
- **L'enseignement supérieur spécialisé en agroéquipement** : AgroSup Dijon ;
- **La recherche** : IRSTEA – Unité TSAN ;
- **Les pouvoirs publics** : ADEME, Bureau de la biomasse et de l'énergie/ Direction générale des politiques agricole, agroalimentaire et des territoires /Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt.

1. Mesures de consommations de tracteurs sur banc

Un banc d'essai mobile est un dispositif composé d'un frein auquel est raccordé l'arbre de prise de force d'un tracteur. L'ensemble permet de tester les performances d'un moteur à travers sa capacité à produire du travail mécanique à partir de l'énergie dégagée par la combustion du carburant.

La charge d'un moteur est liée à la pression moyenne effective (PME), rapport entre le travail moteur fourni et la cylindrée sur un cycle. L'intérêt de la PME est de pouvoir comparer des moteurs en s'affranchissant de leur cylindrée. Cette pression est proportionnelle au couple (T) délivré par le moteur, grandeur plus communément utilisée dans les mesures de banc mobile. Pression et couple sont relatifs

à la force à exercer pour assurer le mouvement du véhicule ou des outils. La puissance délivrée par le moteur P est fonction du couple et du régime de rotation (N) du moteur :

$$P = \frac{2\pi}{60} T \cdot N$$

Pendant l'essai, le frein dynamométrique exerce une force de freinage qui charge le moteur tandis que l'opérateur actionne l'accélérateur pour faire varier le régime de rotation. Au cours de l'essai, sont mesurés le régime et le couple délivrés à l'arbre de prise de force ainsi que la consommation de carburant. Plusieurs mesures sont effectuées en différents points de fonctionnement du moteur et le choix des points de mesure dépend du protocole dont quelques éléments sont rappelés ci-dessous.

1.1 Protocole de mesure

L'objectif de l'essai d'un tracteur sur le banc d'essai mobile est le contrôle de la puissance délivrée par le moteur et du bon réglage de ce dernier. Le protocole d'essai conventionnel mis en place pour les mesures sur banc mobile vise à décrire le comportement du moteur pour une charge maximale. Les mesures réalisées au cours d'un essai banc mobile sont donc relatives à la courbe enveloppe (Figure 1). Le nombre de mesures effectué le long de cette courbe est variable, néanmoins, quelques points remarquables peuvent être extraits de cet ensemble de mesures : le point nominal, qui correspond à des préconisations constructeurs (point nominal théorique). On le distingue dans ce qui suit du point nominal « bem », point nominal déterminé expérimentalement par l'opérateur. Les autres points remarquables sont le point à la puissance maximum (Pmax), le point à la puissance maximum pour le régime de rotation normalisé à la prise de force, (Pdfmax) et le point de couple maximum.

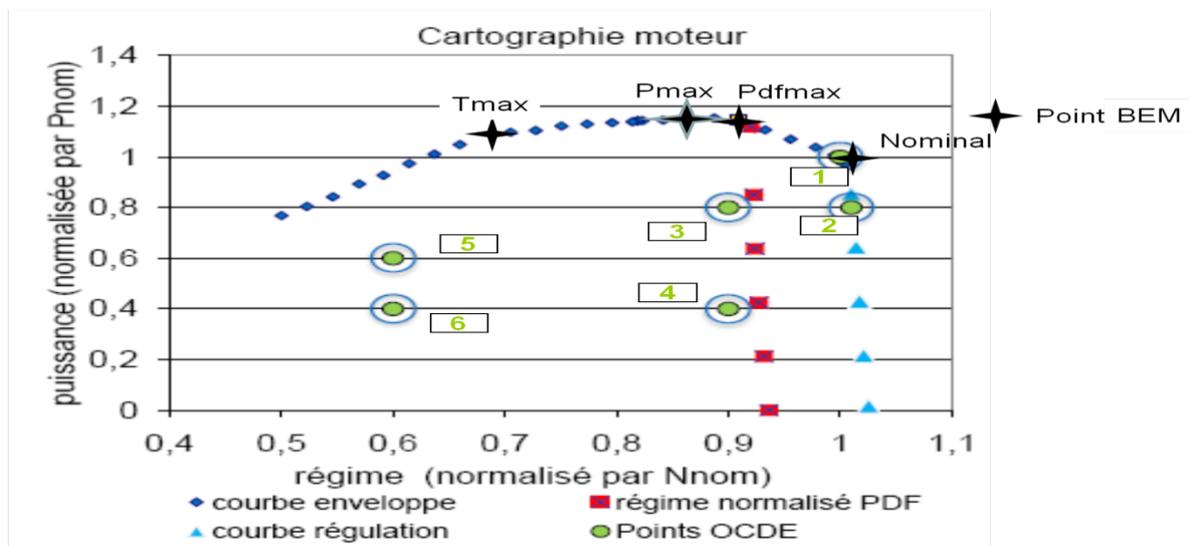


Figure 1 : Cartographie des points de fonctionnement moteur testés dans le protocole BEM (points remarquables en étoile) et points OCDE retenus pour la classification des tracteurs neufs (numérotés et cercles verts) (source AILE)

D'autres points de fonctionnement sont utilisés pour la caractérisation de puissance et de performance des moteurs. Le point (1) est celui obtenu à vitesse nominale du moteur lors de l'essai de la prise de force principale. Ce point est déjà réalisé dans le protocole BEM (Bancs d'Essai Mobiles). Le point (2), à puissance élevée et à vitesse maximale correspond à un travail de traction lourd à la barre. Le point (3), à puissance élevée et à 90% de la vitesse, équivaut à un travail lourd de traction à la barre ou à la prise de force à vitesse normalisée. Le point (4), à faible puissance et à 90% de la vitesse, représente un travail léger à la prise de force ou de traction à la barre. Le point (5), avec une puissance élevée à 60% de la vitesse, simule un travail lourd de traction à la barre ou à la prise de force, soit à des vitesses 'économiques' à la prise de force, soit à des vitesses automatiques du moteur, proches du fonctionnement le plus économique du moteur. Enfin, le point (6), à faible puissance et à 60% de la

vitesse, correspond à un travail léger à la prise de force ou de traction à la barre à des vitesses réduites. Les spécifications plus détaillées concernant la mise en œuvre et les préconisations liées à cet essai figurent dans le Code normalisé de l'OCDE. Ce protocole a fait l'objet d'une transposition pour les bancs d'essai mobiles : une interface d'acquisition spécifique a été développée pour les bancs équipés d'un système de mesure Rotronics. Un format de compte-rendu d'essai a été également proposé de façon à pouvoir intégrer toutes les mesures réalisées selon ce nouveau protocole baptisé protocole à charge partielle. 20 tracteurs d'occasion ont été testés selon ce nouveau protocole et 14 des tracteurs testés disposent aussi d'un essai OCDE pour la version tracteur neuf.

1.2 Base de données relatives aux essais sur banc

Deux bases de données relatives à des essais de tracteurs ont été utilisées au cours de cette étude. La première est une base de données réalisées à partir des essais de tracteurs d'occasion sur banc mobile et la seconde concerne les essais réalisés sur du matériel neuf par les stations d'essai de l'OCDE.

1.2.1 Base de données BEM

Cette base de données a été constituée pour les besoins de l'étude. L'échantillon collecté comporte 1204 tracteurs d'occasion testés sur une période qui s'étale de janvier 2007 à décembre 2008. L'âge moyen des tracteurs testés est de 5.6 ans et la puissance commerciale moyenne des tracteurs testés est de 125 ch. Le nombre d'heures annuelles effectuées par ces tracteurs est relativement indépendant de la puissance. Il varie beaucoup plus nettement en fonction de l'âge du tracteur, passant de 730 heures en moyenne la première année d'immatriculation à 400 heures en moyenne après 20 ans de service.

Dans cet échantillon, 38% des tracteurs testés, soit 462 tracteurs, disposent d'une référence OCDE. Parmi tous ces tracteurs, on ne dispose que des essais OCDE ayant un numéro d'essai supérieur ou égal à 2097. Ainsi, les tracteurs testés sur banc mobile et présentant un essai OCDE disponible dans la base de données OCDE sont finalement au nombre de 225. Nous l'appellerons dans la suite l'échantillon "BEM-OCDE" Ce sous-échantillon présente des valeurs moyennes de puissance et d'âge voisines de l'échantillon total.

Les 14 tracteurs testés au cours de l'étude sur le protocole « charge partielles » et disposant d'un essai OCDE est appelé BEM-CP.

1.2.2 Base de données OCDE

La base de données OCDE comporte 580 rapports d'essai approuvés par le centre de coordination de l'OCDE sur la période 2000-2008. Les essais sont relatifs à des tracteurs neufs testés dans les stations d'essai agréées. Chaque enregistrement comporte l'essai d'un tracteur sur un banc dynamométrique à la prise de force. D'autres informations (tests en traction, dimensions, caractéristiques du matériel) sont également disponibles ; la description de ceux-ci figure dans la classification énergétique des tracteurs agricoles du Cemagref 2009.

2. Indicateurs de performance

2.1 Autres étiquetages et analyse littérature

L'efficacité énergétique de plusieurs produits fait l'objet d'un étiquetage rendu parfois obligatoire par des directives européennes. C'est le cas pour de nombreux appareils ménagers. L'efficacité énergétique de l'appareil est évaluée en termes de *classes d'efficacité énergétique* notées de A (voir A++) à G. La classe A++ est celle au rendement optimal, G la moins efficace. Les étiquettes fournissent également d'autres informations utiles au client, l'aidant dans son choix entre différents modèles. Pour les voitures, ce n'est plus l'efficacité énergétique qui est indiquée dans l'échelle d'appréciation mais le niveau de rejet de CO₂ exprimé en grammes par kilomètre parcouru. L'émission de CO₂ d'un moteur diesel est

néanmoins quasiment proportionnelle à sa consommation de carburant. D'autres étiquetages existent pour des sous-systèmes relatifs au véhicule comme par exemple l'étiquette énergie des pneumatiques. Dans ce cas, l'étiquette énergie s'applique au matériel neuf hors champs de cette étude. Les diagnostics des bancs d'essai tracteur permettent néanmoins d'établir un indicateur de performance propre au matériel d'occasion testé, comme nous allons le voir par la suite.

2.2 Indicateur de performance et informations disponibles

Pour les véhicules légers, les bancs d'essai permettant de documenter la consommation de carburant sont des bancs à rouleaux ; contrairement au tracteur, le dispositif de freinage est appliqué aux roues et non sur l'arbre moteur. Ce dispositif présente l'avantage de pouvoir tester le véhicule sur des cycles de conduite. On dispose alors de valeurs de consommation de carburant par cycle, chaque cycle pouvant représenter une conduite sur route, autoroute...

Pour les moteurs lourds, les méthodes d'essai se limitent à des essais moteurs ou prise de force : un moteur d'engin lourd peut effectivement être monté sur un châssis d'engin de TP ou agricole. Il n'est pas possible de définir un cycle de conduite commun à ces deux utilisations. Pour ces raisons, le service rendu d'un moteur lourd est relatif à l'énergie mécanique produite par le moteur : différents systèmes de conversion sont ensuite utilisés pour convertir cette énergie en énergie de traction, d'animation d'outil ou de levage. Les rendements des systèmes de conversion sont en général plus élevés que le rendement du moteur, principale source de déperdition d'énergie. Aussi, l'indicateur de performance d'un tracteur fait nécessairement intervenir le rendement du moteur. Celui-ci est en fait plus généralement exprimé avec la consommation spécifique de carburant, inverse du rendement :

$$C_{spe} \left(\frac{g}{kWh} \right) = \frac{C \left(\frac{g}{h} \right)}{P(kW)}$$

Une consommation spécifique élevée indique qu'une grande quantité de carburant est nécessaire pour pouvoir produire l'énergie mécanique utile au travail. La consommation spécifique est l'indicateur sur lequel repose la classification des performances énergétiques des tracteurs neufs. On l'utilise également sur les véhicules légers pour apprécier l'évolution des performances des nouveaux moteurs selon les stratégies de down-sizing. Le rendement du moteur n'est pas le seul élément qui influence significativement la consommation de carburant. En effet, les propriétés des pneumatiques, du sol, le rapport de taille entre les outils et le tracteur pèsent largement sur l'efficacité de la machine. L'ensemble de ces paramètres résulte plus d'effets liés à la particularité de l'exploitation que du matériel amené au banc d'essai pour un contrôle d'état. De plus, le test d'un tracteur sur banc mobile permet d'établir la consommation spécifique du tracteur testé. Elle traduit donc la performance du tracteur et valorise ainsi l'essai. Elle se transforme en indicateur par adjonction d'une échelle de notation servant à l'étiquetage. La génération du référentiel d'évaluation se fait à partir des bases de données présentées auparavant.

2.3 Consommation spécifique par usage

Si l'indicateur de performance retenu reste assez classique, le choix des points de fonctionnement retenu dans le calcul de l'indicateur a nourri de nombreux travaux au cours de cette dernière décennie. En effet, il existe différents protocoles d'essai de moteur : les protocoles OCDE et BEM présentés auparavant n'en constituent que des exemples. D'autres, comme le ECE-R24, peuvent s'appliquer à la détermination d'émissions polluantes par exemple. Aussi, des auteurs comme Hansson et al (2006) se sont intéressés au choix des points de fonctionnement et à leur pondération dans une démarche d'évaluation partielle ou globale de l'usage et des performances environnementales du tracteur.

Méthode de l'enveloppe		Méthode CP	
P max	Travaux lourds, traction	Point 2	Travaux lourds, traction
Régime nominal constructeur	Transport sur route	Point 6	Transport sur route
C max	Traction économique	Point 5	Traction économique
Régime normalisé prise de force	Travaux prise de force	Point 3	Travaux prise de force

Tableau 1 : Affectation de points de fonctionnement à la description de l'usage du tracteur, dans la méthode de l'enveloppe à gauche et dans la méthode des charges partielle à droite

Les points d'essai utilisés à charge partielle ont été introduits dans le code de l'OCDE pour représenter des usages : il semble donc naturel de les utiliser pour une décomposition des usages. Ceci est fait en proposant la méthode des charges partielles (méthode CP). Dans cette méthode, chaque point de fonctionnement représente un usage particulier du tracteur : quatre usages sont retenus. Ainsi, la consommation spécifique correspondant à chaque point peut être retenue comme indicateur d'un usage en particulier. Le problème de la méthode CP est qu'on ne dispose pas d'une base de données de mesure très importante pour les points à charge partielle. De plus, le protocole de mesures des points à charge partielle s'avère très lourd à mettre en œuvre sur les bancs d'essai mobiles. Aussi, une seconde méthode est proposée et ne porte que sur les points de fonctionnement testés dans le cadre du protocole BEM.

3. Résultats

3.1 *Elaboration du référentiel*

Dans un premier temps, on calcule la consommation spécifique des tracteurs testés au banc (BEM) ; on utilise le point nominal pour ce calcul. Mais on montre que la détermination expérimentale de ce point de fonctionnement est difficile. Aussi, les mesures BEM surestiment les puissances et consommations des tracteurs dans ce point de fonctionnement. L'utilisation des valeurs fournies dans le Tracto-guide est une base de référence plus sûre que la méthode expérimentale. Cependant cette information peut manquer, notamment pour les tracteurs les plus récents. En l'état actuel, ce point ne peut être retenu comme base de classification. La consommation spécifique est alors calculée pour le point de fonctionnement à la puissance maximum. Ce point se détermine facilement à l'issue de l'essai sur banc et en l'absence de toute donnée extérieure. On compare ces valeurs à celles mesurées pour les tracteurs par les stations d'essai correspondantes (Figure 2).

Les consommations spécifiques des tracteurs de très faible puissance (<50 kW) présentent des valeurs en moyenne plus élevées dans le dispositif BEM : l'écart est attribué à une incertitude de mesure plus importante sur ces petites valeurs et à la difficulté de mesure sur le terrain. On ne retient donc dans le dispositif que les tracteurs de plus de 50 kW.

Les consommations spécifiques dépendent de la puissance nominale du tracteur et on utilise la relation fournie par Gil-Sierra et al (2007) pour déterminer la courbe de régression caractéristique du comportement moyen d'un tracteur (Figure 2). La courbe de régression obtenue sur l'échantillon BEM (courbe rouge) est parfaitement similaire à celle obtenue pour les tracteurs testés dans le dispositif OCDE (courbe bleue).

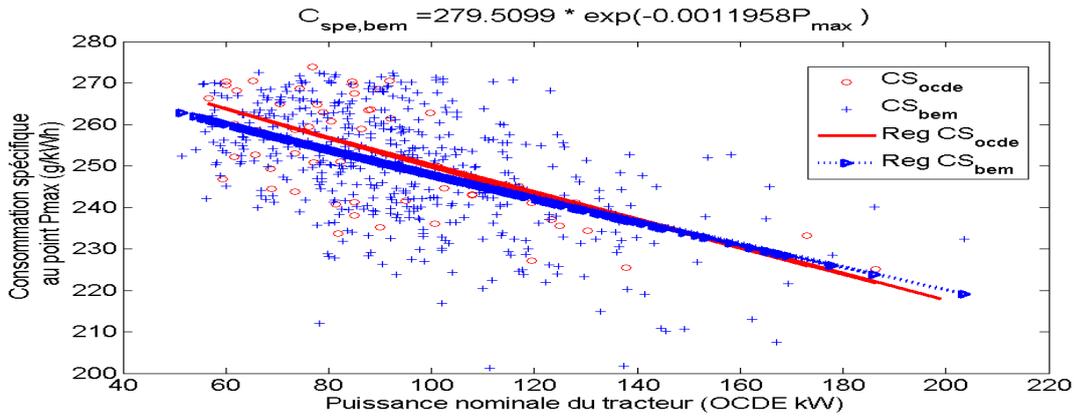


Figure 2 : Consommations spécifiques des tracteurs en fonction de la puissance nominale de leurs moteurs

On observe aussi que les mesures BEM réalisées sur des tracteurs n'ayant pas de référence présentent une variabilité plus grande que pour celles dont l'opérateur dispose d'une valeur de référence.

La Figure 3 montre l'évolution des caractéristiques moteur selon l'âge du tracteur testé : au delà de 6 ans, les échantillons testés et comparables deviennent trop petits pour être étudiés. Sur les 6 premières années, aucune tendance significative ne peut être observée en faveur d'une perte de puissance ou d'une dérive de la consommation de carburant. Le régime de puissance maximum présente des fluctuations aussi importantes que les autres variables. Ainsi, le régime de puissance maximum pourrait ainsi se trouver décalé à gauche ou à droite du point d'origine, rendant sans conséquence ce décalage sur la puissance maximum disponible.

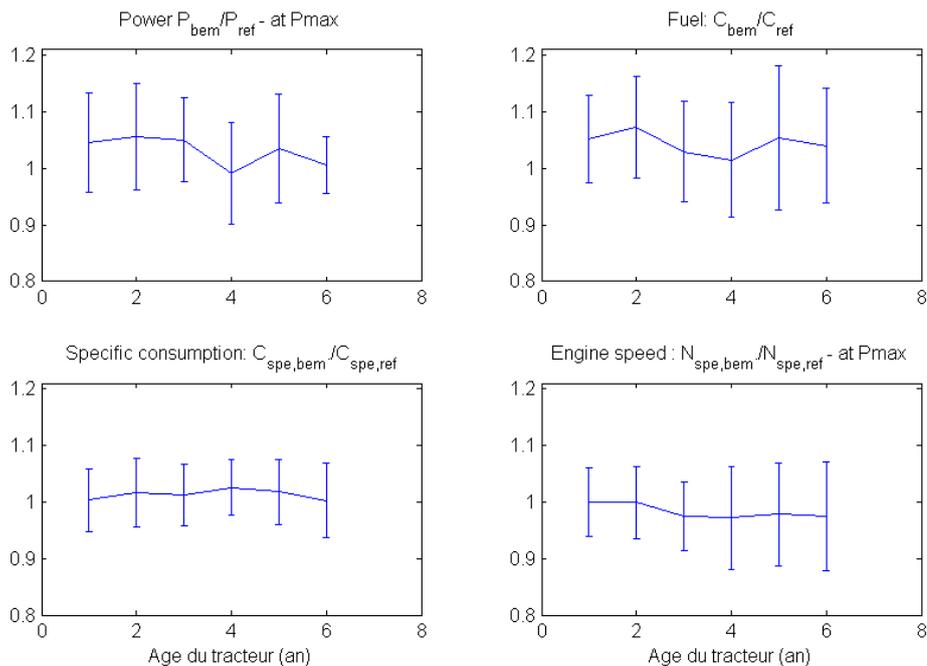


Figure 3 : Effet du vieillissement sur le moteur: comparaison par classe d'âge des puissances(P), consommations de carburant(C), consommations spécifiques (Cs) et régimes (N) mesurés sur le matériel d'occasion par rapport aux valeurs des essais de référence en laboratoire.

La variabilité des mesures effectuées sur plusieurs bancs pour un même modèle de tracteur a été testée. Deux modèles de tracteur sont retenus : le Ares 697 et le Fendt 714 (

Tableau 2). Sur ces tracteurs, les mesures ont été réalisées sur plusieurs bancs, rendus anonymes et auxquels correspond un numéro de groupe. Pour chaque groupe, plusieurs mesures de la consommation spécifique à la puissance maximum ont été réalisées et le tableau présente les valeurs moyennes et les variances de chaque échantillon.

		<i>Nombre</i>			
	<i>Groupes</i>	<i>d'échantillons</i>	<i>Somme</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Variance</i>
Ares 697	1	6	1728	288	2474
	2	12	3218	268	93
	3	9	2527	281	42
	4	7	1850	264	185
Fendt 714 - Tier 3	1	11	2796	255	654
	2	4	992	248	218
	3	2	492	246	18

Tableau 2 : Mesures des consommations spécifiques (g/kWh) réalisées sur les tracteurs

L'analyse des variances est effectuée pour chacun des modèles. Les scores obtenus avec le test de Fisher permettent de conclure qu'il n'existe pas de différences significatives des moyennes mesurées entre les différents groupes au risque de 5%. On en conclut ainsi à l'absence d'un effet lié au banc d'essai utilisé sur le terrain.

3.2 Classification de la consommation spécifique

Les consommations et puissances mesurées dans le dispositif BEM sont en moyenne équivalentes à celles mesurées dans le dispositif OCDE : on montre qu'on peut établir une courbe de référence qui fait correspondre une consommation spécifique de référence à une puissance de tracteur donné. Cette courbe de référence est identique qu'on travaille avec un échantillon de mesure "OCDE" ou "BEM." Cette observation indique qu'une courbe de référence établie dans le cadre du dispositif OCDE sur les points à charge partielle pourrait aussi être utilisée comme référentiel dans le dispositif BEM. L'effet de vieillissement des tracteurs (dérive de la consommation en fonction de l'âge) n'a pas été observé.

Les tracteurs testés faisant moins de 50 kW ne doivent pas entrer dans le dispositif de classification car les mesures les concernant semblent entachées d'une incertitude trop importante.

La variabilité des mesures de consommation et puissance est très importante. Elle est liée au propos même du test et aux conditions d'essai difficiles. Même si on utilise une courbe de référence identique pour classer les tracteurs neufs et d'occasion, les bornes de chacun des dispositifs ne peuvent être identiques.

L'élaboration du label consiste à porter une appréciation sur l'indice de performance du tracteur. Cette étape repose sur l'analyse statistique des indices de performances. A partir de tous les indices des tracteurs essayés, on définit un indice "moyen" qui constitue la valeur de référence (performance moyenne) ; on définit également les écarts minimum et maximum à la moyenne. On choisit ensuite un certain nombre de classes de performance et l'intervalle est découpé en fonction du nombre de classes retenues dans l'approche. Les éléments réunis jusqu'ici nous permettent de construire une méthodologie de classification adaptée aux tracteurs d'occasion. On en présente ici le déroulement et le calcul de la note globale de classification.

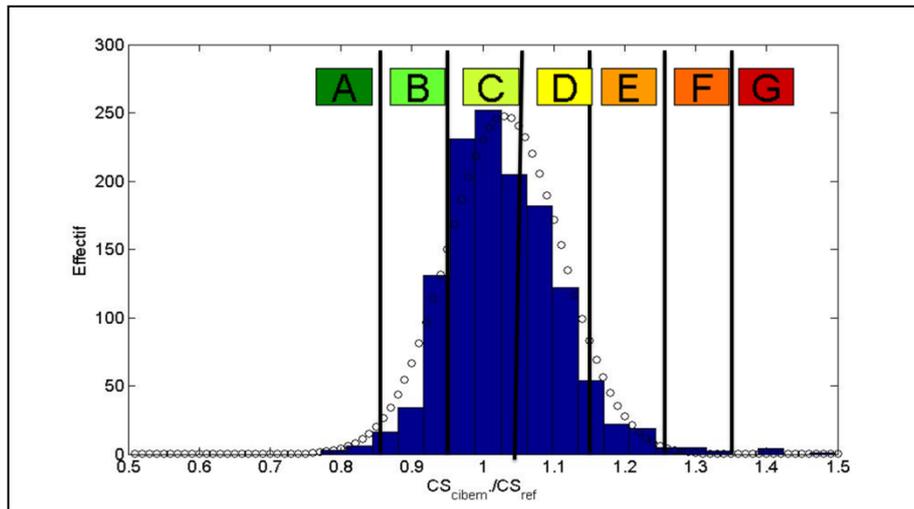


Figure 4 : Distribution des tracteurs en fonction des classes d'indices proposées

La classification d'un tracteur s'opère après l'essai traditionnel. Les tracteurs de moins de 50 kW sont exclus. Les tracteurs jugés défectueux sont exclus.

On extrait de la série de mesures le point pour lequel la puissance à la prise de force est maximale. Pour ce point, on détermine la consommation spécifique CS_{pmax}

On détermine la valeur de référence correspondant à ce tracteur, selon la relation :

$$CS_{ref} = 280. \exp (- 0.0011958 * P_{max}) \quad (\text{Équation 1})$$

Dans cette formule, P est exprimé en kW et la consommation spécifique de référence en g/kWh. On calcule alors l'indice de classification du tracteur par la relation :

$$CIBEM = CS_{pmax} / CS_{ref} \quad (\text{Équation 2})$$

L'indice de classification est rapporté à des bornes. Le choix a été de retenir 7 classes. Les bornes sont fixées de façon à limiter l'effectif des classes A et G. Les bornes ont été révisées en cours de projet en fonction du retour d'expérience formulé par les opérateurs de banc d'essai mobile et sont détaillées dans le Tableau 3.

Y figurent les valeurs retenues à l'issue du projet. L'indice CIBEM permet ainsi de positionner l'efficacité énergétique à la prise de force du tracteur testé en référence à un tracteur moyen de même puissance.

	Bornes						
Si le CIBEM est inférieur à	0,85	0,95	1,05	1,15	1,25	1,35	
Si le CIBEM est supérieur à		0.85	0,95	1,05	1,15	1,25	1,35
Notation	A	B	C	D	E	F	G

Tableau 3 : Borne inférieure et supérieure des valeurs de CIBEM définissant l'échelle de notation de la méthode de classification des tracteurs d'occasion.

3.3 Analyses par usage

3.3.1 Comparaison des méthodes proposées pour les usages

On calcule pour chacune des deux méthodes par usage les consommations spécifiques des tracteurs de l'échantillon OCDE. Pour chaque type d'usage, on représente la performance par une barre centrée autour de la moyenne et de largeur 2 fois l'écart-type des valeurs (Figure 5). La moyenne obtenue diffère pour chaque usage. L'utilisation d'un même référentiel de notation conduira donc à des notes plus élevées pour le travail en traction que pour le transport (méthode enveloppe). La méthode CP conduit à une notation généralement plus sévère que la méthode enveloppe. Dans la méthode enveloppe, les consommations spécifiques sont élevées pour le travail en traction et diminuent pour le travail à la prise de force et le transport : le comportement est donc au rebours de ce que nous attendions, avec un rendement amélioré dans les points à charge partielle.

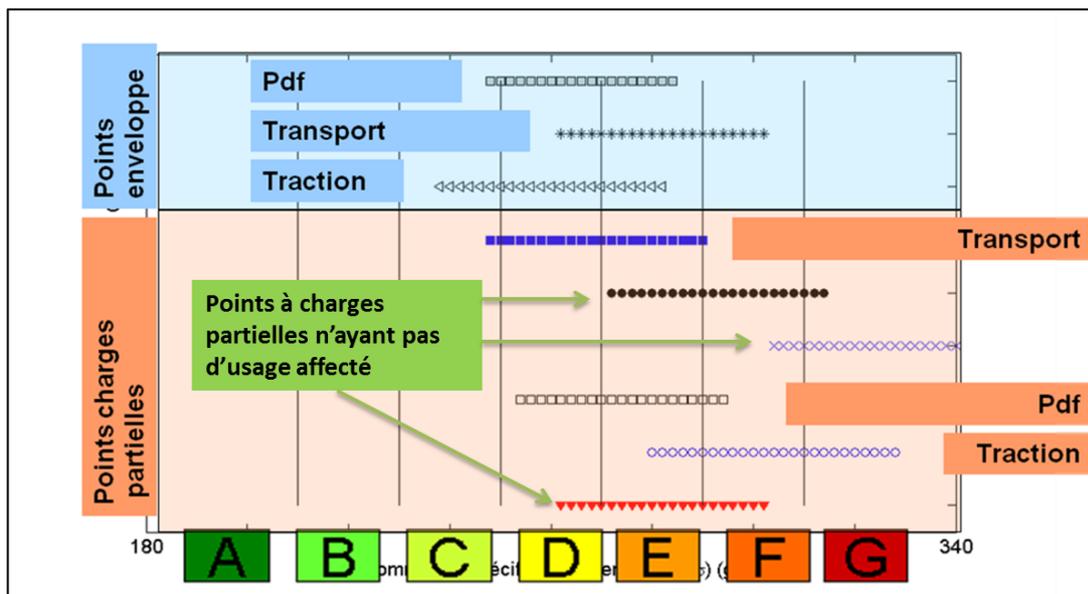


Figure 5 : Position des consommations spécifiques moyennes correspondant à chaque type d'usage.

Pour le volet transport, la méthode d'évaluation reste très fragile. En effet, le transport se caractérise par un fonctionnement du moteur plus dynamique, dans lequel les inerties ont un effet plus sensible sur la consommation. En outre, le rendement de transmission se détériore lorsque les vitesses de déplacement augmentent. La méthode d'essai OCDE ne fournit pas d'éléments sur ces effets, ni sur les valeurs des rendements de transmission pour des vitesses d'avancement élevées. Pour cet usage, il serait également pertinent de ramener l'évaluation de la performance au kilomètre parcouru plutôt qu'à la quantité d'énergie mécanique produite. La méthode enveloppe conduit à un système d'évaluation par usage très différent. Le choix des points d'essai ne reposant pas sur des bases solides, il convient d'éviter de l'utiliser.

3.3.2 Le besoin de connaissance des usages

La prise en compte des usages dans le conseil nécessite de caractériser ces usages. En effet, la grande variété des opérations agricoles réalisées par les tracteurs des agriculteurs multipliée par l'hétérogénéité des contextes pédoclimatiques et des structures d'exploitation rend cette prise en compte quasi impossible si on n'en maîtrise pas les éléments caractéristiques.

La caractérisation des usages passe par une connaissance fine des opérations agricoles. Le projet Ecofuel (Pôle agronomie des chambres d'agriculture de Bretagne) vise à enregistrer les données principales de l'usage des tracteurs tout au long de leur fonctionnement. Un équipement d'acquisition de

données à installer sur les tracteurs suivis a ainsi été développé. Les informations relevées sont la position GPS, l'altitude, le régime moteur, la consommation de carburant, la vitesse d'avancement et d'autres informations (marche avant ou arrière, fonctionnement de la prise de force, hauteur de relevage, pont avant, présence du chauffeur, outil utilisé). Ces informations sont enregistrées toutes les secondes. Ainsi, chaque seconde, nous savons où est le tracteur, quel est l'outil attelé, quelles sont ses consommations de carburant et de puissance ainsi que les conditions d'usage du tracteur. 29 automoteurs dont 24 tracteurs ont été instrumentés pendant 12 à 15 mois. La base de données contient actuellement 15 000 heures de fonctionnement.

3.4 Des données fines sur les chantiers

Les données permettent, à l'échelle d'un chantier, de définir précisément les conditions d'usage (dont les rendements de chantier), les consommations de carburant ainsi que les puissances consommées. L'usage réel du tracteur en fonctionnement est précisé (travail/non travail) et les potentiels d'optimisation sont ainsi plus faciles à quantifier.

Prenons l'exemple d'une opération de travail du sol et semis combiné réalisée par un tracteur de 140 chevaux utilisé avec une herse rotative et semoir de 3 mètres. Sur la photo aérienne (Figure 6), les points de fonctionnement sont placés. En analysant la hauteur de relevage, on peut séparer les phases où le tracteur sème (relevage en bas) des phases de manœuvre (relevage en haut). En parallèle, on peut ensuite visualiser sur la cartographie de puissance à droite, le profil de mission en séparant les temps de manœuvre (en bleu) et les temps de semis proprement dit (en noir).

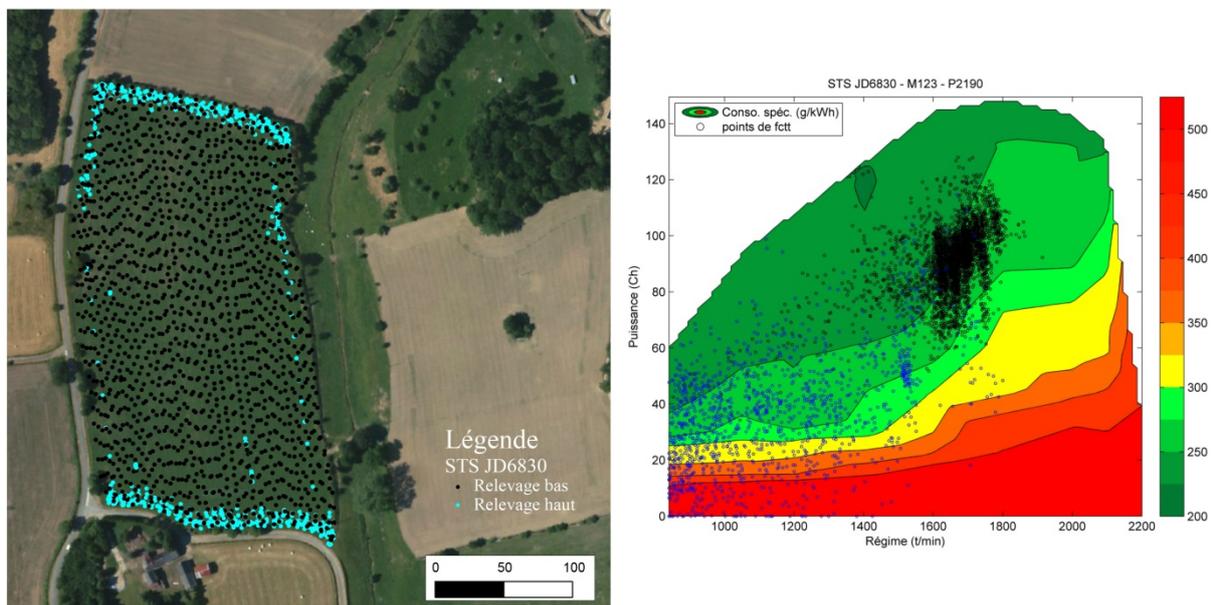


Figure 6 : Résultat d'un chantier de semis combiné avec cartographies du chantier et des puissances consommées.

Dans cet exemple, le besoin de puissance lors du travail proprement dit est compris entre 80 et 120 chevaux. Les régimes moteurs sont assez faibles et la prise de force économique a été mise en œuvre, ce qui a permis des économies de carburant. Une réelle marge de puissance existe et le tracteur n'est donc pas en limite de puissance pour cet usage pourtant réputé exigeant en puissance. En clair, le renouvellement de ce tracteur par un plus puissant n'apporterait pas de performance supplémentaire mais très probablement une surconsommation de carburant.

3.3.3 Vers un diagnostic d'exploitation sur la consommation de carburant

L'analyse des différents chantiers liés à une exploitation permet de mettre en contexte cette exploitation (combien consomme-t-elle à l'implantation de ses cultures par exemple ?). L'objectif ensuite est de quantifier les différents gains potentiels selon les leviers disponibles (changement pour un tracteur plus performant, évolution du mode de conduite, adéquation tracteur outil en puissance, réduction du poste transport et déplacement ...). La répartition des gains selon ces leviers donne un aperçu du potentiel de chaque levier dans le contexte de l'exploitation.

Pour un des tracteurs du projet, on peut mettre en évidence un potentiel d'économie allant jusqu'à 30% de la consommation annuelle et fonction des leviers d'actions mis en œuvre. A terme, l'objectif est de modéliser ces données de façon à créer un diagnostic d'exploitation sur la consommation de carburant.

3.5 Des outils pour la promotion de la classification

La diffusion de la méthode de classification et son appropriation par les agriculteurs, conseillers agricoles et concessionnaires constituent un enjeu fort pour le projet.

Afin de comprendre les leviers à mobiliser pour changer les comportements d'achat d'un tracteur, une enquête a été réalisée auprès des agriculteurs. L'objectif était d'identifier les acteurs intervenant dans le conseil à l'investissement, les pratiques d'achat, et également le vocabulaire utilisé par les agriculteurs pour échanger sur la consommation énergétique de leur exploitation. Le traitement de cette enquête a mis en évidence la place prépondérante des constructeurs et concessionnaires dans la phase de conseil à l'investissement. L'enjeu de les faire adhérer à la démarche est donc d'autant plus important. Un plan de communication spécifique à destination des constructeurs et concessionnaires a été élaboré. Il porte d'une part sur la réalisation et l'édition d'une plaquette présentant la méthode, les avantages pour un concessionnaire d'utiliser cette démarche : nouveau service au client, nouvel argument commercial pour la revente de matériels d'occasion... D'autre part, une journée de présentation et de déploiement de la méthode dans les réseaux de concessionnaires a été bâtie. Elle doit être mise en œuvre courant 2013.

Pour les agriculteurs, sur chaque rapport de diagnostic produit, une étiquette énergétique du tracteur sera apposée. La méthode sera expliquée par les opérateurs des bancs d'essai tracteur, premier levier fort de diffusion et de sensibilisation. Pour appuyer cette démarche, une plaquette de présentation de l'action Banc d'essai tracteur et de la classification a été produite. Elle sera diffusée à 5 000 exemplaires dans un premier temps.

Conclusion

Deux bases de données ont été regroupées pour étudier les consommations spécifiques des moteurs de tracteurs : l'une comporte des données relatives à des essais de moteurs réalisés sur des tracteurs d'occasion, la seconde comprend des tests plus détaillés réalisés en laboratoire d'essai sur du matériel neuf. Après avoir décrit les mesures et protocoles utilisés au cours de ces essais, on précise le contenu de ces bases. Certains enregistrements ont constitué en propre un volet du projet sur l'extension des protocoles d'essais de matériels neufs vers le matériel d'occasion.

Dans un second temps, on examine les grandeurs et méthodes mises en œuvre dans différents systèmes de classification énergétique. On met en évidence l'intérêt de la consommation spécifique mesurée au cours de l'essai moteur comme indicateur de consommation. Relatif au principal poste de perte d'énergie d'un tracteur, le moteur fait l'objet d'une vérification d'état grâce au test sur banc mobile. L'étiquetage individuel, sans référence aux caractéristiques d'origine, permet ainsi d'en attester l'état à l'issue de l'essai.

Grâce aux mesures de consommation et de puissance réalisées sur ces bancs, nous avons pu montrer que les valeurs de consommations spécifiques des tracteurs d'occasion sont analogues en moyenne à

celles obtenues sur les bancs d'essai du dispositif OCDE. Les écarts avec les valeurs de référence sont par contre très marqués. La plage des consommations spécifiques mesurées sur le terrain est, de ce fait, plus large et appelle un référentiel spécifique pour les essais réalisés sur le terrain. La variabilité des mesures entre les différents bancs n'est pas significative. Un certain nombre de précautions à prendre lors des essais résulte de ces analyses. L'une d'elles concerne les essais réalisés sur des tracteurs de très faible puissance pour lesquels les incertitudes de mesure font qu'ils ne sont pas inclus dans le dispositif de classification. Un indicateur de classification Cibem est proposé.

Il repose sur la détermination de la consommation spécifique à la puissance maximum : ce choix permet de s'affranchir de l'existence d'un rapport d'essai OCDE pour le tracteur testé. L'indice est calculé à partir de la performance moyenne d'un tracteur de même puissance : il permet de situer le tracteur par rapport à sa catégorie. Des analyses ont par ailleurs montré l'absence d'effet significatif de l'âge du tracteur sur les consommations spécifiques. Ensuite, on s'intéresse aux performances en relation avec l'usage des tracteurs. Au cours du projet, les opérateurs de bancs d'essai mobiles ont réalisé des essais sur des points de fonctionnement à charge partielle. L'introduction de ces points d'essai supplémentaires a été accompagnée d'une mise à jour harmonisée des interfaces de pilotage des bancs d'essai. Le temps additionnel associé à ces essais à charges partielles constitue cependant encore un frein à la systématisation de ce passage. Les mesures obtenues sur les charges partielles présentent une qualité au moins analogue à celles réalisées sur la courbe enveloppe. Ceci autorise donc l'exploitation de ces points dans un diagnostic affiné de l'usage. Deux systèmes de classification ont été proposés pour détailler le diagnostic par usage. Les discussions autour de l'usage ont permis également de mettre en lumière le besoin d'un outil diagnostic de consommation plutôt que d'un indicateur de performance. Différentes actions conduites par les acteurs de ce projet permettraient de répondre à ce besoin que le projet « classification des tracteurs d'occasion » a permis de formaliser plus clairement.

Remerciements

L'association AILE a fourni les résultats d'essais sur banc mobile et nous l'en remercions. Nous souhaitons également adresser de vifs remerciements à tous les opérateurs et partenaires techniques et institutionnels ayant participé à ces travaux.

Références bibliographiques

- Gil-Sierra J., Ortiz-Canavate J., Gil-Quiros V., Casanova-Kindelan J., 2007. Energy efficiency in agricultural tractors: a methodology for their classification. *Applied Engineering in Agriculture* **32**, 145-150.
- Hansson P.A., Lindgren M., Noren, O., 2006. A Comparison between Different Methods of calculating Average Engine Emissions for Agricultural Tractors. *Biosystems Engineering* **93**, 107-118.
- Koniuszy A., 2008. Usability analysis of static load cycles for assessment of tractor engine operation economy. *TEKA Kom. Mot. Energ. Roln*, **8**, 107-113.
- Krahl M.J., Bahadir A.M., Schumacher L. 1996. Survey about biodiesel exhaust emissions and their environmental effects. *Proceedings of the third liquid fuel conference ASAE, USA*, 136-148.
- Lacour S., Langle T., 2009. Classification énergétique des tracteurs agricoles - mise au point d'une méthodologie de classification. Cemagref, Antony. p. 22.
- OCDE, 2009. Code normalisé de l'OCDE pour les essais officiels de performance des tracteurs agricoles et forestiers. in *Code 2.*, OCDE.