

## Analyses des consommations énergétiques des tracteurs en usage réel : application aux chantiers d'épandage

**Afin de réduire la facture énergétique de l'agriculture, il faut pouvoir améliorer l'efficacité des machines utilisées, mais aussi celle des méthodes de productions agricoles. À partir d'une campagne d'expérimentations sur le travail d'épandage, les auteurs nous montrent ici comment produire des indicateurs pertinents pour évaluer la performance énergétique d'une opération agricole.**



La facture de carburant du secteur agricole dépend à la fois de l'efficacité des machines utilisées en agriculture et de l'efficacité des méthodes de productions agricoles. Les gisements d'économie relèvent autant de la logistique de travail que de la performance des machines. À travers l'exemple de l'épandage, on montre combien il est en fait très difficile de dissocier l'organisation de l'équipement. En effet, des mesures de terrain sont réalisées afin de quantifier la consommation de carburant et les émissions polluantes des tracteurs associées à des travaux d'épandage (figure 1). On mesure également le temps consacré aux différentes opérations réalisées pour épandre des boues de stations d'épuration (STEP). On compare ainsi l'efficacité énergétique d'automoteurs spécialisés et de différents couples tracteurs/épandeurs. Cette campagne d'expérimentation nous permet aussi de produire des indicateurs pour comparer l'intérêt de différents matériaux épandus : des boues sous différents états (solides, liquides) et d'autres produits organiques (fumier, lisier). Ces profils de mission permettent de mieux rendre compte de l'usage réel d'un tracteur et peuvent être utilisés dans des analyses en cycle de vie (ACV) afin d'identifier les leviers d'amélioration de la performance énergétique sur certaines opérations agricoles. Ils apportent également un éclairage sur les temps consacrés à l'opération, indicateur utilisé pour représenter la performance de travail.

### L'identification des différentes phases de travail

L'étude réalisée se base sur les données acquises dans le cadre du projet ECODEFI (Eco-conception et développement de méthodologies de fabrication innovante

de machines d'épandage, Projet ANR PRECODD). Les données de terrain ont été recueillies sur six sites expérimentaux répartis à travers la France. Les sites varient entre eux par le type de boues épandues (liquide, pâteux, solide), mais aussi le type d'équipement utilisé (épandeur rampe à pendillards, épandeur à hérisson verticaux, auto-moteur). Chaque site dispose donc d'un tracteur équipé d'une centrale d'acquisition qui permet d'acquérir un ensemble d'informations sur les vitesses d'avancement, consommations, régimes et températures du moteur. Les données ont été recueillies pendant plus d'un an et représentent l'équivalent de deux mille heures de travail, dont près de mille heures de chantiers d'épandage.

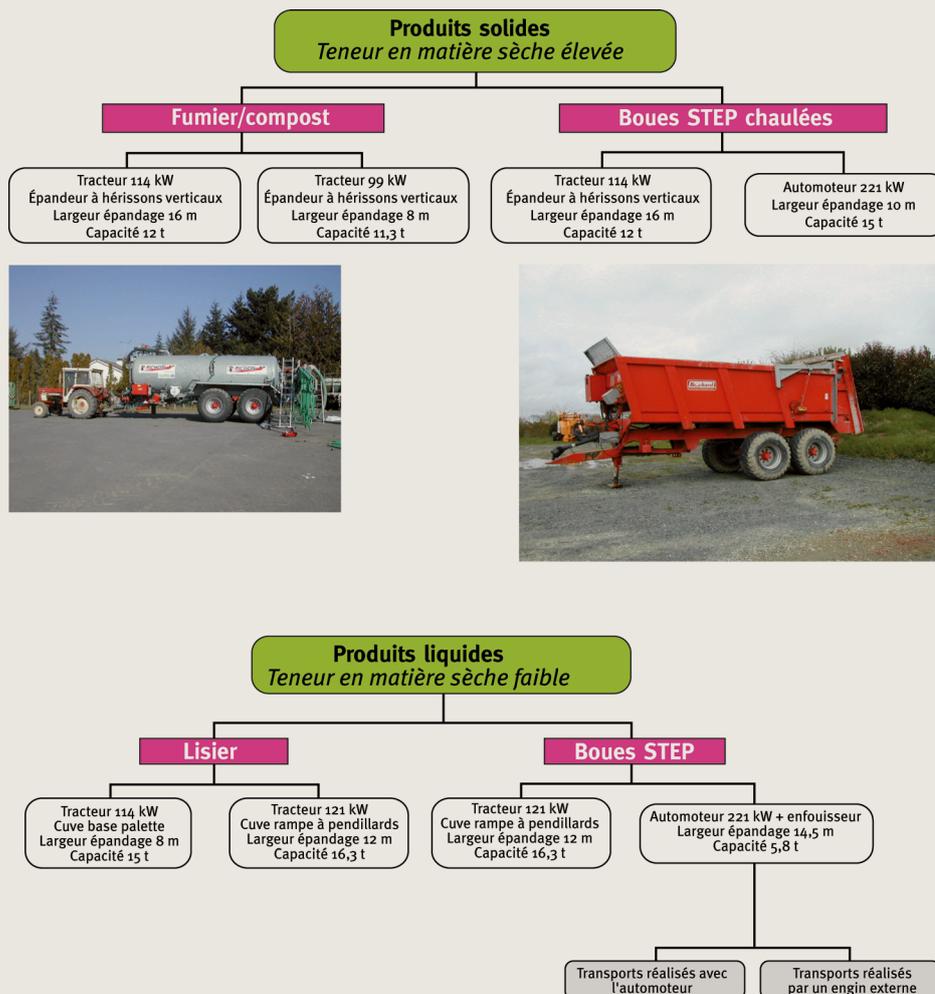
Le recoupement des enregistrements avec les carnets d'utilisation des tracteurs permet d'identifier les journées consacrées à l'épandage. La création d'un programme, spécifique à chaque site, permet alors d'automatiser l'extraction et l'analyse des données souhaitées. Pour chaque tâche d'épandage, l'opérateur réalise une succession de sous-tâches : remplissage de la cuve, transport de la station à la parcelle, épandage sur parcelle, retour à la station d'épuration. Chacune de ces sous-tâches est identifiable à partir des caractéristiques de fonctionnement de l'engin : régime moteur, vitesse d'avancement, écart-type de la demande de puissance...

L'analyse des données des centrales d'acquisition permet de quantifier la consommation en carburant associée à chaque sous-tâche. Les durées de travail et distances parcourues sont également précisées afin de disposer de l'ensemble des indicateurs susceptibles d'intervenir dans une approche de développement durable de l'épandage. Ceci nous permet d'établir un profil de mission moyen, qui varie en fonction du type de boue et/ou de la machine agricole utilisée.

❶ Campagne d'expérimentation pour mesurer les durées, consommations de carburant et paramètres de fonctionnement du moteur pendant des journées dédiées à l'épandage de produits organiques.



© G. Vaitilingom



### Un poids du « transport » lourd pour l'épandage de boues de STEP

On montre ainsi que dans le cas des boues de station d'épuration, une part importante de l'énergie dépensée est associée au transport des matières de la station à la parcelle. L'énergie dépensée à la parcelle est faible dans le bilan global et certains paramètres, tels que le glissement, ont de ce fait un faible impact sur les résultats. Par contre, l'influence de la vitesse de transport et de la masse transportée a pu être mise en évidence et les tendances observées rejoignent les analyses détaillées de Juostas (2008).

En effet, le transport représente près de 70 % du temps consacré à l'épandage d'une cuve et 75 % de l'énergie dépensée. Dans près de 80 % des cas, l'agriculteur va chercher les boues à la station d'épuration avec le tracteur. Sachant que les stations d'épuration ne sont pas forcément placées à proximité des parcelles (Feyrin, 2004), la consommation devient rapidement importante. La consommation pour un couple tracteur-épandeur est proche de 1 l/km parcouru avec une cuve pleine et 0,7 l/km avec la même cuve, mais vide.

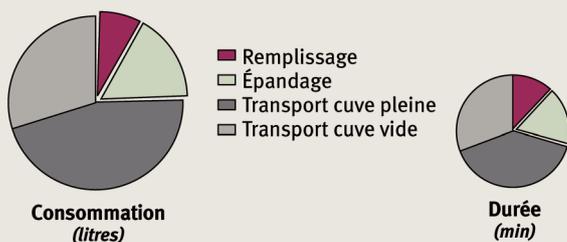
Pour réduire la consommation d'énergie pour cette opération agricole, une solution serait d'utiliser un camion pour l'acheminement des boues à la parcelle. Dans ce cas, le tracteur n'est employé que pour la phase d'épandage, ce qui permet de réduire la consommation liée au transport

des boues jusqu'à la parcelle. Ainsi, pour un chantier d'épandage de boues de STEP, l'utilisation d'un camion 28 tonnes permettrait de réduire le nombre de voyages entre la station d'épuration car le volume transporté par voyage est plus important : les nombres de voyages et de kilomètres parcourus seraient ainsi réduits. En outre, la consommation kilométrique du camion est d'environ 0,5 l/km et donc inférieure à celle du tracteur : la consommation associée à chaque voyage serait ainsi diminuée. Avec ce scénario, la réduction de la consommation sur le chantier d'épandage pourrait ainsi atteindre 50 %.

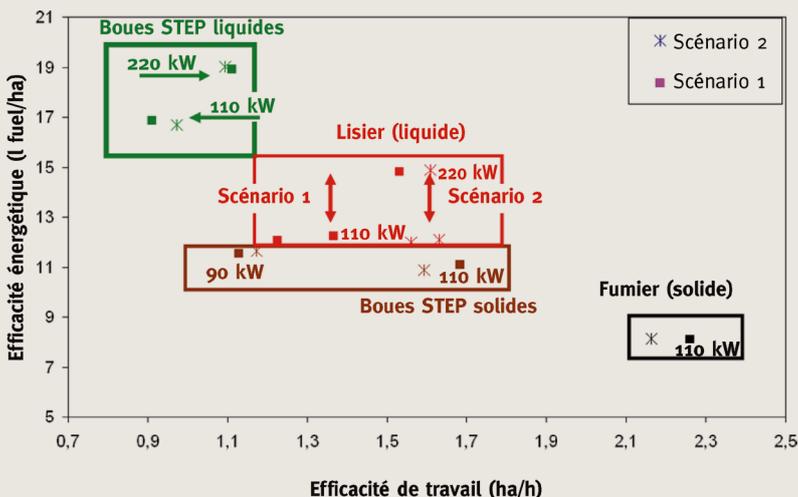
### Construction de scénario pour l'analyse ACV des opérations d'épandage

Les données expérimentales sont ensuite utilisées pour élaborer les budgets d'énergie et de temps pour les épandages de matières organiques. Dans le cadre de l'ACV, on fixe les doses à l'hectare à appliquer, qui est l'unité fonctionnelle retenue dans l'analyse (Pradel, 2008). Ainsi, pour les produits organiques liquides, le taux d'application retenu est de 1,6 t MS (tonnes de matières sèches) pour les produits liquides à l'hectare (boues de STEP et lisiers), tandis qu'il est de 4 t MS pour les boues STEP solides, et enfin de 7 t MS pour les fumiers. Le budget temps et énergie correspondant à ce dosage est alors recalculé à partir des observations de terrain en se basant sur les hypothèses suivantes.

## 2 Bilan de la consommation de carburants pendant les différentes phases de l'épandage de produit solides.



## 3 Efficacité de travail et énergétique pour l'épandage de produits organiques.



Dans le scénario 1, on conserve la vitesse d'avancement mesurée sur le terrain et on adapte le débit de l'épandeur à la dose souhaitée ; dans le scénario 2, on conserve le débit d'épandeur mesuré sur le terrain et on fait varier la vitesse d'avancement du tracteur pour obtenir la dose souhaitée. Entre les deux scénarios, énergie et temps ne se répartissent pas de la même façon et dépendent de la vitesse à laquelle sont effectués les travaux.

► Pour la composante transport, la distance moyenne parcourue est la moyenne des distances observées, tous sites confondus : cette distance est de 3,5 km pour les fumiers et lisiers tandis qu'elle passe à 4,2 km pour les produits des stations d'épuration, solides ou liquides.

La vitesse moyenne pratiquée est un élément très sensible du budget. Au cours du projet, il n'a pas été possible de fournir des éléments susceptibles d'expliquer les vitesses pratiquées en fonction des sites, des comportements de conduites ou de la puissance du tracteur utilisé. Aussi, on utilise dans les scénarios la vitesse moyenne observée sur le terrain pour chaque couple tracteur/épandeur.

Le remplissage des épandeurs est compté pour tous les produits liquides car le pompage est réalisé à partir du tracteur instrumenté. On dispose donc des éléments nécessaires pour estimer les durées et les consommations relatives à cette phase. Pour les produits solides, le remplissage de l'épandeur n'est pas pris en compte car il est réalisé par une autre machine.

Pour la partie épandage sur parcelle, les taux d'application observés pendant la campagne ont été très hétérogènes. Les bilans d'énergie et de temps doivent être recalculés avec les taux d'application imposés dans l'ACV. Pour cela, nous travaillons avec deux hypothèses possibles :

- dans le premier cas (scénario 1), la vitesse d'avancement est identique à celle mesurée lors de la campagne

mais le débit de l'épandeur est modifié afin d'apporter la bonne dose à l'hectare. Dans ce cas, la puissance demandée aux roues reste constante, mais la puissance demandée au moteur pour l'entraînement de la pompe et/ou des hérissons de l'épandeur varient ;

- dans le second cas (scénario 2), on suppose que l'épandeur est réglé avec le débit mesuré (kg/min) pendant la campagne d'expérimentation, mais la vitesse d'avancement du tracteur est modifiée pour assurer la dose souhaitée. Ce scénario revient à modifier la demande de puissance en traction (aux roues) sans toucher à la demande de puissance pour la pompe et/ou les hérissons de l'épandeur.

Ainsi, pour chacun de ces scénarios, la puissance demandée au moteur du tracteur diffère et on calcule la consommation associée à chaque cas en fonction des rendements extraits des données de terrain. Dans ce calcul, pour les produits liquides, la répartition entre les besoins en traction et les besoins pour la pompe dérivent des comparaisons remplissage/épandage. Pour les produits solides, on les estime à partir de mesures des couples de tractions réalisés sur le site de Montoldre. La durée des phases d'épandages pour chacun des scénarios est calculée en fonction du temps nécessaire à vider la totalité du réservoir de produit organique et dépend du débit de la pompe. Le modèle de simulation nous permet alors d'avoir du temps et de l'énergie (tableau 1) pour l'épandage d'une cuve de produits organiques dérivés de l'exploitation.

### Budget carburant et temps pour les épandages de produits organiques

Pour l'ensemble des scénarios utilisés dans l'ACV, on représente les budgets énergie et temps sur la figure 3. On remarque que dans le cas des boues liquides (en vert), l'efficacité de travail est pénalisée par le transport, car les distances parcourues ne sont importantes que dans le cas des lisiers. Cet effet joue autant sur le temps consacré à épandre un hectare que sur la consommation d'énergie. Pour ces effluents, on remarque que la mobilisation de la puissance du moteur se traduit par une efficacité énergétique moindre, mais une efficacité de travail améliorée. Toutefois, il convient de relativiser la surconsommation observée car les travaux réalisés par le moteur de 220 kW incluent l'enfouissement du lisier, généralement simultanément réalisé pendant l'épandage, ce qui n'est pas le cas dans l'autre situation. Pour les lisiers, *a contrario* des boues liquides, la consommation énergétique à l'hectare diminue tandis que l'efficacité du travail augmente : c'est la conséquence de la diminution de la distance parcourue entre la zone de stockage de produit et la parcelle. On observe aussi une augmentation de la consommation de carburant et une amélioration de l'efficacité de travail pour la machine la plus puissante. Enfin, on observe une différence assez sensible entre les deux scénarios proposés, quelle que soit la machine étudiée. Cette différence intervient surtout dans le temps consacré à l'épandage, alors que la quantité de carburant change peu d'un scénario sur l'autre. Les scénarios les plus intéressants sont donc les scénarios pour lesquels on a augmenté la vitesse d'avancement.

❶ Exemple des résultats de simulation des budgets énergie-temps consacré à l'épandage de produits organiques produits sur l'exploitation (scénario 1).

	Solide (fumier/compost)		Liquide (lisier)		
Dose épandue (tMS/ha)	7		1,6		
Type de tracteur	Renault 145.14	JD 6930	JD 7430	Terragator 2104	JD 6930
Puissance moteur (kW)	99	114	121	221	114
Capacité épandeur (t)	11,25	12	16,3	14,5	15
Largeur épandage (m)	8	16	12	5,8	8
Distance moyenne site de stockage/parcelle	3,5				
Surface par cuve (ha)	0,58	0,60	0,82	0,73	0,75
Durée par cuve (min)	29,4	22,6	31,3	27,0	27,6
Consommation par cuve (litres)	6,70	6,53	9,76	10,8	9,0
Rendement chantier (ha/h)	1,17	1,59	1,56	1,61	1,63
Consommation par hectare (l/ha)	11,6	10,9	12,0	14,9	12,1

Pour les produits solides, les quantités de temps et de carburant nécessaires à l'épandage des boues de STEP sont légèrement inférieures à celles du lisier. L'apport fertilisant est cependant très différent compte tenu des écarts de doses en matières sèche, qui sont respectivement de 1,6 t MS/ha pour le lisier et de 4 t MS/ha pour les boues. On observe une forte hétérogénéité des durées d'épandage associées à chacun des sites. Cette différence s'explique par le mode de conduite des tracteurs : l'un est conduit avec les plus faibles taux de charge moteur enregistrés tandis que l'autre correspond au plus fort des taux de charge observés.

### Conclusion

Une importante campagne de mesure a permis de constituer une base de données descriptive de l'utilisation d'un tracteur lors des opérations d'épandage des produits organiques fertilisants. Cette base de données a permis de mettre au point des indicateurs de durée, distance, consommations énergétiques et émissions polluantes associés aux chantiers d'épandage. Elle a servi à l'élaboration de scénarii d'épandage pour mener à bien des analyses en cycle de vie du processus épandage, en fonction du matériel agricole utilisé et du type de produit épandu. Les données recueillies font ressortir l'importance des phases de transport sur la consommation globale lors d'un chantier. Une solution proposée pour diminuer la consommation énergétique est de modifier l'organisation logistique du chantier en amenant la matière à épandre par camions, ces derniers présentant souvent des capacités supérieures et un impact environnemental moindre pour le transport. D'autres analyses ont également été réalisées pour comparer les coûts ou les intérêts environnementaux des différents automoteurs et de certaines technologies des dispositifs d'épandage au regard des différentes substances à épandre.

L'analyse en cycle de vie de machines agricole permet d'aborder le fonctionnement de la machine dans un contexte temporel élargi qui impose une approche plus statistique de l'usage des tracteurs et justifie des campagnes d'expérimentations. Nous avons pu observer que les méthodes utilisés dans les outils d'ACV pour caractériser

les consommations des tracteurs agricoles présentent des défauts. Elles ne permettent pas de comprendre les liens qui existent entre la puissance des machines et la durée de leur utilisation. Des études complémentaires sont donc lancées pour mieux appréhender les taux de charge de ces machines et leurs liens avec le comportement de conduite d'une part, et la durée des opérations d'autre part. ■

### Les auteurs

#### Stéphanie LACOUR et Yves GALIÈGUE

Irstea, centre d'Antony, UR TSAN,  
Technologies pour la sécurité  
et les performances des agroéquipements/CNAM-EA 21,  
1 rue Pierre Gilles de Gennes, CS 10030, 92761 Antony  
✉ [stephanie.lacour@irstea.fr](mailto:stephanie.lacour@irstea.fr)  
✉ [yves.galiegue@irstea.fr](mailto:yves.galiegue@irstea.fr)

#### Pierre GUISCAFRÉ

FNCUMA, Fédération nationale des coopératives d'utilisation  
de matériel agricole,  
49 avenue de la Grande Armée, 75116 Paris  
✉ [pierre.guiscafre@cuma.fr](mailto:pierre.guiscafre@cuma.fr)

#### Gilles VAITILINGOM

CIRAD, PERSYST, TA B-42/16,  
73 rue Jean-François Breton, 34398 Montpellier Cedex  
✉ [vaitilingom@cirad.fr](mailto:vaitilingom@cirad.fr)

#### Pascal HIGELIN

Université d'Orléans, 8 rue Léonard de Vinci, 45074 Orléans Cedex 2  
✉ [Pascal.Higelin@univ-orleans.fr](mailto:Pascal.Higelin@univ-orleans.fr)

### QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- 📖 FEYRIN, B., 2004, Étude des pratiques agricoles de boues de station d'épuration municipales en Auvergne, Limousin, 155 p.
- 📖 JUOSTAS, A., JANULEVIUS, A., 2008, Investigation of tractor engine power and economical working condition utilisation during operation transport, *Transport*, n° 23(1), p. 37-43.
- 📖 PRADEL, M., THIRION, F., 2008, Life Cycle Assessment (LCA) applied to agricultural land spreading : a new environmental approach for improving fertilisation, in : *International Conference on Agricultural Engineering Crete*.