

Vers des machines d'épandage plus respectueuses de l'environnement : conception et mise en place d'indicateurs de performance

En matière de performance technique des machines d'épandage, des marges de progrès existent pour améliorer leur impact environnemental. Quelles sont-elles et comment les repérer ?

Comment concilier l'inconciliable ?

La vocation première de l'agriculture est de subvenir aux besoins alimentaires de la population et cette situation est d'autant plus actuelle que les besoins sont toujours croissants. Il faut aujourd'hui optimiser la production et favoriser le rendement et en même temps, prendre des mesures pour arriver à un système d'agriculture durable à terme, comme l'incitent les conclusions du Grenelle Environnement (Ministère chargé de l'écologie, 2007).

Au travers des mesures proposées comme la mise en place de démarches de certification environnementales, la réduction des pollutions diffuses, la restauration de la biodiversité et la formation des agriculteurs, il est intéressant de voir quels sont les critères à évaluer sur une machine d'épandage et comment, à partir de ces critères, il est possible d'évaluer un système complet (et complexe) au niveau environnemental.

Diverses études montrent qu'un système dont les interactions sont multiples avec le milieu environnant peut être évalué en ayant recours à la méthode d'analyse de cycle de vie (ACV). Cette méthode analyse les flux entrants et sortants à partir de données codifiées la plupart dans l'industrie et l'automobile. Peu de données sont disponibles en agriculture et encore moins

en épandage. On se propose donc, dans cette étude, de définir des indicateurs technologiques de performance environnementale pertinents pour les machines d'épandage et de les utiliser en lien avec la méthode ACV pour dresser un bilan environnemental global des techniques d'épandage (Thirion, 2006 ; Pradel et Thirion, 2008).

La réponse aux objectifs de rendement et l'optimisation de la production étant directement liées à l'utilisation des fertilisants, les agriculteurs prennent de plus en plus conscience de l'intérêt de valoriser les engrais organiques, plus économiques et écologiques. Contrairement aux épandeurs d'engrais minéraux, d'importantes marges de manœuvre existent encore pour améliorer les performances techniques et environnementales des machines d'épandage de produits organiques solides (Rousselet et Mazoyer, 2006a), fortement conditionnées par le type de produit épandu.

Des préliminaires (Rousselet et Mazoyer, 2006b) ont déjà permis de positionner la qualité environnementale des épandeurs de produits solides à partir des résultats directement issus des normes européennes et de méthodes d'essais normalisées. La recherche de nouveaux indicateurs permettra d'élargir le champ d'investigation des risques environnementaux générés par les machines d'épandages liquides et solides.

1 DÉFINITION DES TERMES EMPLOYÉS

La définition des principaux termes utilisés concerne la caractérisation des machines d'épandage au sens de leur impact environnemental. Les définitions s'appliquent aux machines d'épandages du périmètre précité : épandeurs de fumier, de compost et de boues de stations d'épuration. L'impact environnemental de ces machines est caractérisé par des critères de performances environnementales se traduisant au niveau de la machine par des indicateurs de performances technologiques.

Critère

Le critère de performance environnementale est un principe ou un élément que l'on considère pour évaluer, analyser et juger la performance environnementale d'une machine d'épandage. Le critère peut être le résultat de la combinaison mathématique d'un ou plusieurs paramètres et ou de résultats de la machine.

Indicateur technologique

L'indicateur technologique est la valeur chiffrée d'un critère défini. Cette valeur permet de comparer deux machines entre elles sur un même critère. Elle ne permet pas de comparer deux critères entre eux, chaque critère ayant une échelle de notation indépendante.

L'indicateur technologique est donc la note indiquant la valeur au sens environnemental de la machine, pour un critère donné. Plus la note est élevée, meilleure est la machine. Cette note varie de 0 à 10. Un indicateur technologique peut être obtenu à partir de mesures quantitatives adaptées à certains critères. Il peut aussi être obtenu de manière qualitative pour d'autres critères. En cas de calcul, l'indicateur prend la valeur arrondie la plus proche de celle auquel il se rapporte.

Indicateur de service rendu

L'indicateur de service rendu agrège plusieurs indicateurs technologiques avec une pondération différente des indicateurs selon leur impact dans le service rendu. Par exemple, le service rendu répartition sera obtenu en combinant les divers indicateurs technologiques de répartition, symétrie, forme, coefficient de variation, avec une pondération plus forte pour le coefficient de variation qui est le plus impactant.

Les différents éléments qui permettent de constituer le périmètre de l'étude tiennent compte des fonctionnalités de la machine au chargement, au transport et en épandage. On considérera donc en premier la machine d'épandage comme étant le cœur du système, pour élargir la zone vers les types de produits solides et liquides, et considérer ensuite les effets de la machine dans la parcelle, au transport et au chargement.

Les essais des machines d'épandage avec différents types de produits solides et liquides ont fait l'objet d'une collaboration avec la station des Cormiers. Les machines d'épandage des produits solides ont été étudiées au Cemagref de Montoldre et celles des produits liquides à la station des Cormiers. On présentera les indicateurs conçus pour les épandeurs de produits solides, la démarche étant la même pour les épandeurs de produits liquides.

Pour discriminer les machines d'épandage, classées en deux catégories selon les matières à épandre, solides (épandeurs de fumiers, de compost et de boues) et liquides (épandeurs de lisier), plusieurs critères impactants sont définis en rapport à la fonction épandage. Celle-ci est considérée au sens large, en incluant à la fois le char-

gement du produit dans l'épandeur et le transport du produit sur le chantier d'épandage. Chaque critère est défini à dire d'experts, puis analysé en tenant compte de l'état de l'art des techniques actuelles et futures en cas d'apparitions de nouvelles techniques innovantes.

Analyse de l'épandage : de la machine à la parcelle

Pour définir les critères impactant sur l'environnement, nous avons décomposé ce qui constitue le travail d'épandage. Ainsi, lors d'un chantier, au moins deux machines sont en action en plus de l'épandeur: le chargeur et le tracteur assurant la traction et l'entraînement de l'épandeur. Nous ne traiterons ici que de l'épandeur.

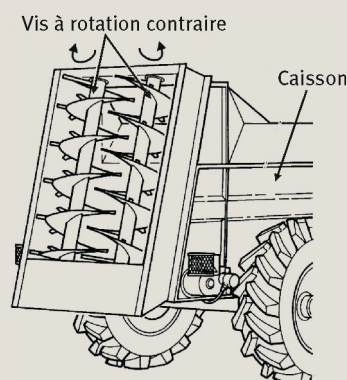
Concernant l'épandeur, sa construction mécanique et sa robustesse doivent être prises en compte au niveau de l'impact environnemental. Ce matériel demande une quantité de matière première importante, en revanche un matériel robuste aura une durée de vie plus longue et sera remplacé plus tard.

La présence d'équipements complémentaires comme une porte, un dispositif de contrôle et de réglage de la vitesse du fond mouvant sont des indicateurs à prendre en compte car ils contribuent à la maîtrise de la dose. La documentation de base, les tableaux de réglages ou les abaques de calcul sont des points positifs pour favoriser l'usage de la machine dans les meilleures conditions. Des efforts sont constatés dans ce domaine chez plusieurs constructeurs.

2 QU'EST-CE QU'UN ÉPANDEUR ?

Un épandeur est une remorque agricole lourde surtout constituée d'acier. Son poids à vide est compris entre trois et six tonnes et sa charge utile est de l'ordre de six à quinze tonnes. C'est une remorque équipée d'un système d'évacuation à fond mouvant et d'un système d'épandage à hérissons verticaux (figure 1) ou à table d'épandage, ces systèmes étant animés par des transmissions mécaniques ou hydrauliques. La machine est en contact avec le sol à l'aide d'un ou deux essieux. Elle est attelée au tracteur par une flèche d'attelage munie d'un anneau. Les pneumatiques sont souvent de grands diamètres, avec des largeurs d'environ 0,5 m qui augmentent sur des modèles à « basse pression ».

1 Épandeur à hérissons verticaux

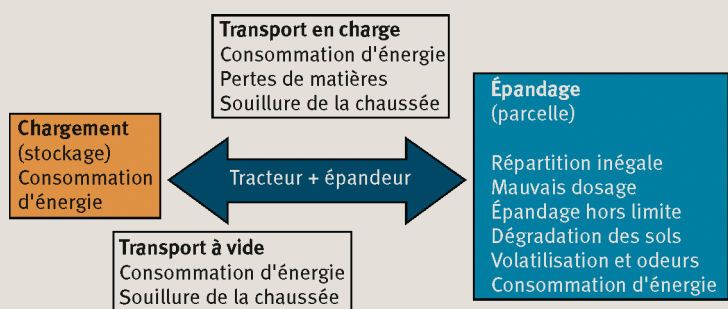


► Le travail d'épandage peut se décomposer en plusieurs phases successives :

- le chargement de l'épandeur,
- le transport sur la parcelle et le retour au lieu de chargement,
- l'épandage dans la parcelle.

Dans chacune des phases, se déroulent des actions en lien avec le milieu naturel. Il s'agit donc de définir des critères au regard de notre expertise. Une première analyse permet de lister des éléments ayant un impact sur l'environnement (figure 2).

2 Liens entre fonctions d'épandage et impacts environnementaux



Le chargement de la machine peut avoir des conséquences néfastes, un excès de chargement entraînant des pertes de produits pendant le transport ou provoquant des surdosages à l'épandage.

Les transports en charge et à vide sont consommateurs d'énergie et il faut les relier à la productivité et à l'efficacité du chantier. La propreté des transports est un facteur impactant l'environnement mais, avec une porte étanche et sans rouler sur les parties épandues, on évite de souiller la chaussée.

La phase épandage, analysée selon les critères normatifs de répartition, doit être associée à la notion de dose dont l'impact environnemental est important. Pour appliquer la juste dose, d'importants progrès restent à réaliser. L'impact au sol peut avoir des effets négatifs en termes de tassement et d'orniérage d'autant que les charges transportées sont en augmentation avec la taille des exploitations.

Les critères des normes EN 13080 et EN 13406 et les mesures au Cemob

Les normes NF EN 13080 Épandeurs de fumier (Afnor a) et NF EN 13406 Épandeur de lisier et dispositifs d'épandage (Afnor b) précisent les conditions d'essais de ces machines et les critères pour la protection de l'environnement. Elles sont l'outil de base pour qualifier le travail d'une machine. Elles introduisent deux notions distinctes pour qualifier la répartition des produits à l'épandage : les répartitions longitudinale et transversale (encadré 3).

Pour répondre aux besoins d'essais et de recherche pour les constructeurs d'épandeurs et les prescripteurs, le Cemagref s'est doté d'une installation d'essais très performante, le Cemob, qui permet de réaliser les mesures des répartitions longitudinales et transversales simultanément :

- un double pont bascule instrumenté, sur lequel sont positionnés le tracteur et l'épandeur chargé, sert à établir la répartition longitudinale ;
- un ensemble de trois poutres mobiles, d'une largeur totale de 31 m, supportant 62 bacs de collecte instrumentés de capteurs de pesée pour établir la répartition transversale.

Ce banc permet de générer les nappes d'épandage, en deux ou trois dimensions (figure 3), de l'épandeur.

3 RÉPARTITION LONGITUDINALE ET RÉPARTITION TRANSVERSALE

Les normes EN 13080 et EN 13406 introduisent deux notions distinctes pour qualifier la répartition des produits à l'épandage : les répartitions longitudinale et transversale.

La régularité de la répartition transversale

Objet : la répartition transversale est la façon selon laquelle le produit est réparti au sol de part et d'autre de l'axe d'avancement de l'épandeur. Elle dépend aussi de la largeur de travail et du recouvrement adopté entre chaque passage.

Mesure : cette répartition est obtenue par la pesée du fumier recueilli dans des bacs de collecte de dimensions 0,5 m x 0,50 m, jointifs entre eux.

Calcul : le coefficient de variation (CV), rapport de l'écart-type à la moyenne des masses dans chaque bac, est calculé pour toutes les largeurs de travail comprises entre la largeur de la machine et la largeur totale de projection. Le calcul du CV est réalisé après recouvrement des nappes d'épandages en va-et-vient et en circulaire. Le CV minimal correspond à la largeur de travail optimale.

Seuil de la norme EN 13080 : la norme exige de ne pas dépasser un CV de 30 %.

La régularité de la distribution longitudinale

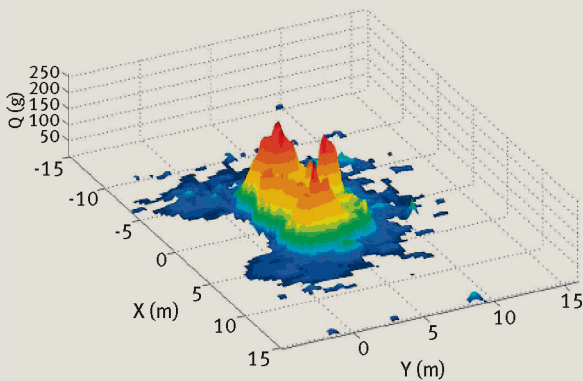
Objet : la répartition longitudinale représente l'évolution du débit de la machine pendant le temps de déchargement. Le temps de déchargement est celui nécessaire pour vider 95 % de la masse chargée.

Méthode de mesure : l'ensemble tracteur-épandeur est pesé en continu pendant la vidange complète de l'épandeur et les pesées sont enregistrées à la fréquence de 2 Hz. Elles permettent d'obtenir l'évolution du poids en fonction du temps de déchargement. La dérivée de cette fonction donne le débit.

Méthode de calcul : les données obtenues, moyennées et filtrées (filtre de Butterworth), servent au calcul du coefficient de variation (CV), et de l'étendue dans la zone de tolérance (EzT). La zone de tolérance est comprise entre - 15 % et + 15 % du débit caractéristique, débit moyen le plus élevé sur 30 % du temps de déchargement. L'étendue est la durée où le débit est dans la zone de tolérance.

Seuil de la norme EN 13080 : la norme exige de ne pas dépasser un CV de 40 %. L'étendue dans la zone de tolérance doit être supérieure à 35 % du temps de déchargement.

3 Caractéristique de répartition de la nappe d'épandage



Étudier la répartition des produits dans la parcelle

La recherche de critères et d'indicateurs spécifiques

La répartition au sol des produits doit être étudiée finement afin de mettre en lumière des hétérogénéités d'épandage. Pour la répartition transversale, la norme propose un critère que nous prenons bien sûr en compte : le CV de répartition transversale. Ce critère est traduit en indicateur technologique. Pour la répartition longitudinale, deux critères existent : l'étendue dans la zone de tolérance et le CV de répartition longitudinale.

Même si ce critère est prépondérant, il peut être complété par d'autres. Nous proposons divers indicateurs complémentaires. Il peut s'agir d'indicateurs qualitatifs établis à partir d'une appréciation ou bien d'indicateurs quantitatifs issus d'un calcul à partir du critère. Par exemple, il semble opportun de prendre en compte la variation du CV lorsque la largeur de travail varie. Un CV qui sera stable sur une plage assez grande plus ou moins deux mètres, par exemple) indiquera que le conducteur peut dévier légèrement de sa trajectoire sans pour autant affecter la répartition transversale du produit.

Concernant l'épandage en bordure, il est possible que l'appareil soit pourvu d'un dispositif adapté. De fait, avec ce matériel, il est plus facile d'épandre une dose correcte en bordure. L'indicateur de bordure aura donc une bonne note si le matériel d'épandage est équipé d'un tel système.

Le tableau 1 synthétise les indicateurs recensés en lien avec la répartition du produit.

L'indicateur quantitatif

Un indicateur quantitatif est basé sur un résultat de mesure. Nous prenons ici le cas du CV de répartition transversale. Ce dernier doit être conçu pour noter favorablement un faible CV et défavorablement un CV proche du seuil ou bien au-delà du seuil de la norme fixé à 30 %. En pratique, les mesures réalisées évoluent entre 15 et 40 %.

L'indicateur est établi en convertissant le CV dont la plage d'évolution est fixée de 4 à 40 % vers la plage de notation de l'indicateur de 1 à 10. La formule suivante est adoptée :

$$I_{\text{indicateur}} = 11 - (0,25 \times \text{CV})$$

Le tableau 2 donne l'évolution en fonction du critère. Cette formule discrimine les bons matériels des moins bons. En effet, avec un CV inférieur ou égal à 15 %, la machine se voit attribuer une note de 7 à 10 points tandis que celle qui est juste à la norme (CV de 30 %) a 3 points. L'attribution de la note se fera donc de manière proportionnelle à la valeur du CV.

L'indicateur qualitatif

L'indicateur qualitatif, quant à lui, est basé soit sur l'appréciation d'un résultat, soit sur la présence ou non d'un équipement favorable. Ensuite, pour chaque point, nous constituons une échelle qui balaye les possibilités offertes sur les machines allant du pire à la meilleure des possibilités. Au regard de cette échelle de critère de type qualitatif, nous construisons l'indicateur correspondant.

La forme générale de la répartition transversale est en elle-même une information synthétique sur la qualité de l'épandage. Cette forme peut être classée suivant trois types (forme en M, en triangle ou en trapèze). Elle peut être prise

1 Indicateurs technologiques de répartition transversale et longitudinale

Répartitions	Critère /indicateur	Norme	Nouveau	Indicateur. quantitatif	Indicateur. qualitatif
Transversale	CV transversal	x		x	
	CV transversal optimal		x	x	
	Forme de la courbe		x		x
	Symétrie		x	x	
	Robustesse du CV		x		
	Bordure		x	x	
Longitudinale	Tronçonnement		x		x
	EZT	x		x	
	CV longitudinal	x		x	
	Recouvrement	x		x	
	CV après recouvrement		x	x	
	Pertes		x		
	Forme de la nappe d'épandage		x		x
	Rayon de la nappe d'épandage		x	x	

2 Évolution de l'indicateur en fonction du critère coefficient de variation (CV)

	Seuil de la norme									
	↓									
Critère (CV %)	32	28	24	20	16	12	10	8	4	
Note de l'indicateur	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

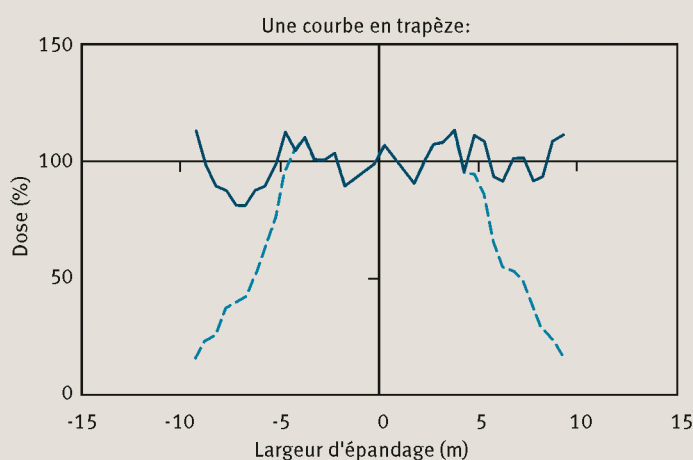
4 Trois types de forme de répartition transversale

en compte sous la forme d'un critère qualitatif. Ce critère est basé sur une appréciation visuelle du graphe de répartition transversale. Les trois formes identifiées sont représentées et commentées sur la figure 4.

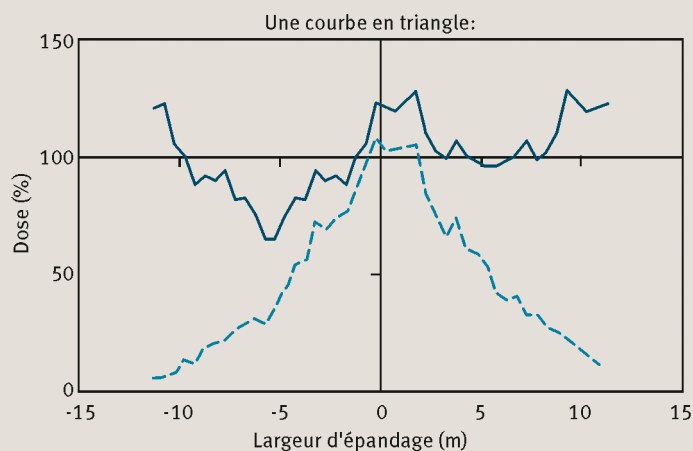
Les nouveaux indicateurs créés sont liés à la préoccupation de la dose, à la précision des réglages et à la documentation, ainsi qu'à la conception. Ils ont été identifiés pour pallier aux manques de la norme, notamment concernant la dose (ajustement...). Un indicateur permettant de quantifier la dose obtenue par rapport à la dose que l'on souhaite apporter ou dose objectif est indispensable. Ils ont été créés de manière à répondre à deux questions : comment qualifier les moyens mis à disposition pour effectuer le réglage de la dose et avec quelle précision ? Quels sont les accessoires, dispositifs qui permettent d'offrir une bonne régularité de la dose au cours de l'épandage ?

Concernant l'impact de la machine sur le sol, un indicateur simple a été créé de façon à évaluer la quantité de matière transportée par rapport à celle mise en œuvre pour la transporter. Des indicateurs de tassement du sol et de puissance – rendement mécanique – seront créés par les experts du travail du sol et en énergétique.

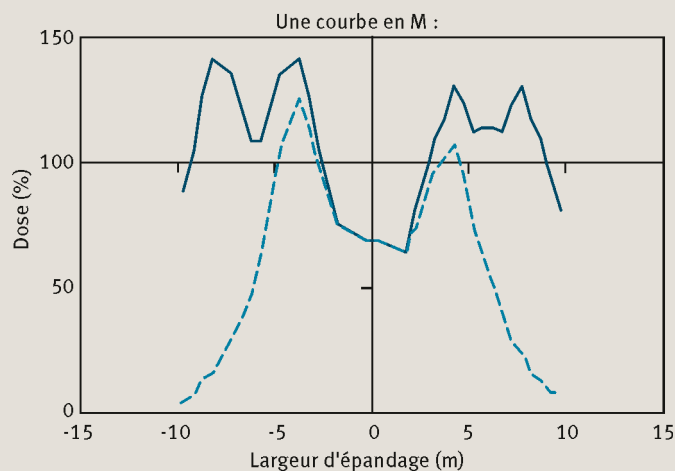
Nous avons identifié vingt-deux indicateurs concernant les épandeurs de fumier. La liste succincte des critères et des indicateurs correspondants est présentée dans le



Il s'agit de la meilleure forme que l'on puisse obtenir. Elle nécessite un faible recouvrement entre passages. Elle est propice à l'obtention de faible CV. Les largeurs de travail sont plus grandes. L'épandage en bordure de parcelle présente un sous-dosage sur une petite largeur. La note de l'indicateur est fixée à 10.



Cette forme est intermédiaire. Elle nécessite un fort recouvrement entre passages qui réduit les largeurs de travail. Il est difficile d'obtenir un faible CV. L'épandage en bordure de parcelle présente un sous-dosage sur une large bande. La note de l'indicateur est fixée à 6.



Cette forme est la moins bonne. Elle traduit un sous-dosage marqué dans l'axe de travail. Le recouvrement entre deux passages accentue les variations de répartition. Il est impossible d'obtenir un CV correct. La note de l'indicateur est fixée à 2.

3 Indicateurs technologiques de dosage, fractionnement et conception

	Critère /indicateur	Norme	Nouveau	Indicateur quantitatif	Indicateur qualitatif
Dosage	Essai dose		x	x	
	Vitesse fond mouvant		x		x
	Porte de dosage		x		x
	Documentation		x		x
	DPA		x		x
	Tronçonnement		x		x
Fractionnement	Émiettement		x	x	
	Paquets		x	x	
	Largeurs de projection		x	x	
Conception	Masse		x	x	

tableau 4. Pour plus de clarté, ils sont répertoriés suivant les types d'impacts correspondants. Au stade de l'étude actuelle, nous traiterons ici uniquement des indicateurs en lien direct avec la machine et l'épandage. Ainsi, nous ne parlerons pas des critères et indicateurs sur le tassement et l'orniérage des sols, ni sur la puissance et l'efficacité des machines.

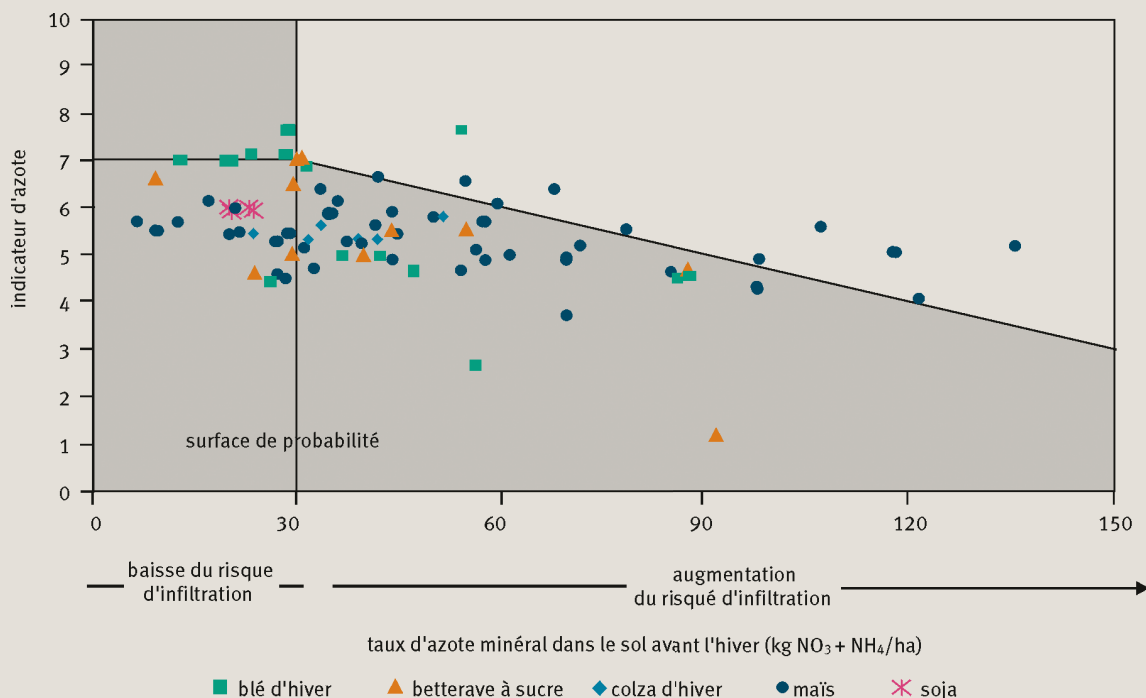
Valider les indicateurs : une étape nécessaire

État des lieux et méthode employée

La validation est une étape décisive dans l'évaluation de la qualité d'un indicateur (Bockstaller et Girardin, 2003). Un indicateur sera donc validé s'il est conçu scientifiquement, si l'information qu'il fournit est pertinente, s'il est utile et utilisé par les destinataires finaux. Trois étapes dans la validation des indicateurs sont proposées par ces auteurs :

- validation de la structure de l'indicateur : **test de sensibilité**, qui consiste à soumettre la structure ou la construction de l'indicateur à un panel d'expert et à faire une sélection des variables à mesurer comme indicateur par des jugements d'experts ;
- validation des résultats de l'indicateur : utiliser un **test de probabilité** en parallèle d'un test graphique pour comparer les résultats de l'indicateur avec des données terrains (exemple de test de probabilité sur la figure 5). Si les données terrains ne sont pas accessibles (coût trop élevé, mesure impossible...), on peut comparer les résultats avec les résultats obtenus à partir d'un modèle de simulation. Si ces deux méthodes ne sont pas possibles, le dernier recours est le jugement d'experts ;
- validation par les utilisateurs finaux : utiliser un **test d'utilité** pour avoir les opinions des décideurs sur l'utilité de l'indicateur. Est-ce que ce dernier peut être utilisé comme point de référence pour les décideurs ?

5 Exemple de « test de probabilité » pour l'indicateur azote, développé par Bockstaller et Girardin (2003)



4 Indicateurs technologiques de dosage, fractionnement et répartition

			Liquide			Solide
			Enfouisseur	Ligne	Nappe	
Répartition	Répartition transversale	Symétrie				I_{R1}
		Forme de courbe				I_{R2}
		CV à largeur travail		I_{R3L}		I_{R3S}
		CV à largeur optimale		I_{R4L}		I_{R4S}
		Robustesse CV				I_{R5}
		Bordure				I_{R6}
		Tronçonnement largeur. épandage				I_{R7}
	Répartition longitudinale	EZT		I_{R8L}		I_{R8S}
		CV longitudinal		I_{R9L}		I_{R9S}
		Recouvrement		I_{R10L}		I_{R10S}
	Pertes					I_{R11}
	Nappe épandage					I_{R12}
	Nappe épandage					I_{R13}
Dosage	Essai dose					I_{D1}
	Vitesse fond mouvant					I_{D2}
	Porte de dosage					I_{D3}
	Réglage débit			I_{D4}		
	Documentation					I_{D5}
	DPA					I_{D6}
Fractionnement	Émiettement					I_{F1}
	Paquets					I_{F2}
	Intervalles			I_{F3}		

► Dans le cadre de notre étude, nous avons initié cette phase de validation par des tests de sensibilité pour chaque indicateur technologique élaboré. Les différentes étapes de cette validation ont été les suivantes :

- calcul de chaque indicateur technologique sur la base des données d'essais expérimentaux réalisés au Cemagref de Montoldre ou à la station des Cormiers – Chambre régionale d'agriculture de Bretagne ;
- ajustement de la notation ou du mode de calcul de l'indicateur en fonction des résultats obtenus pour ces derniers.

Actuellement, seuls les indicateurs basés sur des données qualitatives (type de documentation...) ou des données calculées pour satisfaire la norme (CV, EZT...) ont pu être validés sur les machines existantes. Les autres indicateurs seront validés ultérieurement, une fois que les tests sur les nouvelles machines construites et modifiées par les partenaires industriels auront été réalisés dans le cadre d'une des tâches du projet ECODEFI. L'ensemble des données nécessaires au calcul de tous les indicateurs sera alors collecté.

Validation des indicateurs technologiques par des tests de sensibilité

Les indicateurs technologiques proposés dans le cadre du projet ECODEFI ont été testés pour connaître leur sensibilité. Ces tests ont consisté à calculer les indicateurs

puis à ajuster la grille de notation ou leur calcul en fonction des résultats des tests de sensibilité.

La validation des indicateurs technologiques s'est basée sur les données d'essais d'épandeurs solides et liquides réalisés respectivement au Cemagref de Montoldre et à la station des Cormiers – Chambre d'agriculture de Bretagne. Neuf épandeurs d'engrais organiques solides ont été testés à Montoldre et six épandeurs d'engrais liquides ont été testés à la station des Cormiers. Afin de préserver l'anonymat des machines, les noms des épandeurs seront codés (tableau 5). Des tests complets ont été réalisés sur les épandeurs A à I, les tests sur les autres épandeurs J à N et A' à F' n'ont pas permis de calculer l'ensemble des indicateurs technologiques.

Juger de la répartition

Les indicateurs technologiques de répartition (tableau 6) sont au nombre de treize. Sept indicateurs permettent de noter la répartition transversale et trois indicateurs la répartition longitudinale. Les autres indicateurs sont des indicateurs spécialement créés pour le projet ECODEFI. Ils n'ont pas pu être calculés car les données nécessaires n'ont pas été prises en compte dans le cadre des essais officiels, réalisés avec les normes NF EN 13080 et NF EN 13406. Ces données seront par contre prises en compte dans les prochains essais du banc d'essai des épandeurs organiques de Montoldre (fin 2010).

5 Caractéristiques des épandeurs de produits organiques utilisés pour la validation des indicateurs technologiques

Lieu des essais	Nom de l'épandeur	Type d'épandeur	Produit épandu
Cemagref de Montoldre	Épandeur A	Hérissons verticaux – porte guillotine	Compost, fumier
	Épandeur B	Hérissons verticaux – pas de porte	Compost, fumier
	Épandeur C	Table d'épandage avec deux hérissons verticaux – porte guillotine	Compost, fumier
	Épandeur D	Hérissons verticaux – porte basculante	Compost, fumier
	Épandeur E	Hérissons verticaux – porte basculante	Compost, fumier
	Épandeur F	Table d'épandage avec deux hérissons verticaux – porte guillotine	Compost, fumier
	Épandeur G	Table d'épandage avec deux hérissons verticaux – porte guillotine	Compost, fumier
	Épandeur H	Hérissons verticaux – pas de porte	Compost, fumier
	Épandeur I	Table d'épandage avec deux hérissons verticaux – porte guillotine	Compost, fumier
	Épandeur J	Hérissons verticaux – porte basculante	Compost, fumier
	Épandeur K	Hérissons verticaux – pas de porte	Fumier
	Épandeur L	Hérissons verticaux – pas de porte	Compost
	Épandeur M	Table d'épandage avec deux hérissons verticaux – porte guillotine	Fumier
	Épandeur N	Hérissons verticaux – pas de porte	Fumier
Station des Cormiers – Chambre d'agriculture de Bretagne	Épandeur A'	Tonne à lisier avec rampe 10 buses à palette	Lisier, eau
	Épandeur B'	Tonne à lisier avec broyeur répartiteur et enfouisseur avec 11 injecteurs	Lisier, eau
	Épandeur C'	Tonne à lisier avec rampe tri-buse	Lisier, eau
	Épandeur D'	Tonne à lisier avec trois types de buses à palette différentes testées	Lisier, eau
	Épandeur E'	Automoteur avec broyeur répartiteur et enfouisseur prairie 40 disques	Lisier, eau
	Épandeur F'	Tonne à lisier avec rampe à pendillards équipée de 40 sorties	Lisier, eau

6 Répartition des essais en pourcentage en fonction des notes obtenues pour chaque indicateur de répartition transversale et longitudinale

Indicateurs	Notes											TOTAL
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Répartition transversale												
I _{R1}							18		12		70	100
I _{R2}			11				11				78	100
I _{R3S}	4	2	1	10	11	12	29	11	11	7	1	100
I _{R3L} -I _{R4L}	1	3	5	1	2	1	6	18	33	28	1	100
I _{R4S}	2	4	4	11	11	23	28	4	0	11	2	100
I _{R5}		4	0			17			39		39	100
I _{R6}		11	6	3	3	22	11	6	6	3	31	100
I _{R7}	18	20	38	2	16	7	0	0	0	0	0	100
Répartition transversale												
I _{RB L}	0	0	0	0	2	5	5	6	45	31	8	100
I _{RB S}	0	0	4	12	31	42	8	4	0	0	0	100
I _{R9 L}	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
I _{R9 S}	15	19	15	38	12	0	0	0	0	0	0	100
I _{R10 L}	0		0		0		0	0	0		100	100
I _{R10 S}	5		20		15		10		25		25	100
I _{R11 L}	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
I _{R11 S}	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
I _{R12}	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
I _{R13}	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
I _{R14}	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc

nc : non calculé, les cases grisées indiquent les notes non prises en compte dans la grille d'évaluation des indicateurs (ex. : l'indicateur I_{R1} est noté 6, 8 ou 10.)

► Juger du dosage

Les indicateurs technologiques de dosage (tableau 7) sont au nombre de six. Seuls quatre indicateurs ont pu être calculés avec les données des essais expérimentaux. Les autres indicateurs sont des indicateurs spécialement créés pour le projet ECODEFI. Ils n'ont pas pu être calculés pour la même raison que les indicateurs de répartition.

Juger de la propreté

Les indicateurs technologiques de propreté-ressources (tableau 8) sont au nombre de trois. Seuls deux d'entre eux ont pu être calculés avec les données des essais expérimentaux. Le dernier indicateur sera validé ultérieurement avec les nouveaux essais qui seront réalisés dans le cadre du projet ECODEFI comme pour les autres indicateurs ci-dessus.

7 Répartition des essais en pourcentage en fonction des notes obtenues pour chaque indicateur de dosage et de fractionnement

Indicateurs	Notes											TOTAL
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Dosage												
I _{D1}	5	15	25	0	5	10	5	0	10	15	10	100
I _{D2}			33		56		0		11		0	100
I _{D3}	22		56		11		0		11		0	100
I _{D4}	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
I _{D5}	0	0	22	11	0	22	11	0	11	0	22	100
I _{D6}	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
Fractionnement												
I _{F1}	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
I _{F2}	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
I _{F3}	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc

nc : non calculé, les cases grisées indiquent les notes non prises en compte dans la grille d'évaluation des indicateurs.

8 Répartition des essais en pourcentage en fonction des notes obtenues pour chaque indicateur de propreté ressources

Indicateurs	Notes											TOTAL
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Propreté ressources												
I _{ECO1}	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
I _{ECO2}		0	11	17	11	44	6	11	0	0	0	100
I _{ECO3}		0	0	11	0	33	0	33	11	11	0	100

nc : non calculé, les cases grisées indiquent les notes non prises en compte dans la grille d'évaluation des indicateurs.

9 Notation des trois indicateurs de service rendu pour les épandeurs d'engrais organiques solides testés

Code	Indicateur de service rendu Répartition		Indicateur de service rendu Dosage		Indicateur de service rendu Propreté ressources	
	Compost	Fumier	Compost	Fumier	Compost	Fumier
Épandeur A	5,14	5,77	4,43	4,43	3,67	3,67
Épandeur B	6,41	4,91	4,43	4,43	5,67	5,67
Épandeur C	3,91	4,41	1,71	2,29	5,33	5,67
Épandeur D	4,77	5,59	4,29	4,29	6,33	6,33
Épandeur E	4,23	5,32	3,29	3,57	4,67	5,00
Épandeur F	6,5	4,73	4,86	5,43	5,00	5,00
Épandeur G	6,14	5,32	6,00	6,57	8,00	7,67
Épandeur H	4,59	6,55	7,14	6,86	6,00	6,67
Épandeur I	5,82	5,91	6,29	6,29	5,67	5,67

Les indicateurs de fractionnement, de projection-volatilité, de tassement, d'orniérage et de puissance-efficacité n'ont pas pu être calculés du fait du manque de données disponibles dans les essais à notre disposition. Ils ne seront validés qu'une fois les nouveaux essais mis en place fin 2010.

Juger des services rendus

À partir des indicateurs technologiques calculés pour chaque épandeur testé, trois indicateurs de services rendus ont pu être calculés : l'indicateur de service rendu répartition, l'indicateur de service rendu dosage et l'indicateur de propreté ressources.

Le premier indicateur a été calculé sur la base des indicateurs technologiques I_{R1} à I_{R10} uniquement. Le second indicateur a été calculé sur la base de quatre des six indicateurs technologiques qui le composent. Seuls les indicateurs I_{D4} et I_{D6} n'ont pas été pris en compte. Le troisième indicateur a été calculé sur la base de deux des trois indicateurs technologiques qui le composent. Seul l'indicateur I_{ECO1} n'a pas été pris en compte (tableau 9).

L'étape de validation des indicateurs technologiques et des indicateurs de services rendus a montré que l'étalement des échelles de notation était suffisamment pertinente pour évaluer l'ensemble des types de machines (épandeurs solides et liquides). Au final, les indicateurs de service permettent de comparer les performances technologiques des machines de même catégorie entre elles avec des produits épandus différents.

L'objectif final du projet ECODEFI est de pouvoir coupler ces indicateurs de services rendus avec des modèles agronomiques afin de quantifier les émissions de substances polluantes (NH_3 , N_2O , NO_3 , PO_4 ...) qui pourront être utilisées pour modéliser les épandages lors de la réalisation des analyses de cycle de vie conduites dans le cadre de ce projet.

De nouvelles machines plus respectueuses de l'environnement ?

Notre réflexion a conduit à la construction d'une palette d'indicateurs en lien avec l'impact environnemental de l'épandage. Basé sur un critère technique comme un niveau d'équipements ou bien un résultat d'essais, l'indicateur reste une donnée ciblée. Ainsi, la palette d'indicateurs proposée offre une vue très globale de la machine, qui intègre sa construction, son utilisation et ses performances à l'épandage.

Cette batterie de nouveaux paramètres permettra d'analyser l'impact environnemental du matériel et des pratiques d'épandage de manière plus exhaustive. Elle va bien au-delà du référentiel normatif existant basé sur la répartition des produits à l'épandage. Elle le complète en prenant en compte, par exemple, les aspects documentaires ou bien l'obtention de la dose qui reste un point essentiel.

La mise en place d'indicateurs technologiques sur les matériels d'épandage introduit de nouveaux outils pour comparer les matériels. La démarche souligne à la fois les bons et les mauvais résultats obtenus. Elle indique les points techniques à corriger en priorité pour améliorer les performances des matériels. Elle peut aussi faciliter le choix des utilisateurs suivant les critères les mieux adaptés.

Ces nouveaux indicateurs, associés à des modèles agronomiques de terrain, vont nous permettre dans le cadre du projet ECODEFI d'évaluer de manière plus précise les chaînes de causalité entre flux d'émissions polluantes et paramètres machine. Ce travail va contribuer notamment à la production d'un outil d'analyse de cycle de vie simplifié, destiné aux bureaux d'études des constructeurs de machines d'épandage qui souhaitent concevoir de nouvelles machines d'épandage plus respectueuses de l'environnement sur l'ensemble de leur cycle de vie. ■

Les auteurs

Marc Rousselet

Cemagref, Centre de Clermont-Ferrand, UR TSCF,
Technologies et systèmes d'information pour les agrosystèmes,
Domaine des Palaquins,
03150 Montoldre
marc.rousselet@cemagref.fr

Jacky Mazoyer

Cemagref, Centre de Clermont-Ferrand, UR TSCF,
Technologies et systèmes d'information pour les agrosystèmes,
Domaine des Palaquins,
03150 Montoldre
jacky.mazoyer@cemagref.fr

Marilys Pradel

Cemagref, Centre de Clermont-Ferrand, UR TSCF,
Technologies et systèmes d'information pour les agrosystèmes,
Domaine des Palaquins,
03150 Montoldre
marilys.pradel@cemagref.fr

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- AFNOR a, 2003, Agricultural machinery – Manure spreader – Environmental protection – Requirements and test methods, NF EN ISO 13080, 22 p.
- AFNOR b, 2003, Agricultural machinery – Slurry tankers and spreading devices – Environmental protection – Requirements and test methods for the spreading precision, NF EN ISO 13406, 23 p.
- BOCKSTALLER, C., GIRARDIN, P., 2003, How to validate environmental indicators, *Agricultural Systems*, n° 76, p. 639-653.
- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, 2007, *Adopter des modes de production et de consommation durables*, rapport de synthèse du groupe 4 du Grenelle de l'Environnement, 167 p., accessible en ligne : <http://www.legrenelle-environnement.gouv.fr/grenelle-environnement/spip.php?article199>

► Consulter l'ensemble des références
sur le site de la revue www.set-revue.fr