

ECO-EPANDAGE : QUELLES TECHNOLOGIES DISPONIBLES POUR ATTEINDRE LES OBJECTIFS EN PRODUITS SOLIDES

Emmanuel Piron ⁽¹⁾, François Pinet ⁽²⁾

⁽¹⁾ INRAE Centre de Clermont-Ferrand, UR TSCF - Equipe PRT PEE, 03300 Montoldre

⁽²⁾ Manufacture Française des Pneumatiques Michelin, 63000 Clermont-Ferrand

Résumé

Le référentiel Eco-épandage définit les méthodes, les critères et les niveaux d'exigences à atteindre avec un épandeur de fumier ou de lisier dans le but d'obtenir la reconnaissance de performance. Deux grandes problématiques y sont traitées, (i) le niveau de performance à l'épandage et (ii) le respect des sols.

Côté performance à l'épandage, la difficulté principale est l'obtention d'une EZT supérieure à 70% et pour atteindre ce niveau, les épandeurs doivent être dotés d'organes spécifiques de maîtrise de dose, dans le contexte d'hétérogénéité produits qui est celui des engrais organiques de type fumier, compost. Au-delà de cette exigence sur la dispersion autour de la moyenne, le respect de la dose globale épandue à la parcelle vient compléter l'évaluation, rendant plus difficile encore l'obtention de la reconnaissance, et imposant pratiquement l'installation d'une pesée embarquée. Cette dernière ne nécessite cependant pas d'être « dynamique ».

Côté impacts sur le sol, là aussi deux aspects sont évalués avec d'une part la pression au sol, nécessitant des choix technologiques de pneumatiques adaptés, et d'autre part le tassement profond, imposant une restriction à 13T par essieu.

Introduction / présentation projet

Dans la trajectoire de réduction des divers impacts environnementaux, l'agriculture doit bien entendu prendre sa part, et l'épandage est une opération culturale qui n'échappe pas à cet objectif. La très grande technicité des épandeurs d'engrais minéraux, la précision des compositions des produits à épandre, la facilité de mise en œuvre, ... font de l'épandage des engrais minéraux une opération privilégiée. L'épandage des produits organiques présente pourtant énormément d'avantages parmi lesquels leurs origines (ne nécessitant pas le recours aux énergies fossiles), leurs coûts (produits présents sur l'exploitation et à valoriser), leurs effets sur la texture du sol et le complexe argilo-humique (amendement organique). Le gisement global est en augmentation avec le développement des filières de valorisation des boues, stations de compostage, unités de méthanisation, ... Autant de « nouveaux produits » qui présentent aussi des avantages de meilleure homogénéité de composition et de plus fort dosage en éléments fertilisants.

Pour exploiter pleinement ce potentiel global que représentent les engrais organiques, il faut réussir à améliorer la capacité à les épandre de manière homogène sur les parcelles agricoles, au moins en densité massique. Historiquement en effet, les matériels d'épandage, en particulier les épandeurs à fumier, devaient avant tout présenter une forte rusticité et de grandes contenances, avec pour principal objectif de permettre de « se débarrasser » le plus efficacement possible des tonnages en stocks. Ainsi, et profitant des développements technologiques proposés sur les épandeurs d'engrais minéraux, les épandeurs de fumier et les tonnes à lisier ont été progressivement dotés de solutions de régulation censées les rendre efficaces. La réalité sur le terrain est un peu plus complexe et il ne suffit pas d'installer une interface de pilotage DPAE (Débit proportionnel à l'avancement électronique), une pesée dynamique, ... pour transformer instantanément ces machines et les rendre précises et vertueuses.

La certification Eco-épandage (devenue récemment une marque, cf. référence n°1), gérée par la filiale APS d'AXEMA en France, a pour objectif d'évaluer les performances environnementales de ces machines d'épandage. Son référentiel technique définit les critères techniques et les seuils de performances associés nécessaires pour l'obtention de cette reconnaissance. Ces aspects techniques et les niveaux d'exigence sont présentés dans la première partie.

Les objectifs d'une telle démarche étant de tirer vers le haut les performances d'épandage, les épandeurs doivent être dotés de dispositifs leur permettant d'atteindre les niveaux d'exigences du référentiel. La deuxième partie fait un point des solutions efficaces, tant du point de vue de la qualité d'épandage que de celui du respect des exigences visant à minimiser les impacts sur les tassements de sols.

Référentiel éco-épandage : critères évalués et niveaux d'exigence à atteindre

Produit d'un projet collaboratif initié par la profession (deux industriels français de l'épandage PICHON et ROLLAND) et regroupant aussi l'institut de recherche INRAE, la Chambre d'Agriculture de Bretagne, l'établissement de formation VétagroSup, l'organisme de certification Certipaq, la FNEDT, la FNCUMA, l'APCA, Eco-épandage naît sous la forme d'une certification puis devient une marque. Elle est attribuée par APS, filiale d'AXEMA, suite à des évaluations réalisées par l'INRAE en son entité de Montoldre, Centre de Clermont-Ferrand, et selon le référentiel Eco-épandage. Ce dernier décrit la réalisation de mesures sur banc d'essai d'une part, et l'évaluation du respect des contraintes à l'interface sol / pneumatique d'autre part. Eco-épandage est ainsi ouverte à tous les constructeurs.

Mesures de RT et de RL sur banc d'essai

Ces mesures sont réalisées sur le banc CEMOB d'INRAE. Il permet la mesure simultanée de la répartition longitudinale (RL ou courbe de débit massique) grâce à un positionnement de l'épandeur ou de la tonne à poste fixe sur un pont peseur, et de la répartition transversale (RT) grâce à des bacs peseurs positionnés sur trois poutres mobiles simulant le déplacement relatif de la machine sur un sol (cf. Figure 1).



Figure 1 : Photo du banc CEMOB INRAE permettant la mesure simultanée des courbes RT et RL.

Conforme aux spécifications de mesure requises par le référentiel Eco-épandage (hauteur des bacs - représentant le sol virtuel d'une parcelle - identique à celle du pont peseur recevant l'épandeur, vitesse de mesure de 1 km/h pour les poutres, haute résolution des capteurs utilisés pour les mesures, ... il est installé dans un hall couvert permettant des mesures avec vent nul. Grâce à trois poutres venant encadrer l'épandeur en début de mesure, la nappe n'est pas tronquée et la totalité des quantités épandues est collectée. L'instrumentation des bacs permet l'édition de la nappe d'épandage en sus de la mesure directe de RT (cf. Figure 2).

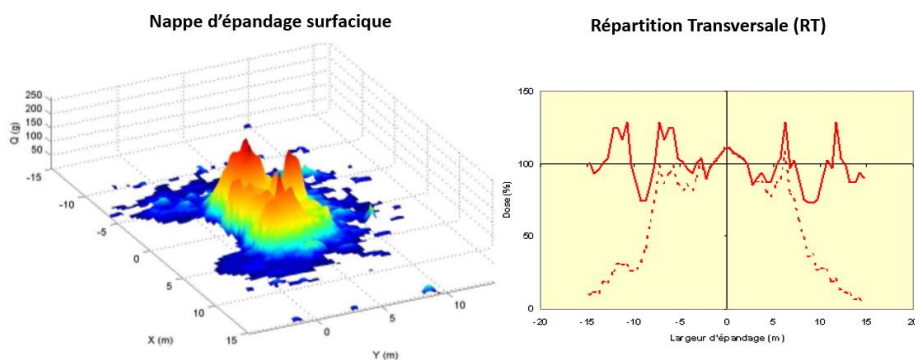


Figure 2 : Exemple de nappe d'épandage surfacique mesurée avec du fumier et des hérissons verticaux, et d'une répartition transversale (RT) avec passage simple (pointillés) et après recouvrement à la largeur optimale de travail (trait plein).

Le référentiel Eco-épandage reprend de la norme EN13080 les modes opératoires de réalisation des mesures d'obtention des RT et RL. Il reprend aussi les critères calculés sur ces deux courbes :

- CV_T (coefficient de variation transversal, rapport de l'écart-type des doses de la RT après recouvrement à leur moyenne, exprimé en %), largeur de travail optimale (largeur pour laquelle le CV_T est minimal) ;
- CV_L (longitudinal), DC (Débit Caractéristique, correspondant au débit moyen maximum calculé sur 60% consécutifs du temps de vidange), EZT (Etendue dans la Zone de Tolérance, somme de tous les temps de vidange pour lesquels le débit réel est dans une plage de $\pm 15\%$ du DC, exprimé en % du temps de vidange).

Il diffère notablement ensuite concernant le niveau des seuils à atteindre sur ces critères d'exigences, comme le montre la Figure 3 avec un extrait de la plaquette Eco-épandage.

ÉPANDEURS SOLIDES		Eco-Epandage	EN 13080
Maîtrise de la dose ZT(1)	à vitesse constante	+ $\pm 15\%$	pas d'exigence
	à vitesse variable	+ $\pm 15\%$	pas d'exigence
Répartition Transversale	coefficient de variation	+ $\leq 20\%$	$\leq 30\%$
Répartition Longitudinale EZT(2)	à vitesse constante	+ $\geq 70\%$	$\geq 35\%$
	à vitesse variable	+ $\geq 50\%$	pas d'exigence
ÉPANDEURS LIQUIDES		Eco-Epandage	EN 13406
Maîtrise de la dose ZT(1)	à vitesse constante	+ $\pm 10\%$	pas d'exigence
	à vitesse variable	+ $\pm 15\%$	pas d'exigence
Répartition Transversale	déviatoin moyenne	= $\leq 15\%$	$\leq 15\%$
Répartition Longitudinale EZT(2)	à vitesse constante	= $\geq 90\%$	$\geq 90\%$
	à vitesse variable	+ $\geq 65\%$	$\geq 50\%$
		Plus exigeant que les normes en vigueur	Même exigence que les normes en vigueur

Figure 3 : Extrait de la plaquette Eco-épandage qui juxtapose ses exigences de seuils à ceux des normes Européennes sur les critères de performance d'épandage en solides et en liquides.

Un épandeur « Eco-épandage » est donc beaucoup plus performant qu'un épandeur répondant aux normes Européennes en différents points :

- Il ne doit pas autoriser de « biais » dans la dose distribuée : la dose longitudinale distribuée - estimée via le DC, la largeur de travail et la vitesse - doit appartenir à un intervalle autour de la dose agronomique cible (ce qui n'est pas le cas pour la norme) ;
- L'épandage produit ne doit pas présenter une dispersion trop importante autour de la dose moyenne, avec un CV_T ramené à $2/3$ de la valeur de la norme en solides, et surtout une EZT requise deux fois plus forte (en solide, la dose doit appartenir pendant 70% du temps à l'intervalle de tolérance).

- Enfin, la fonction DPAE est évaluée pour Eco-épandage alors qu'il n'en était pas question dans les normes de 2003.

Performances « impact sur le sol »

L'évaluation en lien avec la compaction du sol que va induire l'épandage est totalement nouvelle par rapport aux normes datant de 2003. Elle se justifie par l'évolution de la taille des machines et les risques importants de stérilisation des sols associés.

Aucune mesure réelle de terrain ou au banc n'est produite sur ce point, la déclaration du constructeur concernant les charges étant utilisée :

- Le premier critère est la charge à l'essieu, qui doit rester inférieure à 13T par essieu ;
- Le deuxième critère est la pression à l'interface avec le sol, évalué via le logiciel TASC, les valeurs de charges déclarées et les pneumatiques proposés sur l'épandeur. La charge maximale supportée par le pneumatique doit être compatible avec la pression de gonflage recommandée (vérification dans le tableau de charge de l'équipementier). Puis la surface de contact pneumatique / sol ainsi que la pression à l'interface sont évaluées dans ces conditions via TASC. La pression ainsi obtenue à l'interface ne doit pas excéder 1,5 bar.

Quels moyens technologiques pour atteindre Eco-épandage

Performances « épandage solide »

Un appareil « Eco-épandage » est donc globalement deux fois plus performant du point de vue des performances d'épandage qu'un appareil respectant la norme EN13080. Qui plus est, les deux variabilités « justesse » et « dispersion » des doses distribuées sont évaluées, ce qui contraint énormément l'espace des possibles, comme le montre la schématisation de la Figure 4 (zone verte seule acceptable), extrait d'un résultat du logiciel didactique consacré à cette thématique et développé par INRAE « Maidor » (cf. référence n°2).

Pour accéder à ce niveau de performance avec un épandeur de fumier, les solutions technologiques doivent être combinées, chacune ayant un rôle bien précis à remplir.

Bien sûr la qualité de travail des organes d'épandage (hérissons verticaux, table d'épandage, ...) est importante pour le résultat final (qualité d'émission principalement et aptitude à disperser le produit de manière régulière sur toute la largeur de

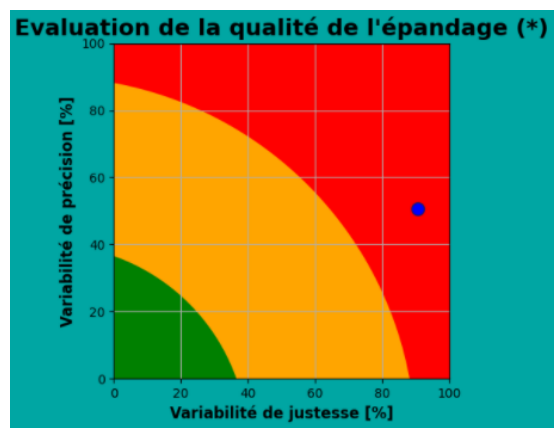


Figure 4 : Extrait de l'écran final obtenu avec le logiciel « Maidor » développé par INRAE, pour l'estimation de performance d'un épandeur de fumier « théorique » (logiciel à vocation didactique). La performance finale acceptable (zone verte) prend en compte les deux variabilités combinées de précision et de justesse.

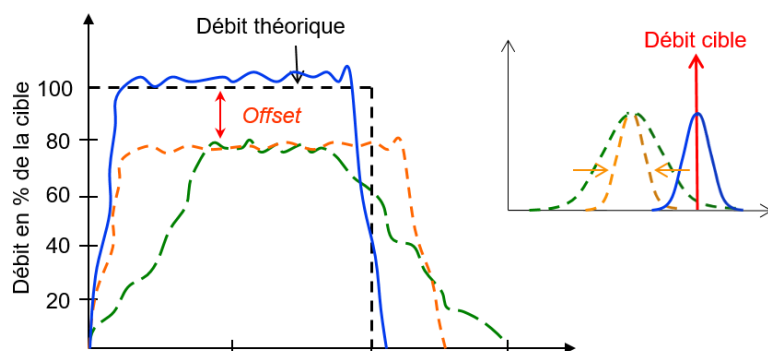


Figure 5 : Schématisation des courbes « typiques » obtenues avec différents organes de maîtrise de dose. Evolution progressive vers l'absence de défauts de dispersion puis de justesse.

travail sans génération de bandes de dosage différenciées). Ce point est assez fréquemment vérifié sur les différents épandeurs présentés pour Eco-épandage, quel que soit la technologie d'épandage. Très souvent observée lors des démonstrations en parcelles, cette aptitude n'est cependant d'aucun intérêt si l'alimentation des organes d'épandage n'est pas régulière : elle ne servira alors qu'à répartir au mieux une successions de mauvaises doses !

Il s'avère que la difficulté majeure se situe au niveau de la régularité de la courbe RL. Le schéma de la Figure 5 illustre les bénéfices que doivent apporter successivement les organes de maîtrise de dose pour l'obtention de performances acceptables (la courbe en pointillés noirs représente l'idéal 100% de la dose cible pendant 100% du temps de déchargement).

1 - La courbe verte représente une tendance typique de RL lors d'une vidange d'un épandeur démuni d'organes de maîtrise de dose. Une première phase dite d'amorçage, croissante en débit, suivie d'une deuxième de « plateau » puis d'une troisième de décroissance. Le diagramme de distribution par classes de débits présente alors une forme plus ou moins proche d'une loi normale, souvent avec une asymétrie. Deux métriques caractérisent cette distribution :

- la dispersion forte des débits autour de la moyenne constatée : elle représente la variabilité des débits successifs lors de la vidange et peut s'expliquer par différentes raisons, dont les plus fréquentes sont :
 - o hétérogénéité initiale de chargement (longitudinal et latéral) dans la caisse ;
 - o hétérogénéité de masse volumique du produit (le fumier est plus hétérogène que les produits compostés, les fractures en partie avant de caisse provoquent des variations de masse volumique (foisonnement)) ;
 - o non prise en compte de la section réelle de produit présentée aux organes d'épandage pour l'ajustement de la vitesse de tapis ;
 - o ...
- l'écart entre le débit cible et le débit moyen de vidange constaté, qui se traduit par un biais sur la dose globalement apportée et qui s'explique principalement par une erreur dans l'estimation de la masse volumique du produit.

La combinaison de ces deux variabilités caractérise une absence de maîtrise de la dose. Il n'est alors d'aucun intérêt de disposer d'organes d'épandage très performants puisque la valeur initiale distribuée n'est pas sous contrôle !

2 – La courbe en pointillés orange représente un premier niveau de maîtrise de débit, avec une vidange pour laquelle un organe technologique est présent sur l'épandeur pour supprimer la dispersion autour du débit moyen. La courbe est ainsi de « forme » maîtrisée (rectangulaire) avec une longue plage de débit stable. La variabilité autour du débit moyen se resserre, permettant un fonctionnement plus proche de l'objectif :

- OFF : débit nul pour une alimentation fermée ;
- ON : débit très proche de la moyenne pour une alimentation ouverte.

Il reste qu'il existe un écart entre débit cible et débit moyen, se traduisant par un biais de dose distribuée à la parcelle (sur ou sous-dosage global), qui s'explique par une mauvaise évaluation de la masse volumique du produit présent en caisse.

3 – La courbe en pointillés bleu présente un résultat proche de l'idéal en épandage de produits organiques : la dispersion autour de la moyenne épandue est faible et il n'y a pas d'écart débit cible / débit moyen réel. Ce type de résultat est obtenu lorsque, en plus des caractéristiques listées en 2, s'ajoute une estimation correcte de la masse volumique.

Outils de maîtrise de dose

Une dose homogène d'épandage est obtenue dans une parcelle lorsque le débit de produit délivré par l'épandeur est réparti de manière uniforme au sol. Outre le rôle primordial des organes d'épandage dans cette qualité de répartition au sol (non discutée ici), il faut d'une part que la vitesse d'épandage soit adaptée audit débit, et d'autre part que les intervalles entre passages successifs dans la parcelle soient adaptés.

Les outils de guidage favorisent l'obtention d'une dose finale appliquée conforme, une précision métrique des GPS étant ici suffisante. Sans utilisation de barre de guidage, un jalonnage préalable dans la parcelle rend le service adapté.

La vitesse d'épandage est souvent subie (puissance limitée, qualité d'émission et de répartition, ...), mais des variations peuvent cependant être constatées (pente montante, descendante, patinage, ...) et les dispositifs dits DPAE - Débit Proportionnel à l'Avancement Electronique - permettent de s'en

affranchir. Mesurant en continu la vitesse réelle d'épandage, ils adaptent le débit par modulation de la vitesse de tapis. Ces modules, à nos jours quasi tous électroniques, reposent dans leur principe sur les développements produits pour l'épandage des minéraux, et sont donc parfaitement fonctionnels. La boucle de rétroaction installée est fiable, adaptée en temps de réponse si la fréquence de mesure de la vitesse réelle est correcte.

Même si ces deux organes de maîtrise de dose (guidage et DPAE) sont fondamentaux, ils n'auront servi à rien si la maîtrise du débit n'est pas présente sur l'épandeur (remarque valable en l'inversant !)

Maîtrise de la dispersion autour du débit moyen

L'erreur de section d'alimentation des organes d'épandage s'avère être la principale explication à cette dispersion, devant la variabilité interne de masse volumique. Dans un épandeur, la section est parfaitement définie par trois de ses côtés (plancher et deux ridelles de la caisse) mais peut varier considérablement en limite supérieure : la hauteur de chargement peut d'une part varier le long de la caisse, et surtout une fracture du chargement se produit inévitablement vers l'avant de la caisse dès que le tapis impose la mise en mouvement. Une fois l'épandage du « bloc » non affecté terminé, les organes d'épandage répartissent une hauteur de front de tendance régulièrement décroissante, fonction du talus d'éboulis et donc de la nature du produit (le talus est plus net pour les produits cohésifs type fumier, et plus progressif et long pour les produits de faible cohésion types compostés).

La pesée dynamique utilisée seule n'a pour l'instant jamais prouvé son aptitude à résoudre ce problème. Elle consiste en effet à mesurer en permanence, via des pesons embarqués, la totalité de la masse de la caisse et du produit, pour déduire en continu le débit et adapter à la baisse ou à la hausse la vitesse de tapis dans l'objectif de suivre la courbe souhaitée de débit. Séduisant sur le principe (censé s'affranchir des aspects dimensionnels de caisse, variabilités instantanées de masse volumique, ...), elle présente cependant deux problèmes :

1 – Le signal de débit est très « bruité » :

- les capteurs d'effort installés doivent permettre la pesée totale : caisse et produit ;
- ils doivent être dimensionnés pour supporter les efforts dynamiques induits par le déplacement en milieu chaotique – chemin, parcelle - (facteur multiplicateur de l'ordre de 1.5 à 2 sur l'étendue de mesure précédente) ;
- ils sont donc d'étendues de mesure très importantes, de l'ordre de plusieurs dizaines de tonnes ;
- le signal de pesée doit être dérivé pour l'obtention de celui de débit.

2 – Pour être utilisé ce signal de débit doit donc être filtré sur une durée assez importante (plusieurs secondes, même avec présence d'accéléromètres de correction des effets dynamiques), impliquant un décalage temporel (débit calculé sur des pesées passées) et donc un effet retard ;

3 – Les précisions et résolutions du système sont adaptées à du pesage mais pas à de la mesure de débit (mesure de plusieurs dizaines de tonnes pour l'estimation de débits compris entre 5 et 80kg/s !).

Utilisée seule, la pesée dynamique n'est donc pas une solution, induisant beaucoup trop de retards dans ses actions de régulation du débit. Elle doit être impérativement associée à une restriction de la section par utilisation de la porte en arasement plus ou moins haut dans la caisse. C'est la configuration technique des modèles ROLLAND ayant passé avec succès les évaluations Eco-épandage.

L'éboulement vers l'avant de caisse étant le premier facteur d'explication à la variabilité de débit, une réponse logique consiste à l'interdire, en installant un « **tablier accompagnateur** », se déplaçant de manière synchrone avec le tapis. Plusieurs marques d'épandeurs se sont penchées sur cette solution, et parmi les marques proposant des épandeurs certifiés, BUCHET utilise ce concept avec réussite, permettant l'obtention de valeurs d'EZT largement compatibles avec Eco-épandage (cf. Figure 6).

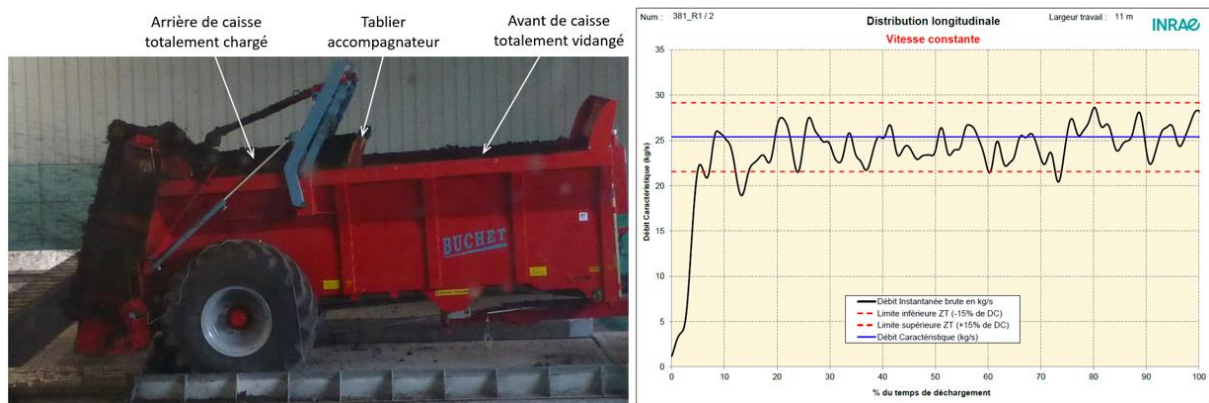


Figure 6 : Gauche : épandeur BUCHET testé au banc CEMOB, environ à mi-vidange. Droite : courbe RL obtenue.

Même aux débits faibles (25kg/s sur l'illustration), l'EZT est supérieure à 90% (seuil minimum 70%). La seule limite à ce principe se situe au niveau de la zone supérieure de chargement, qui peut présenter des variabilités de hauteur inter et intra-chargement, et qui ne peut être corrigée par une régulation de hauteur de porte qui générerait un risque d'infériorité de la section sortante à la section déplacée, et donc une compression interne dans la caisse. A cette limite prêt, le principe est parfaitement adapté à une régulation instantanée sans retard, le débit de l'épandeur est donc maîtrisé dans sa variabilité et il ne restera qu'à la maîtriser dans sa valeur réelle moyenne.

Une variante de ce dispositif se présente sous la forme d'un « **fond pousseur** ». Il n'a pas fait l'objet de mesure Eco-épandage mais on peut imaginer qu'il permette d'obtenir des résultats satisfaisants. La seule limite prévisible est le risque d'augmentation progressive de la masse volumique eu cours de vidange, par compression du produit par le fond pour le déplacer.

Une autre manière de maîtriser le débit en variabilité consiste, à l'inverse, à anticiper la décroissance de front de produit au cours de la vidange : la régulation par « **suiivi de contour** ». Le principe a été breveté en 2005 sous le numéro FR0512805, les deux illustrations de la Figure 7 en présentent le principe :

- la porte de l'épandeur est instrumentée pour suivre tout en l'arrasant le front de produit dans la caisse. Ce suivi peut être réalisé au moyen de capteurs d'efforts sur la partie basse de la porte ou sur la porte elle-même, ou bien par mesure de hauteur de produit grâce à un capteur type à ultrasons.
- La valeur de hauteur de porte est lue en permanence pour produire un asservissement de la vitesse de tapis visant à rendre constant le produit Section \times Vitesse tapis, c'est-à-dire le débit volumique.

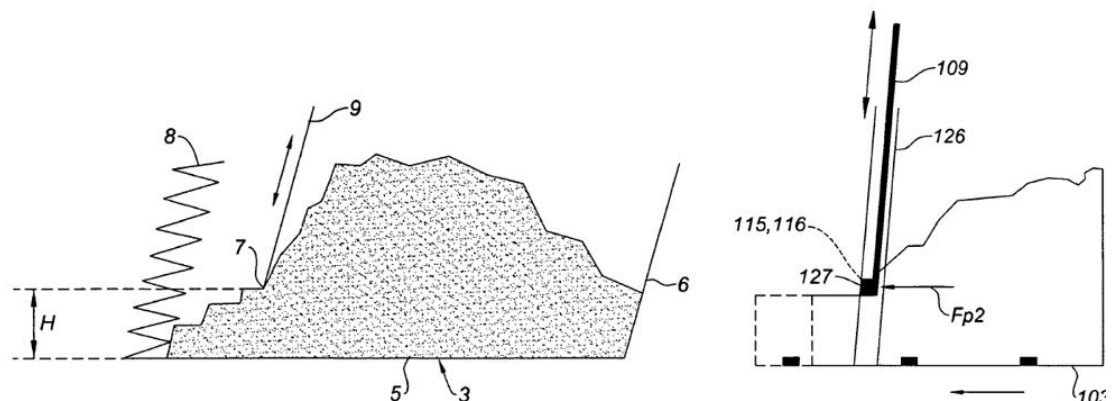


Figure 7 : Schémas d'illustration extraits du brevet FR0512805 concernant la régulation par suivi de contour.

L'avantage est ici du même type que celui précédemment présenté avec le tablier accompagnateur : la régulation est instantanée, sans nécessité de temps de filtrage ni effet retard. En addition, la section est

maîtrisée sur les 4 dimensions ce qui optimise de ce côté la maîtrise du débit. Par contre la masse volumique est un peu plus variable qu'avec le tablier accompagnateur puisque le produit se présente avec un foisonnement progressif en deuxième partie de vidange. Le débit de l'épandeur est là-aussi maîtrisé dans sa variabilité et il restera de la même façon à le maîtriser dans sa valeur réelle moyenne. Le graphique de la Figure 8 montre un exemple de RL obtenue en épandage de Compost Miata à un débit faible de 10kg/s et en utilisant un dispositif de « suivi de contour ». L'EZT de 85% montre que même dans ce cas difficile (la durée relative des éboulements en caisse avec ce type de produit est très importante), le débit instantané est maintenu dans la bande de tolérance.

Une variante de ce dispositif consiste à ne pas installer de dispositif de captage d'information de présence de produit devant la porte, et à arraser selon un « modèle » de vidange qui, statistiquement, forcera l'arrasement du produit. C'est la configuration technique du modèle PICHON ayant passé avec succès les évaluations Eco-épandage.

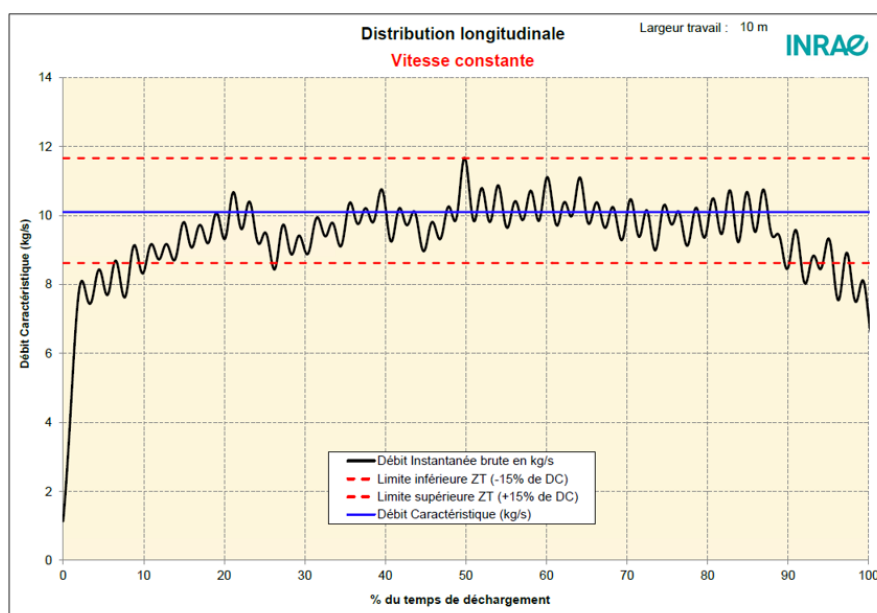


Figure 8 : Exemple de répartition longitudinale obtenue en Compost Miata, pour un débit faible de 10kg/s et avec un dispositif de « suivi de contour ». L'EZT est ici de 85%.

Maîtrise du biais de masse volumique

La dispersion autour du débit moyen étant obtenue par recours aux dispositifs précités, il reste, pour totalement maîtriser le débit, à amener le débit moyen à la bonne valeur. Il convient donc d'y adjoindre une mesure de masse volumique pour passer à la régulation de débit massique. Une pesée embarquée est en général utilisée, qui ne nécessite pas absolument d'être « dynamique », i.e. de permettre des filtrages de haut niveau, ... En effet, sans erreur dans l'estimation de la masse volumique, le DC vient naturellement prendre une valeur dans la zone de tolérance de $\pm 15\%$ du débit agronomique cible. Dans tous les cas, la pesée n'est alors pas utilisée pour sa capacité à fournir des valeurs en continu, mais pour celle à fournir l'estimation initiale puis sa tendance évolutive en cours de vidange.

Les grandes étapes des technologies pneumatiques pour limiter l'impact au sol du passage des véhicules

La modernisation de l'agriculture a conduit à une augmentation continue de la taille des exploitations au cours des dernières décennies. Pour pouvoir gérer l'extension de périmètre de ces fermes, des outils plus puissants nécessitent une force de traction plus élevée du tracteur. Comme il existe un rapport optimal entre la force de traction et le poids du tracteur, cette situation implique l'utilisation de tracteurs toujours plus lourds.

Par conséquent, cette augmentation du poids du véhicule a un impact majeur sur le risque de compaction du sol. Pour limiter ces risques, il y a eu de nombreuses évolutions dans la technologie et la conception des pneus agricoles.

Les principales étapes des 50 dernières années ont été :

- La transition, depuis 1970 pour les pneus agricoles de la structure bias (cf. figure 9) à la structure radiale (cf. figure 10). Dans les pneus radiaux, il y a une séparation structurelle des fonctions de la bande de roulement et du flanc conduisant à une stabilité de la zone de contact au sol et à une répartition homogène des pressions de contrainte dans cette aire de contact.

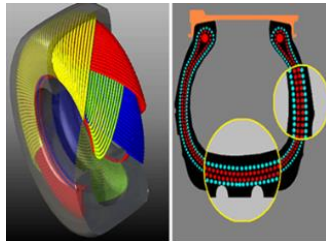


Figure 9 : Structure pneu bias

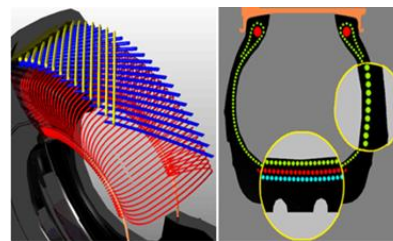


Figure 10 : Structure pneu radial

- L'évolution des rapports d'aspect, hauteur du flanc en pourcentage de la largeur du pneu (cf. figure 11). Par exemple, pour un même diamètre de pneu (1850 mm) et de jante (38 pouces), il y a eu une évolution, dans les années 1990, de la dimension 520/85 R38 à 580/70 R38 puis 650/65 R38. Cette évolution permet une augmentation de la largeur de bande de roulement en contact avec le sol et une réduction de la pression nécessaire pour supporter une charge donnée. Pour cette gamme de pneumatique, la pression nécessaire pour transporter 3800 kg à 40 km/h est passé de de 1,6 à 1,4 puis 1,2 bar.

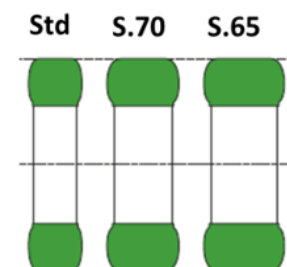


Figure 11 : Rapport d'aspect des pneus pour un diamètre donné série 85 (std), 70 et 65.

- L'évolution des pneus standard vers les pneus de norme « IF » et « VF » a été introduite par Michelin sur le marché en 2004.

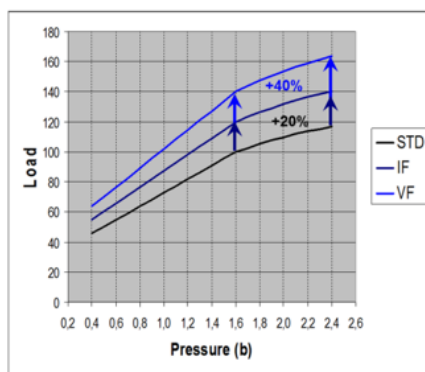


Figure 12 : Capacité de pression/charge des pneus standard, IF et VF.

Pour une dimension de pneu donnée, les pneus IF peuvent supporter une charge supplémentaire de 20 % à la même pression. Le gain est de 40 % avec des pneus VF (cf. figure 12). Ce gain peut également être utilisé pour générer une réduction de la pression nécessaire pour une charge donnée. Par exemple, un pneu pour épandeur remorque Michelin CargoxBib High Flotation 750/60 R30.5 peut transporter 6400 kg à 1,5 bar (pour une vitesse max de 40 km/h) tandis que son équivalent VF Trailxbib dans la même taille n'a besoin que de 1,2 bar pour la même charge/vitesse. Cette réduction de pression apporte un gain de la taille de l'aire de contact du pneu et de la pression de contrainte sur le sol agricole.

- L'utilisation des systèmes de gonflage centralisé des pneus (CTIS, Central Tire Inflation System). Un CTIS est un système installé sur le véhicule qui, grâce à un système de compresseur et de raccord tournant peut gérer en temps réel la pression de gonflage des pneumatiques selon les usages. Les premières solutions de rétrofit (application de ce système sur des véhicules non initialement équipé) sont apparues il y a une vingtaine d'années mais ce n'est qu'à partir de 2013 que les grands constructeurs de tracteurs ont commencé à mettre en œuvre ce système en première monte. Avec le CTIS, il est possible de différencier la pression de gonflage qui est utilisée dans les différents usages du tracteur et, en particulier, d'utiliser toujours dans le champ la pression la plus basse possible (des pressions plus élevées étant nécessaires en usage routier

en raison de la vitesse plus élevée de fonctionnement). Par exemple, un pneu pour épandeur remorque Michelin CargoxBib High Flotation 750/60 R30.5 transportant 6500 kg doit être gonflé à 1,5 bar pour supporter une utilisation à 40 km/h sur route, cette pression peut être réduite à 1 bar lorsque le véhicule roule à moins de 10 km/h sur le champ.

L'impact positif de ces évolutions sur le rendement mondial des cultures a été étudié sur des pneumatiques Michelin et montré par des études spécifiques menées pendant plusieurs années à Harper Adams University (Royaume-Uni), à l'Université de l'Illinois (États-Unis) et dans le Mato Grosso par l'UFMT au Brésil (Université fédérale du Mato Grosso). Des améliorations significatives des rendements des cultures de céréales, de soja et de coton ont été analysés avec des gains allant jusqu'à 4%.

L'utilisation de ces solutions pneumatiques, même si elle satisfait la qualification selon la marque Eco-épandage, ne garantit cependant pas dans leur application réelle une limitation des impacts au sol de l'opération d'épandage : il est impératif d'appliquer les bonnes consignes de pression et d'équiper aussi le tracteur d'équipements pneumatiques adéquat. Le sol mémorise en effet l'impact le plus pénalisant du convoi.

Conclusion

L'épandage des engrais organiques solides se réalise en général avec des machines de grandes contenances permettant la minimisation des temps de transport et la maximisation des rendements de chantier. La robustesse requise sur ces machines, la nature très variable des produits à épandre - y compris en éléments fertilisants - sont des facteurs qui ont freiné le développement des technologies. Le retour d'expérience Eco-épandage montre que l'une des principales difficultés à l'obtention de la reconnaissance de performance se situe au niveau de la capacité à obtenir une RL conforme. Pour ce faire, deux niveaux de « régulation » sont nécessaires, le premier visant à maîtriser la dispersion de débit autour de la moyenne, le deuxième visant à éviter le biais de débit conduisant au risque global de sur ou sous-dosage. Une seule et même technologie n'a pas encore été vérifiée fonctionnelle pour atteindre ces objectifs. Par ailleurs ces deux niveaux de régulation ne sont pas systématiquement associés à des augmentations de coûts, des solutions simples et pragmatiques pouvant être déployées.

En ce qui concerne le respect des impacts sur le sol des machines, si le référentiel Eco-épandage ne peut mettre l'accent que sur l'épandeur en tant que tel, il ne faut pas oublier que le sol « mémorisera » la contrainte maximale qu'il aura subie, ce qui souligne l'importance à se pencher aussi sur la monte et le gonflage côté tracteur. Avec les développements de équipementiers, la difficulté principale se situe finalement au niveau de la charge à l'essieu puisque des solutions technologiques (pneu radial IF, VF, CTIS) permettent le respect de l'aspect pression au sol.

Références bibliographiques

1 – Lien vers site Eco-épandage : <http://www.eco-epandage.com/>

2 – Lien vers logiciel MaidOr : <https://prt-pee.tscf.inrae.fr/maidor/definition>