

# OPTIMISATION DES REGLAGES DES EPANDEURS : VERS UN PORTAIL NUMERIQUE SIMPLIFICATEUR

Emmanuel Piron, Denis Miclet, Le Thinh Tien, INRAE Centre de Clermont-Ferrand  
Site de Montoldre

UR TSCF – Equipe PRT PEE – 40 route de Chazeuil 03150 MONTOLDRE

## Résumé

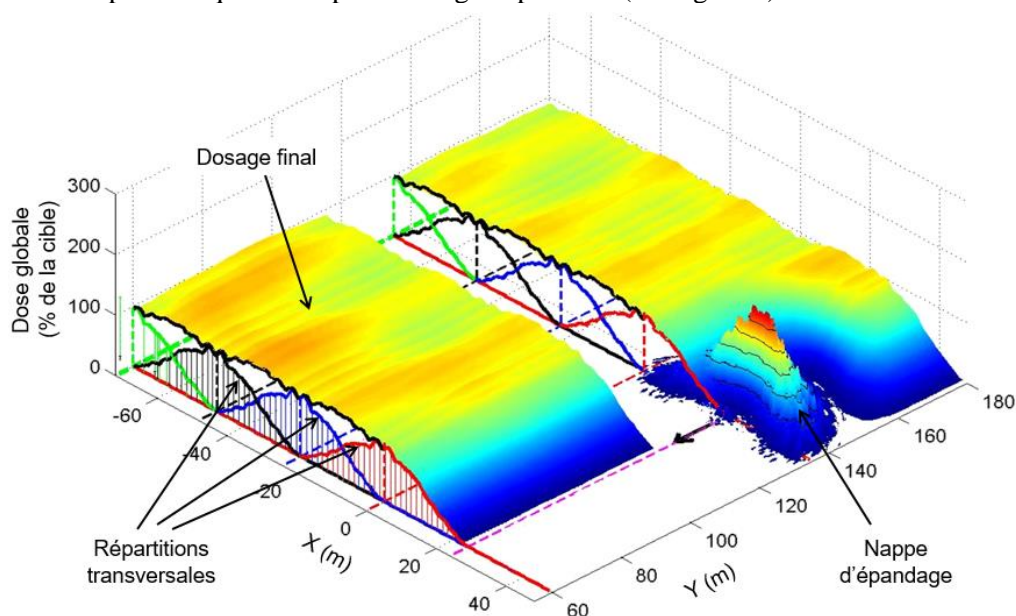
L'établissement des tableaux de réglages pour les engrais et les différents épandeurs centrifuge est une phase capitale dans la chaîne de qualité d'épandage produite par les agriculteurs. Reposant sur des principes d'établissement relativement simples (essais au banc puis analyse et édition des tableaux), la multiplicité des configurations d'épandeurs d'un côté et du nombre de formulations d'engrais de l'autre rend la méthode totalement inutilisable pour envisager un quasi-systématisme d'édition. Les coûts engendrés par cette méthode d'édition seraient par ailleurs énormes.

INRAE, qui dispose d'infrastructures de mesure de la répartition surfacique des produits au sol (banc CEMIB) a aussi développé des moyens complémentaires et des méthodes qui valorisent ces mesures pour produire de manière centralisée et mutualisée les tableaux de réglages au niveau des constructeurs d'épandeurs. L'intérêt réside dans la mutualisation des prises d'informations qui permet la suppression de la combinatoire et la diminution drastique des coûts d'édition pour tous les acteurs.

Cette communication présente à la fois le contexte, la méthode dans ses grandes lignes ainsi que les performances et les perspectives que l'on peut en attendre.

## Introduction / présentation projet

La fertilisation en agriculture est effectuée, si l'on excepte les apports en organique, grâce à engrais minéraux qui contiennent selon les cas de l'azote, du phosphore, du potassium, ... Le raisonnement agronomique tient compte du type de culture, de la nature du sol, de la région, du stade de développement de la plante, de l'engrais utilisé, ..., pour établir, via des modèles, la dose ou la carte des doses à appliquer sur la parcelle. La tâche d'épandage dans la parcelle est ensuite réalisée, en particulier en Europe, grâce à des distributeurs centrifuges. Sur les machines les plus courantes, des organes de dosage et d'alimentation permettent le transit des granulés d'engrais de la trémie de stockage à deux disques contrarotatifs, permettant leur accélération et projection dans l'air, et donc leur répartition au sol. Cette répartition surfacique obtenue au sol porte le nom de nappe d'épandage. Reproduite le long de la trajectoire dans la parcelle, les apports successifs élémentaires se combinent pour produire une distribution à la parcelle qui soit la plus homogène possible (cf. Figure 1).



**Figure 1 :** Obtention du dosage à la parcelle par apports en nappes le long de la trajectoire d'épandage.

Que la technologie soit mise en œuvre sur des épandeurs portés ou traînés, la technologie employée est finalement simple dans son principe et permet de très hauts débits de chantier. En effet, avec les configurations les plus performantes récemment développées ayant recours à des disques de grandes tailles (environ 1m de diamètre avec les pales les plus grandes) les répartitions transversales obtenues permettent un recouvrement optimal pour des intervalles inter-passages de 50m ou plus ! Ainsi, avec une vitesse d'épandage de 15 km/h par exemple, le débit de chantier instantané est supérieur à 70 ha/h, extrêmement intéressant pour valoriser pleinement les fenêtres d'épandage.

Il convient cependant que la qualité de travail soit bonne, ce qui nécessite l'application des bons réglages sur l'épandeur. Ces réglages dépendent des caractéristiques mécaniques du système d'épandage, de la largeur d'épandage souhaitée, de la zone traitée (plein champ ou bordure) et des caractéristiques physiques et morphologiques de l'engrais.

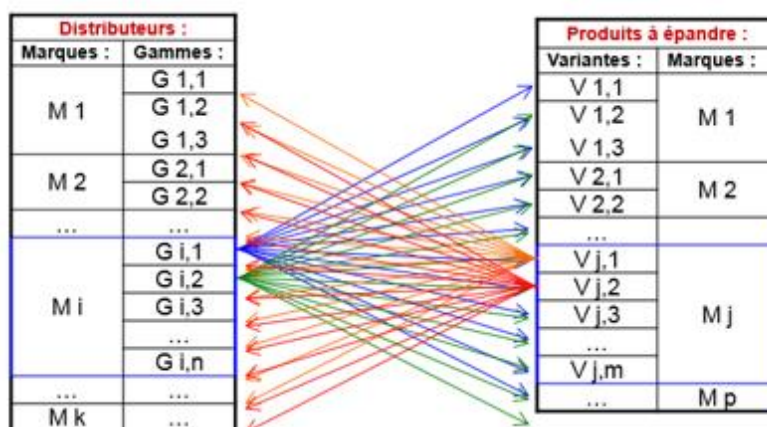
Dans le but de faciliter l'utilisation de leurs épandeurs, les constructeurs mettent à disposition des tableaux de réglage aux agriculteurs, disponibles sous la forme de livrets fournis avec le mode opératoire de la machine lors de l'achat, ou maintenant accessibles en ligne via des plateformes sur internet, cette dernière solution étant actualisée régulièrement par les fabricants de machines.

### Problématique

Tout est ainsi mis en œuvre par les constructeurs pour que la qualité d'épandage réalisée par l'épandeur soit maximale, sans nécessiter une mise en œuvre complexe par l'agriculteur, et ainsi permettre l'apport optimal d'élément fertilisant permettant l'expression du potentiel agronomique sans risque environnemental de lessivage.

Les tableaux d'épandage en question sont établis sous la responsabilité des constructeurs d'épandeurs qui disposent pour cela en général de deux méthodes : la première consistant à réaliser avec l'engrais considéré une série d'essais pour l'épandeur et le disque dont le tableau est recherché, la deuxième consistant à réaliser des tableaux par « recherche approchante » sur la base uniquement de mesures des caractéristiques des engrais. La première méthode est précise mais consommatrice en engrais (variable de l'ordre de plusieurs tonnes ou big-bang) et de temps de mesure au banc, à l'opposé de la deuxième, beaucoup moins précise mais économe en engrais (quelques kilogrammes) et en temps.

Derrière cette simplicité d'obtention des tableaux de réglages se cache donc la complexité finale à obtenir des tableaux fiables pour l'ensemble des cas de figure. Ce principe est en effet combinatoire, comme le schématise la Figure 2.



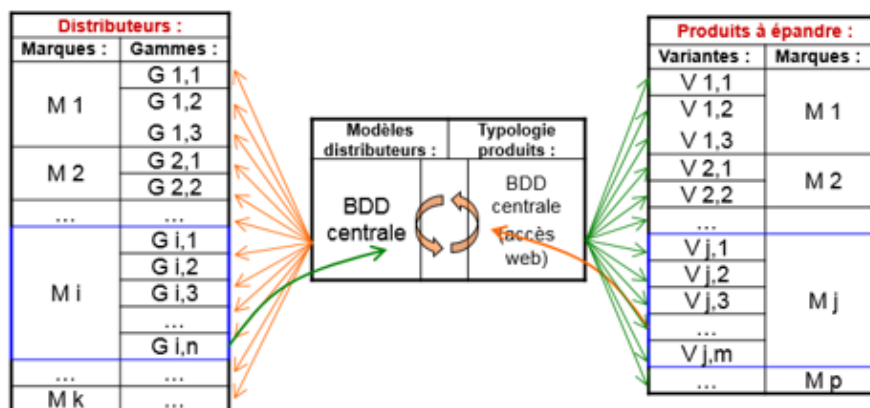
**Figure 2 :** Schéma combinatoire d'obtention des tableaux de réglage pour un ensemble de k marques d'épandeurs comportant chacune  $n_i$  gammes, épandant un ensemble de p marques d'engrais comportant là aussi  $m_j$  variantes.

Même pour un constructeur d'épandeur simplifiant au maximum sa gamme, il y aura toujours un minimum de disques de tailles différentes pour s'adapter aux contextes régionaux et couvrir l'intégralité des largeurs de travail cibles, et de l'autre côté plusieurs milliers de formulations d'engrais différentes, vendues en quantités plus ou moins importantes, pouvant être mélangées les unes aux autres, issues à

présent des filières de retraitement (engrais organo-minéraux), plus ou moins stables en spécificités interannuelles, ... Une explosion combinatoire impossible à résoudre qui conduit le plus souvent à ne référencer que les engrais les plus courants. La qualité finale d'application des autres produits repose ainsi uniquement sur la capacité des agriculteurs à régler eux-mêmes leur épandeur sur le terrain par mise en œuvre de méthodes à la fois fastidieuses et plus ou moins fiable.

La qualité des tableaux mis à disposition par les constructeurs les plus représentatifs, ainsi que la quantité de références qu'ils proposent, font partie des arguments pour l'achat d'une machine, ce qui justifie l'investissement à leur production. Sans gommer cet argument marketing dont disposent les meilleurs, l'arrivée sur le marché de capteurs online, permettant un réglage automatique de la machine sans recours à ces tables, va peut-être progressivement changer la donne : continuer d'entretenir ce service coûteux en l'état et de moins en moins différenciant va devenir une charge moins justifiée pour les entreprises, et l'hypothèse faite est qu'il leur faudra en abaisser les coûts sans en réduire trop leur qualité.

Face à un problème d'explosion combinatoire, la solution est en général d'ouvrir le système en créant d'un côté une base de données « modèles épandeurs », de l'autre une base de donnée « Comportements produits » et en reliant les deux par une « passerelle » permettant à tout individu de la base épandeur de trouver sa table de réglage avec tout produit de la base engrais. Le schéma de principe d'une telle méthode est représenté sur la Figure 3. Les relations deviennent ainsi « 1 à n » que ce soit dans le sens épandeur vers produit ou produit vers épandeur, sans explosion combinatoire.



**Figure 3 :** Principe de résolution de la combinatoire engendrée d'un côté par le grand nombre d'épandeurs et de l'autre par les multiples formulations d'engrais. Deux bases de données (BDD) sont créées, l'une contenant des modèles de distributeurs d'engrais, l'autre une typologie des produits, et une passerelle est établie pour connecter les deux bases.

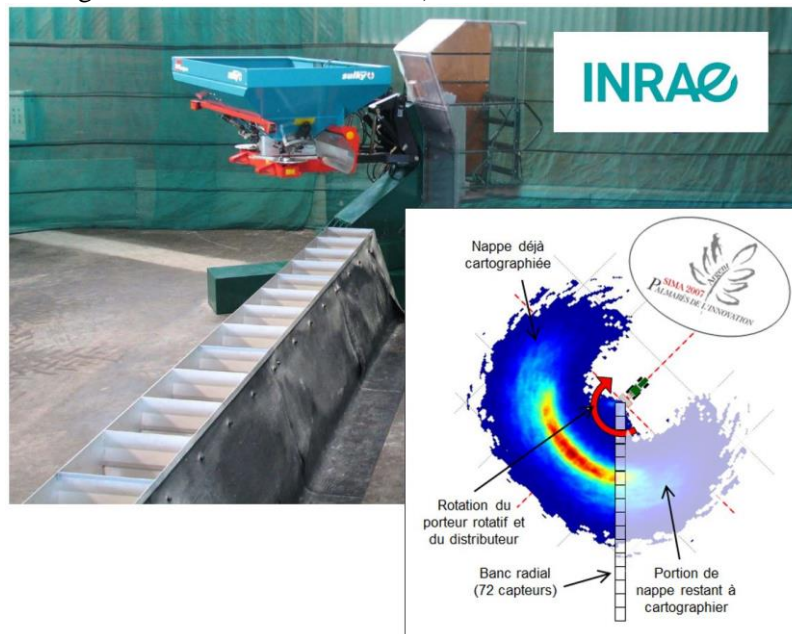
### *Evolutions de contexte autour de l'épandage*

Comme il a été dit précédemment, c'est autour de la répartition transversale (RT) que se réalise le réglage fin de l'épandeur pour une largeur donnée et un engrais donné. Historiquement, c'est donc sur la base de mesures réalisées au moyen d'un banc dit « transversal » qu'étaient obtenues les informations nécessaires à l'établissement des tableaux. Même si ces RT peuvent être modélisées et caractérisées morphologiquement (forme allant de triangle à trapèze par exemple), il est quasi impossible de mathématiser facilement la réponse comportementale d'une RT via des entrées au niveau des caractéristiques physiques des engrais.

Le recours plus systématique à présent à la mesure de type surfacique à haute résolution, permise par l'installation de bancs CEMIB (cf. Figure 4), permet en l'occurrence cette « mathématisation » de la réponse à l'épandage, et donc la modélisation de la nappe d'épandage comme peut effectivement le laisser supposer l'illustration de la mesure représentée sur la Figure 4. La nappe d'épandage peut être modélisée par une convolution de deux distributions proches de Gaussiennes :

- la première selon la distance au centre de rotation du disque (distribution de portée, déterminants  $P_m$  et  $\sigma_p$ ) ;

- la deuxième selon l'incidence angulaire par rapport à l'axe d'avancement de l'épandeur (distribution angulaire, déterminants  $\theta_m$  et  $\sigma_\theta$ ).



**Figure 4 :** Photo du banc rotatif CEMIB installé à INRAE (Montoldre – 03150) et illustration de principe de la méthode de mesure radiale, par secteurs angulaires successifs, mise en œuvre sur ce banc pour établir la nappe surfacique des densités d'engrais déposées au sol.

Cette possibilité de modélisation de la nappe est très intéressante pour plusieurs raisons :

- Chacune des deux distributions trouve une causalité assez directe avec les deux phases successives de l'épandage centrifuge :
  - o la phase d'accélération de l'engrais par le disque et ses pales explique, pour une gamme d'épandeur donnée, la distribution angulaire : pour un ensemble de réglages donné, c'est le temps d'accélération par la pale et donc l'aptitude à glisser / rouler de l'engrais qui conditionne l'angle de sortie ;
  - o la phase de vol balistique de l'engrais dans l'air explique, quant à elle, pour une gamme de machine et un ensemble de réglages donnés, la distribution de portée : le temps de vol et donc la portée sont conditionnés à l'aptitude balistique (aussi caractérisée d'aptitude à l'épandabilité) des engrais.
- Chacune des aptitudes listées ci-dessus trouvent une causalité dans les caractéristiques physiques des engrais suivantes :
  - o diamètre et sa distribution ;
  - o masse volumique vraie ;
  - o paramètre de forme (angularité / sphéricité).

Deux conclusions peuvent être tirées de ces possibilités :

- Il est possible de produire une « passerelle » d'un épandeur à un autre en modélisant les deux appareils chacun de leur côté ;
- Il est aussi possible de caractériser un engrais et ses aptitudes « accélération disque » et « balistique » en réalisant des mesures de laboratoire simples, rapides, peu coûteuses et répétables.

Plusieurs propos présentent et/ou valorisent ces relations et corrélations (1 – Villette et all, 2 – LE et all, 3 – Villette et all, 4 – Piron et all).

### ***Solution envisagée***

Comme l'a montré la section précédente, la connaissance du comportement à l'épandage d'un produit avec un épandeur peut permettre d'en déduire son comportement avec un autre épandeur. Il faut pour

cela disposer de « modèles » correspondants en fait aux relations de corrélation entre les paramètres mathématiques présentés précédemment concernant la portée et l'angle de projection. Sur la base de modélisations de ces paramètres suivant des lois normales, il est par exemple possible d'établir 4 équations de passage direct :

- $\theta_{m_{Ep2}} = a_{\theta} \times \theta_{m_{Ep1}} + b_{\theta}$
- $\sigma_{\theta_{Ep2}} = a_{\sigma\theta} \times \sigma_{\theta_{Ep1}} + b_{\sigma\theta}$
- $P_{m_{Ep2}} = a_{Pm} \times P_{m_{Ep1}} + b_{Pm}$
- $\sigma_{P-Ep2} = a_{\sigma P} \times \sigma_{P-Ep1} + b_{\sigma P}$

Avec  $\theta_m$  l'angle moyen,  $\sigma$  l'écart-type du déterminant considéré,  $P_m$  la portée moyenne et (a, b) les paramètres permettant la meilleure corrélation entre déterminants de l'épandeur 1 et ceux de l'épandeur 2 (exemple ici d'une relation linéaire).

### 1 – Mutualiser par centralisation la prise d'information concernant les comportements produits

La proposition de simplification proposée à l'ensemble de la profession par INRAE – UR TSCF est de centraliser la prise d'informations concernant le comportement des engrais avec un épandeur « étalon » (cf. [: Epandeur étalon INRAE](#) Figure 5) et ainsi d'établir une base de donnée comportementale alimentée en continu dans le temps au gré des nouvelles formulations disponibles sur le marché. Chaque engrais évalué dans ces conditions aurait ainsi sa « signature épandabilité » en contexte maîtrisé. L'épandeur étalon INRAE est un dispositif simple doté d'une trémie de stockage d'engrais, d'un orifice de dosage et d'alimentation du disque, et d'un disque d'épandage tronconique muni de deux pales égales (mêmes profils et longueurs) positionnées de manière radiale (pas d'inclinaison horizontale des pales, avec une génératrice de pale passant par le centre de disque). Aucun réglage n'est disponible sur cet épandeur et les mesures se déroulent en conditions maîtrisées (température et hygrométrie stabilisées), ce qui garantit, dans le temps, l'égalité des conditions expérimentales de prises d'informations.



**Figure 5 :** Epandeur étalon INRAE

La simplicité de cet épandeur permet une simplification de l'analyse de la nappe d'épandage obtenue, les deux secteurs d'éjection des engrais pouvant être considérés comme identiques grâce aux pales et à leurs orientations identiques. Les valeurs moyennes et de dispersion sur la portée et sur l'angle seront ainsi purement représentatifs de l'engrais utilisé, de ses caractéristiques moyennes et de leurs propres dispersions.

Par ailleurs, la généricité de cet épandeur le rend très proche d'un point de vue comportemental des épandeurs commerciaux, ce qui n'implique pas dans le raisonnement de nécessité de mise à l'échelle : les comportements extériorisés ont toute probabilité de s'apparenter aux comportements avec d'autres épandeurs.

### 2 – Elaborer les passerelles de corrélation avec les épandeurs commerciaux

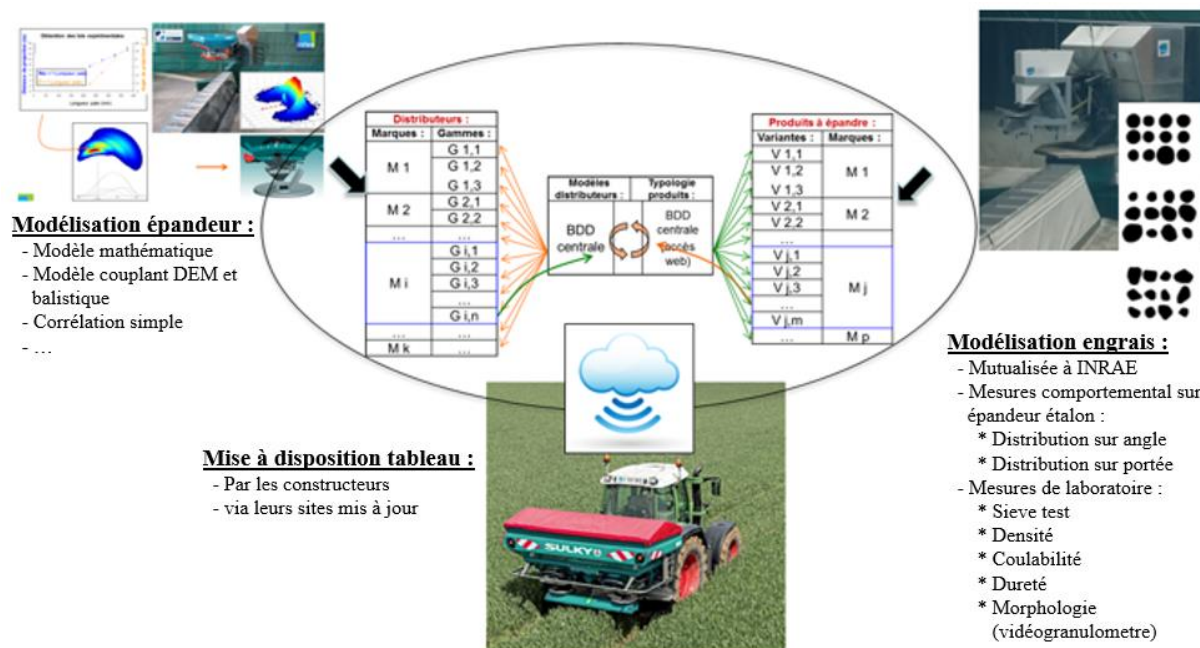
L'étape de mutualisation de la prise d'informations comportementales concernant les engrais réalisée, il s'agit ensuite, pour chaque épandeur (et même gamme d'épandeur) de créer les « modèles épandeurs » qui permettent, connaissant les caractéristiques produits, de déterminer les tableaux de réglages adaptés. Plusieurs solutions sont possibles pour la réalisation de cette étape :

- Le constructeur de l'épandeur dispose lui-même de ce type de modèle (qui peut se présenter sous plusieurs formes : corrélation simple avec des « tableaux types », simulateur informatique intégrant un modèle mathématique, simulateur informatique intégrant une partie en DEM, ...)
- Le constructeur ne dispose pas de modèle mais peut le créer sur la base de ses propres enregistrements au banc. Des mesures avec engrais types, évaluées sur les deux épandeurs, seront certainement nécessaires à cette étape ;
- Le constructeur ne dispose d'aucun modèle et alors INRAE - UR TSCF peut se charger d'en proposer un via une étude spécifique avec les machines du constructeur.

### 3 – Mettre à disposition des agriculteurs l'information de réglage

Les informations « engrais » étant disponibles, ainsi que les modèles de passage vers les épandeurs commerciaux, chaque constructeur peut, via ses propres canaux de diffusion, mettre à disposition les informations de réglage des épandeurs, en mentionnant le mode de création dudit tableau comme cela est fréquemment proposé sur les sites.

Le schéma de la Figure 5 illustre le principe global de fonctionnement d'une telle proposition, de la prise d'information mutualisée et centralisée concernant les comportements des engrais soumis à une accélération centrifuge puis à un vol balistique dans l'air, à la proposition des tableaux de réglage via les sites des constructeurs, en passant par les modèles d'épandeurs au niveau des constructeurs.



**Figure 6 :** Schéma de principe d'un dispositif proposant la mutualisation de l'édition des tableaux de réglages des épandeurs centrifuges par centralisation des prises d'informations concernant les comportements des engrais.

### Etude de faisabilité technique de la solution proposée

Cette solution imaginée, INRAE a conduit une étude technique pour en vérifier la faisabilité et en estimer les précisions envisageables.

#### Matériel et méthode

Côté engrais, environ 25 produits commerciaux ont été approvisionnés sur le site de Montoldre d'INRAE, directement par des fournisseurs informés de la démarche. Ces 25 produits ont été choisis pour couvrir du mieux possible les différents cas de figure rencontrés sur le terrain, combinant les formes de granulé (sphérique ou anguleuse), la densité (faible ou forte), la taille, la distribution granulométrique, ... Pour ces 25 engrais, les informations comportementales sur l'épandeur étalon, les mesures en laboratoire, ainsi que des mesures avec plusieurs disques commerciaux qui équipent des épandeurs BUREL Production (ex Sulky) et RAUCH ont été réalisées.

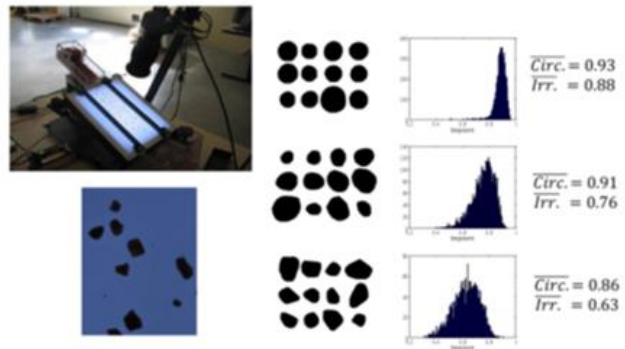
Concernant les mesures de laboratoire, au-delà des traditionnelles mesures de masse volumique apparente, de distribution granulométrique, de coulabilité et de densité, des mesures de caractéristiques morphologiques ont été réalisées via l'utilisation d'un vidéogranulomètre (cf. Figure 7 et la référence bibliographique 2 – Le TT. Et all).

Pour chaque lot d'engrais, entre 3000 et 5000 images de granulés différenciés sont acquises et analysées morphologiquement. Ce sont les paramètres de circularité et d'angularité qui sont en particulier valorisés pour l'estimation du Cx (savoir-faire INRAE).

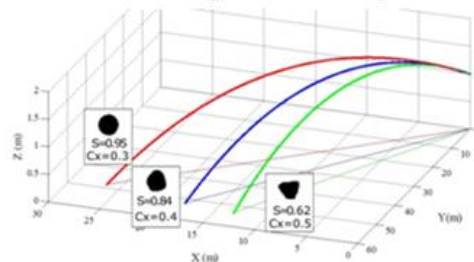
L'exemple de la dispersion autour du paramètre circularité des granulés est présenté sur le graphique de la Figure 8 (il y est perceptible que la dispersion autour de la médiane de circularité est croissante lorsque la circularité diminue. C'est un des facteurs de dispersion de la portée de projection et de l'aptitude à produire un épandage de qualité par ailleurs.

En ce qui concerne les mesures surfaciques d'épandage, elles ont été réalisées sur le banc CEMIB d'INRAE à Montoldre – 03150. Que ce soit pour les mesures réalisées avec l'épandeur étalon ou avec l'épandeur commercial, c'est la nappe produite par un seul disque qui est systématiquement mesurée (alimentation en engrais d'un seul des deux disques pour les épandeurs commerciaux), de telle manière à permettre une analyse comportementale. La mesure couplée de deux nappes sur un distributeur commercial ne permettrait pas d'identifier chacune des nappes et l'extraction des paramètres modèles recherchée.

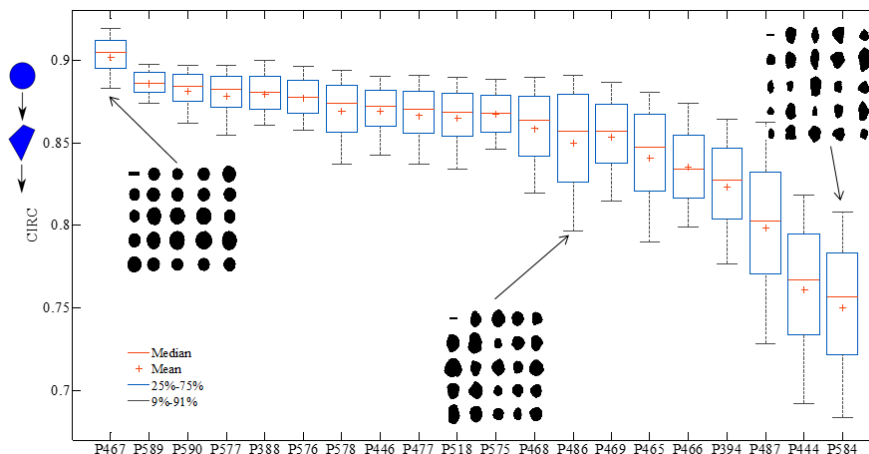
### Caractérisation morphologique (vidéogranulométrie)



### Exploitation pour estimation du Cx et de l'aptitude balistique



**Figure 7 :** Obtention des paramètres morphologiques des particules d'engrais impactant l'aptitude à l'épandage, par utilisation d'un vidéogranulomètre. Application à l'estimation du Cx pour les lots d'engrais.



**Figure 8 :** Classement de 20 engrais utilisés selon les critères de la distribution de circularité des lots de particules d'engrais.

Les comportements des engrais à l'épandage peuvent être ainsi mesurés dans tous les cas de figure : épandeur étalon, épandeur Burel Production et deux de ses disques, épandeur Rauch et 3 de ses disques.

Sur la base d'un savoir-faire INRAE et grâce à toutes les informations mesurées, un algorithme informatique est développé pour la production d'un modèle adapté à chaque cas de figure d'épandeur, permettant la prédiction de réglages sur la simple base des informations acquises au laboratoire et sur l'épandeur étalon.

In fine, les prédictions de nappes d'épandage obtenues pour les 25 engrais par application des modèles sont comparées aux réalités mesurées directement au banc, et ces deux nappes sources par engrais exploitées pour la création des trajectoires de réglages optimales minimisant le CV pour toutes les largeurs de travail jusqu'à 60m.

L'application de cette méthode est étendue à l'ensemble des produits de la base de données INRAE pour lesquels les mesures nécessaires sont disponibles, ce qui permet d'étendre la valeur statistique. L'analyse de la pertinence globale est faite sur la différence entre réglage estimé et réglage idéal.

### Résultats et précisions accessibles

#### Classement des comportements produits

L'étude met clairement en lumière la relation tendancielle entre l'angle d'éjection d'un engrais et sa portée de projection dans la nappe.

La Figure 9 illustre cette relation, en représentant un ensemble de points de coordonnées (Angle d'éjection, Portée) pour lesquels l'angle d'éjection a été centré sur la moyenne de l'ensemble des points :

- en dehors de toute considération sur les caractéristiques des engrais, ceux étant éjectés tôt présentent aussi une forte portée de projection, et inversement (analyse en tendance) ;
- la dispersion des points du nuage autour de cette relation linéaire s'explique par les paramètres des particules d'engrais (angularité, circularité, masse volumique, distribution de diamètre, ...).

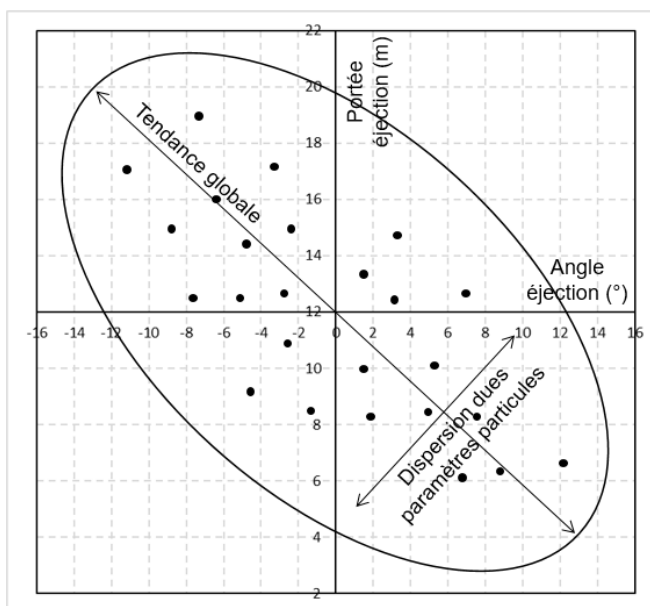
Cette relation, présentée pour l'épandeur étalon, se retrouve pour les différents cas de figures d'épandeurs commerciaux et chacun des disques, ce qui permet la passerelle de l'un à l'autre.

#### Aptitude à l'estimation des réglages

La Figure 10 illustre le type de matrice de performances d'épandage obtenu pour un engrais donné, l'ensemble des réglages angulaires disponibles sur l'épandeur et pour les largeurs de travail jusqu'à 60m. La trajectoire en blanc représente l'ensemble des meilleurs réglages à choisir avec cet engrais et cet épandeur pour minimiser la valeur de CV aux différentes largeurs de travail, en se basant sur la mesure directe obtenue au banc CEMIB avec cet engrais et ce disque. La trajectoire en noir représente de la même façon les meilleurs réglages estimés sur la base de l'application du modèle (et donc en ne mesurant qu'une performance avec l'épandeur étalon et en appliquant un modèle). Pour chaque largeur de travail il est possible de calculer, pour l'ensemble des largeurs de travail :

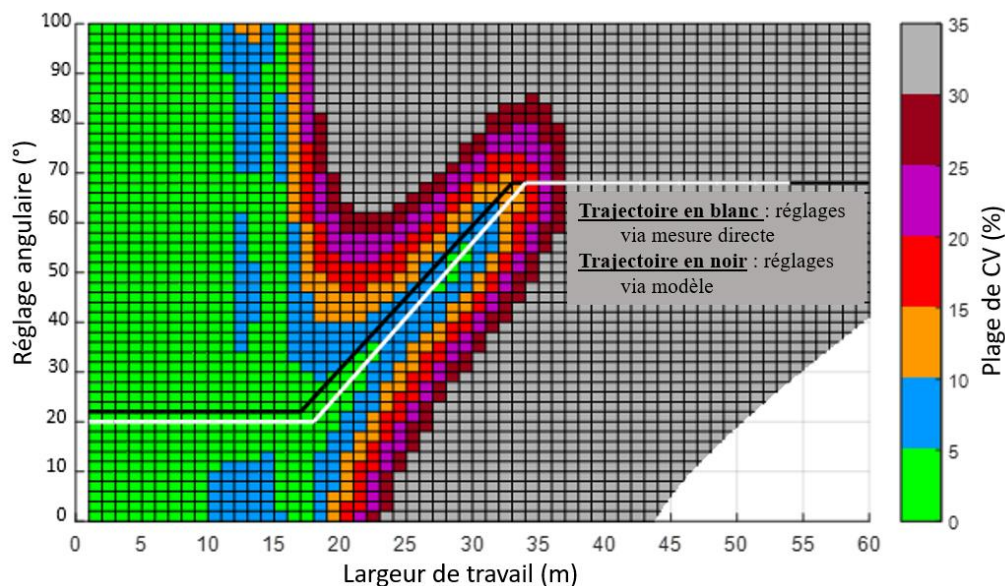
- La différence de réglage optimal entre « nappe en mesure directe » et « nappe estimée via modèle ». Cette différence est ici représentée en degré car c'est le moyen de réglage de l'épandeur considéré, mais il pourrait s'agir directement d'index machine.
- Les valeurs de CV qui seraient réellement obtenues en appliquant les réglages issus de l'estimation via modèle.

Dans l'exemple de la Figure 10, et pour la plage utile de largeur de travail de ce disque avec cet engrais, le différentiel de réglage entre l'optimal et l'estimé est largement inférieur à 5°, et le CV maximum inférieur à 10% quelle que soit la largeur de travail considérée.



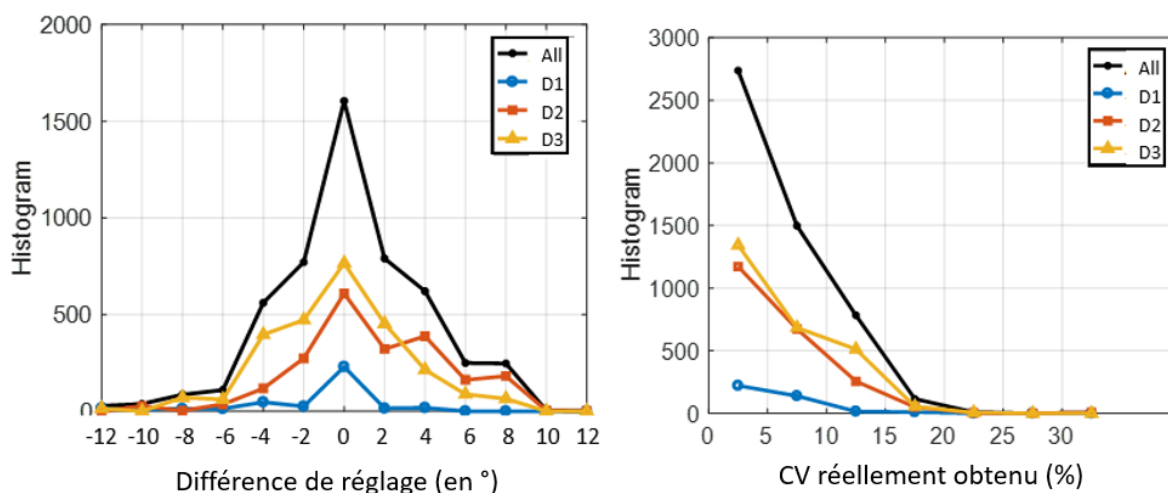
**Figure 9 :** Relations de principe entre portée de projection et angle d'éjection pour différents types d'engrais aux caractéristiques physiques différentes.





**Figure 10 :** Matrice des performances d'épandage pour un engrais, l'ensemble des réglages angulaires disponibles sur l'épandeur et pour toutes les largeurs de travail jusqu'à 60m. Matrice calculée sur la base de la nappe mesurée réellement.

En utilisant l'ensemble des engrais utilisés pour l'étude, ceux déjà en mémoire dans la base INRAE, et les deux marques d'épandeurs avec leurs disques, une estimation statistique de performance globale est produite, basée sur plusieurs milliers de cas de figure (croisement des entrées). Les graphiques de la Figure 11 présentent ces résultats statistiques.



**Figure 11 :** Graphiques d'évaluation statistique des performances d'estimation des réglages par la méthode développée. A gauche l'erreur de réglage en degrés (réglage optimal – réglage estimé), pour 3 disques D1, D2 et D3, ainsi que pour la totalité de ces 3 disques. A droite la distribution des occurrences de valeurs de CV rencontrés dans chaque classe ([0-5%], [5-10%], [10-15%], ...), pour les mêmes configurations que décrites à droite.

Ainsi la grande majorité (plus de 80% des réglages estimés se situe à  $\pm 4^\circ$  de l'optimum mesuré, avec une classe majoritaire sur l'erreur  $0^\circ$ . Il n'y a par ailleurs, quasiment pas d'erreur supérieure à  $\pm 10^\circ$ . Cela signifie que la méthode ne présente pas de biais dans l'estimation des réglages optimaux, et que la dispersion est très raisonnable.

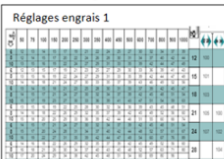
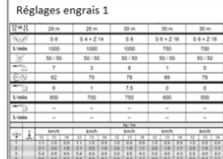
Cette conclusion est corroborée par le graphique des valeurs de CV obtenues en appliquant ces réglages, dont les deux classes majoritaires sont [0-5%] et [5-10%], quasiment aucune valeur de CV n'étant supérieure à 15%.

## Conclusion

Techniquement, il est possible d'estimer de manière très juste, les meilleurs réglages à appliquer à un épandeur pour épandre un engrais donné avec la meilleure homogénéité possible, en se basant sur une prise de données centralisée et l'utilisation d'un épandeur étalon.

La relation entre l'épandeur étalon et les épandeurs commerciaux utilisés dans cette étude est directe. Elle peut être établie par INRAE sur la base d'un projet, ou directement par le constructeur d'épandeur. La performance d'identification des meilleurs réglages est très bonne, avec des valeurs de CV finales inférieures à 15% dans la quasi-totalité des cas.

Sans vouloir se substituer aux méthodes déjà fonctionnelles et mises en place par les différents constructeurs, cette méthode trouve une place intermédiaire entre les deux extrêmes existants, « full mesures » (la meilleure en performance, la plus coûteuse en temps, la plus importante quantité d'engrais requise, la plus onéreuse) et « approchante » (beaucoup moins fiable en performances, très économe en temps, quantité d'engrais faible, ...). La Figure 12 illustre cet intermédiaire proposé en positionnant une méthode médiane « Mesure étalon », à la fois performante en précision de réglage, et peu coûteuse.

Obtention tableaux de réglages <b>SITUATION ENVISAGEABLE</b>	Quantité d'engrais nécessaire selon méthode utilisée			Total Quantité	Précision réglages disponibles <i>in fine</i>
<b>Mesure « approchante »</b> Systèmes propriétaires constructeurs	50 kg			5 kg	Moyenne CV < 20%
<b>« MESURE ETALON »</b> CEMIB sur Etalon Irstea	1 BB			1 BB	Assez bonne CV < 15%
<b>« MESURE ONE DISC »</b> CEMIB 1 disque d'1 épandeur de chaque marque	1 BB	1 BB	1 BB	N BB	Assez bonne 10% < CV < 15%
<b>« FULL MESURE »</b> CEMIB avec chaque disque, chaque épandeur de chaque marque	8 BB	8 BB	8 BB	8 * N BB	Bonne CV < 10%
Tableaux de réglage final	<b>Sulky, toutes gammes</b> 		<b>Rauch, toutes gammes</b> 	...	

**Figure 12 :** Evaluation croisée « coût » / « Performance » des différentes méthodes d'édition des tableaux de réglages.

Un avantage supplémentaire à la méthode proposée réside dans le fait que son niveau de performance s'améliore avec le temps et le nombre d'engrais présents dans la base. En effet, la finesse des modèles s'améliore avec le nombre de configuration de nappes considéré, qui sont autant de signatures produits par rapport à l'épandage : pour proposer une comparaison statistique, le nombre de classe d'un histogramme peut augmenter avec le nombre d'individus évalués.

## Perspectives

Une solution permettant à chacun de minimiser les risques en phase d'amorçage du dispositif pourrait être :

- Les producteurs / distributeurs des engrais font référencer leurs produits au niveau d'INRAE (et dans un premier temps peuvent aussi les faire référencer chez les constructeurs comme actuellement). Ils bénéficient ainsi automatiquement, et pour un coût faible d'une évaluation d'épandabilité de leur produit en absolu et en relatif. Cette évaluation peut d'emblée servir à fournir des recommandations en cas limites. L'étude d'épandabilité peut aussi être perçue dans le cadre d'un « contrôle qualité » au cours du temps ;
- Les constructeurs continuent s'ils le souhaitent leurs référencement internes sur banc, tout en collectant les données de la base mutualisée afin d'établir les modèles (autre solution : INRAE produit ces modèles à la demande par des études ciblées) ;

Ils alimentent par ailleurs leurs bases de tableaux de réglages sur internet en mentionnant le mode spécifique d'obtention ;

- INRAE réalise les mesures avec les différents engrais envoyés par les fabricants et alimente une base de données accessible par les constructeurs pour la collecte d'informations.

Aucune des parties ne prend ainsi à sa charge des frais sans retour direct proportionnel, ni les fabricants, ni les constructeurs, ni INRAE. Par ailleurs les problèmes de confidentialité sont gérés puisque la base n'est pas accessible dans son entièreté par tout le monde.

Enfin, la méthode proposée permet l'établissement des tables de réglages (6 – Piron) de manière facilitée pour les engrais en croissance de production tels que les organo-minéraux, très problématiques lors des mesures au banc en raison des poussières générées.

De la même façon, la méthode INRAE développée pour l'estimation des réglages en cas de mélanges physiques d'engrais (bulk) est aussi applicable sur la base des informations collectées sur épandeur étalon, rendant possible des recommandations par les constructeurs via application de leurs modèles.

## Références bibliographiques

1 - Hybrid centrifugal spreading model to study the fertiliser spatial distribution and its assessment using the transverse coefficient of variation - Villette, S., Piron, E., Miclet, D., 2017. Computers and Electronics in Agriculture 137 (2017), 115–129.

2 - Morphology characterization of irregular particles using image analysis. Application to solid inorganic fertilizers – Le TT., Miclet D., Heritier Ph., Piron E., Chateauneuf A., Berducat M. Computers and Electronics in Agriculture 147 (2018), 146–157.

3 - A virtual spreader to overcome experimental limits: Example of use to deepen the meaning of the transverse coefficient of variation – Villette S., Piron E, Miclet D. 1st AXEMA-EurAgEng Conference 25 Feb 2017, Villepinte, France.

4 - Centrifugal spreader eco-evaluation method: Sulky Econov example. Piron E., Miclet D., De-Freitas N., Leveillé L., Juhel T., Guyomarch Y. 1st AXEMA-EurAgEng Conference 25 Feb 2017, Villepinte, France.

5 - CEMIB: an innovative bench for spreader eco-design. Piron E., Miclet D., Villette S. Ageng 2010, Clermont-Ferrand, France.

6 – Evaluation des performances des épandages des engrais de mélange. Piron E. 14<sup>e</sup> rencontres internationales de l'AFCOME. Reims, 22 octobre 2015.