

**CONVENTION MEDDE – DGPR / SNPQE**  
**Prévention des nuisances et qualité de l'environnement**

*Ces travaux bénéficient du soutien du Ministère de l'Ecologie  
dans le cadre de la convention n°2200668148  
et du Ministère de l'Agriculture*

*dans le cadre de la convention DGPAAT-BSE 2012-2014 du 12/11/2012*



# **Etude des performances des équipements de maîtrise des doses des matériels d'épandage de matière organique**

## ***Rapport sur la méthodologie retenue pour l'évaluation des équipements***

Mai 2014

**ROUX JEAN-CHRISTOPHE  
DE FREITAS NICOLAS  
PRADEL MARILYS**

**PIRON EMMANUEL  
MAZOYER JACKY  
MICLET DENIS**

Irstea, Unité de recherche TSCF  
Centre de Clermont-Ferrand  
Domaine des Palaquins  
03150 Montoldre  
[www.irstea.fr](http://www.irstea.fr)



**Ces travaux bénéficient d'un co-financement du Ministère chargé de l'agriculture**

## Table des Matières

I - CONTEXTE & PRINCIPE.....	5
I - 1. Contexte et enjeux .....	5
I - 2. Principe général d'un matériel d'épandage de produit organique.....	5
I - 3. Réglages des épandeurs de fumier .....	6
I - 4. Principe du modèle et de la simulation.....	6
II - PARAMETRES D'ENTREE DU MODELE .....	9
II - 1. Types de machine .....	10
II - 2. Types de produit .....	11
II - 3. Types d'équipement de maîtrise de dose .....	11
III - SIMULATION ET MODELES ASSOCIE.....	12
III - 1. Méthode de modélisation d'un paramètre.....	12
III - 2. Méthode de simulation.....	12
III - 2.1. Modélisation de paramètres de réglage machine .....	12
III - 2.2. Masse réelle du chargement / Masse estimée du chargement.....	12
III - 2.3. Modélisation des paramètres du socle du modèle .....	13
III - 2.4. Projection du modèle sur la largeur de travail (Lw [m]) .....	15
IV - RESULTAT.....	16
IV - 1. Résultat brut.....	16
IV - 2. Exemple d'illustrations de résultats qui seront présentés dans l'outil web.....	17

## Table des Figures

FIGURE 1 :	DISPOSITIF D'EPANDAGE (IRSTEA ET AL, 2007).....	5
FIGURE 2 :	ABAQUE .....	6
FIGURE 3 :	MODELE & DISPOSITIFS DE MAITRISE DE DOSE .....	8
FIGURE 4 :	PARAMETRES D'ENTREE DU MODELE.....	9
FIGURE 5 :	MODELISATION DE LA DISTRIBUTION D'UN PARAMETRE .....	12
FIGURE 6 :	CHARGEMENT.....	12
FIGURE 7 :	PARAMETRES ET DISPOSITIFS DE MAITRISE DE LA DOSE .....	14
FIGURE 8 :	PROJECTION DU MODELE DANS LA MATRICE .....	15

## Table des Photos

PHOTO 1 :	HERISSONS VERTICAUX.....	10
PHOTO 2 :	TABLE D'EPANDAGE.....	10

## Table des Graphiques

GRAPHE 1 :	DISTRIBUTION DE LA SECTION DU PRODUIT .....	14
GRAPHE 2 :	RESULTAT BRUT .....	16
GRAPHE 3 :	DISTRIBUTION SANS DISPOSITIF .....	17
GRAPHE 4 :	DISTRIBUTION AVEC UN DISPOSITIF SUR UN PARAMETRE .....	17
GRAPHE 5 :	DISTRIBUTION AVEC UN ENSEMBLE DE DISPOSITIFS.....	17

## INTRODUCTION & OBJECTIF

---

Une bonne valorisation des produits organiques solides par épandage est étroitement liée au devenir du produit épandu et aux pertes dues aux émissions potentielles. L'utilisation d'équipements de maîtrise de dose sur les épandeurs permet d'optimiser l'apport en éléments fertilisants (diminution des sur et sous-dosage) favorisant ainsi leur assimilation par les plantes et impactant aussi réellement le bilan économique, environnemental et sociétale de l'épandage.

Ce travail a pour finalité de développer un outil permettant de renseigner, de sensibiliser et de guider objectivement un acheteur potentiel ou un conseiller technique vers le dispositif de maîtrise de dose le plus adapté à ses attentes. Basé sur des simulations issues de données réelles et extrapolées, cet outil permet de visualiser l'efficacité des différents équipements de maîtrise de dose. En évaluant l'efficacité de chacun des dispositifs de maîtrise de dose l'utilisateur de l'outil sera à même de choisir et d'acquérir le ou les dispositifs adéquates à sa problématique et à ses objectifs maîtrise de sa dose.

## I - CONTEXTE & PRINCIPE

---

### I - 1. Contexte et enjeux

---

L'étude du parc des matériels d'épandage réalisé en 2012 grâce au soutien du MAAF a montré la faible utilisation des équipements de maîtrise de dose (Mazoyer, 2012). Les entrepreneurs de travaux agricoles sont les principaux utilisateurs de ces équipements additionnels du fait des exigences de service rendu (notamment de dosage à épandre), les autres utilisateurs n'en faisant actuellement quasiment aucun usage. Pourtant les produits résiduaux organiques (effluents d'élevage, compost, boues d'épuration...), potentiellement riches en éléments fertilisants représentent une source importante de nutriments pour fertiliser les cultures et abaisser la facture globale en engrais minéraux. Dans ce contexte, l'utilisation d'épandeurs classiques, dépourvus d'organes de maîtrise de dose, peut engendrer de fortes variabilités de concentrations, très néfastes lors des surdosages. Les **équipements de maîtrise de dose (pesée totale de la charge, volet pousseur, tablier accompagnateur, DPA (Débit proportionnel à l'avancement))**... sont censés prendre en compte l'ensemble des paramètres permettant de réguler le débit d'alimentation des organes épargilleurs de la machine et proposer ainsi une solution technologique efficace pour les utilisateurs.

### I - 2. Principe général d'un matériel d'épandage de produit organique

---

Un épandeur est constitué d'une caisse montée sur châssis avec un ou plusieurs essieux pourvus de pneumatiques. La caisse est équipée à l'arrière d'un dispositif de déchiquetage et de projection du produit et au fond d'un tapis. Ce tapis connu sous le nom de fond mouvant entraîne le produit vers le dispositif de déchiquetage et de projection.

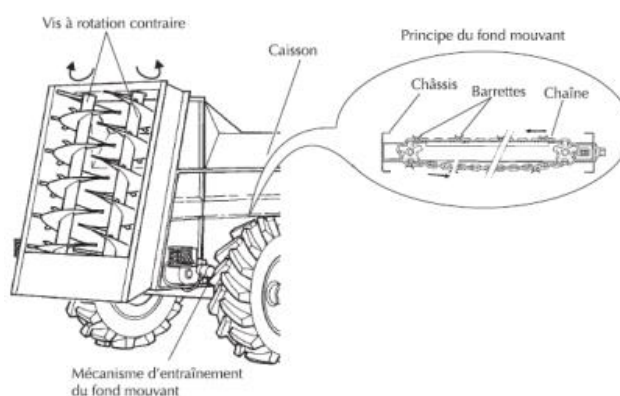


Figure 1 : Dispositif d'épandage (Irstea et al, 2007).

### I - 3. Réglages des épandeurs de fumier

Le réglage d'un épandeur de fumier consiste à régler la vitesse du fond mouvant en fonction de l'objectif de dose fixé. Il peut être réalisé avec un abaque (Chambre d'agriculture de Bretagne et al, 2007.) :

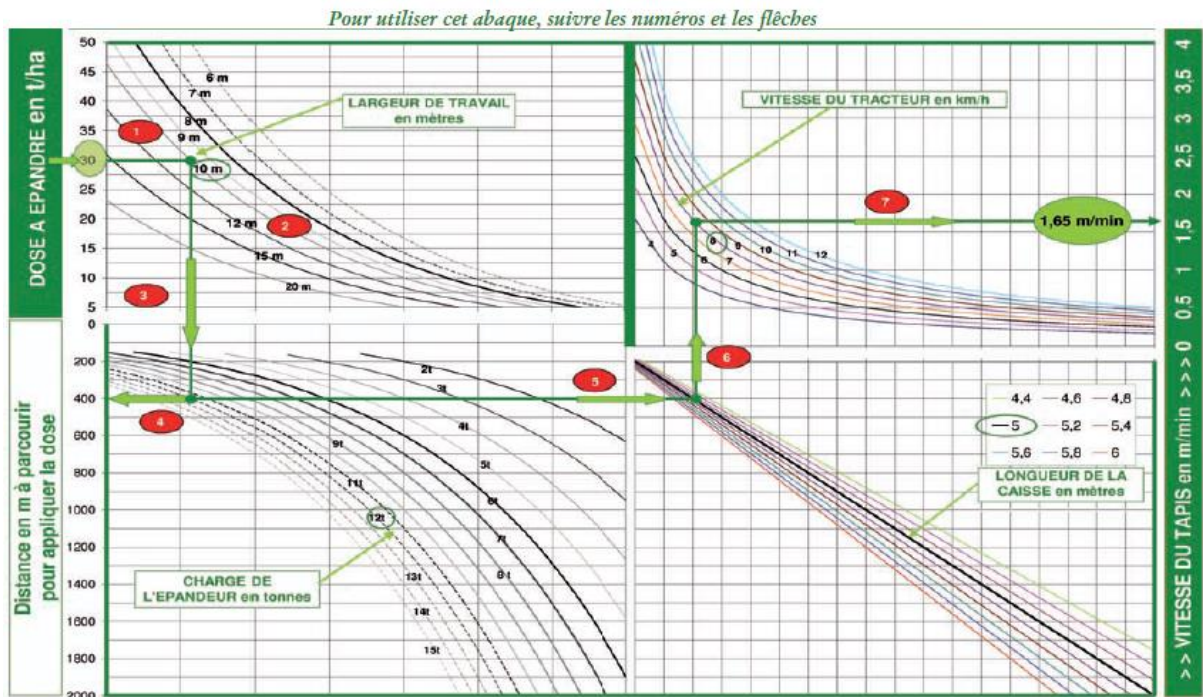


Figure 2 : Abaque

Cet abaque présente les différents paramètres que doit maîtriser et connaître l'utilisateur pour réaliser le réglage de sa machine.

### I - 4. Principe du modèle et de la simulation

Le modèle utilisé dans le cadre de cette étude repose sur les paramètres introduits dans l'abaque vus précédemment. L'utilisateur, pour régler sa machine, doit configurer la vitesse de déplacement du produit dans la caisse en fonction de son objectif de dose. Pour y parvenir, l'utilisateur doit connaître ou déterminer :

- |                         |                                |                    |
|-------------------------|--------------------------------|--------------------|
| - L'objectif de dose    | D                              | Exemple : 30t/ha   |
| - Largeur de travail    | L <sub>w</sub> (m)             | Exemple : 10m      |
| - Charge de l'épandeur  | M (kg)                         | Exemple : 12 000kg |
| - Longueur de la caisse | L <sub>(épandeur)</sub> (m)    | Exemple : 5m       |
| - Vitesse du tracteur   | V <sub>(Tracteur)</sub> (km/h) | Exemple : 8km/h    |

Ces paramètres sont nécessaires pour obtenir la vitesse du dispositif entraînant le produit (V<sub>(Produit)</sub> en m/min) obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$V_{(Produit)} = \frac{D * L_w * V_{(Tracteur)}}{0.6 * \frac{M}{L_{(Epandeur)}}}$$

- |                    |                                |                     |
|--------------------|--------------------------------|---------------------|
| - Vitesse du tapis | V <sub>(Produit)</sub> (m/min) | Exemple : 1.65m/min |
|--------------------|--------------------------------|---------------------|

Notons que les paramètres : Charge de l'épandeur et Longueur de la caisse seront modélisés afin de d'évaluer le réglage voulu par l'utilisateur. Cependant, ces deux paramètres ne décrivent pas des phénomènes physiques liés au déchargement de la machine. Afin de modéliser l'épandage en champs nous utiliserons les paramètres suivants :

- Section de passage du produit du S (m<sup>2</sup>)                                  Exemple : 2m  
dispositif d'épandage
- Masse volumique du produit    μ (kg/m<sup>3</sup>)                                  Exemple : 1 200kg/m<sup>3</sup>

(Dans notre modèle un épandeur de longueur de tapis : 5m correspond à un épandeur de 10m<sup>3</sup>)

Le calcul de la dose devint :

$$D = \frac{0.6 * S * \mu * V_{(Produit)}}{L_w * V_{(Tracteur)}}$$

avec D (t/ha), S (m<sup>2</sup>), μ (kg/m<sup>3</sup>), V<sub>(Produit)</sub> m/min, L<sub>w</sub> (m) et V<sub>(Tracteur)</sub> (km/h)

- Dose    D (t/ha)                                  Exemple : 30t/ha

**Chacun des paramètres de cette équation doit être maîtrisé pour atteindre l'objectif de dose. Cette équation constitue le socle du modèle de simulation que nous avons développé, car la fonction d'un équipement de maîtrise de dose est d'agir sur un des paramètres de cette équation dans le but de le régler comme le montre la figure suivante :**

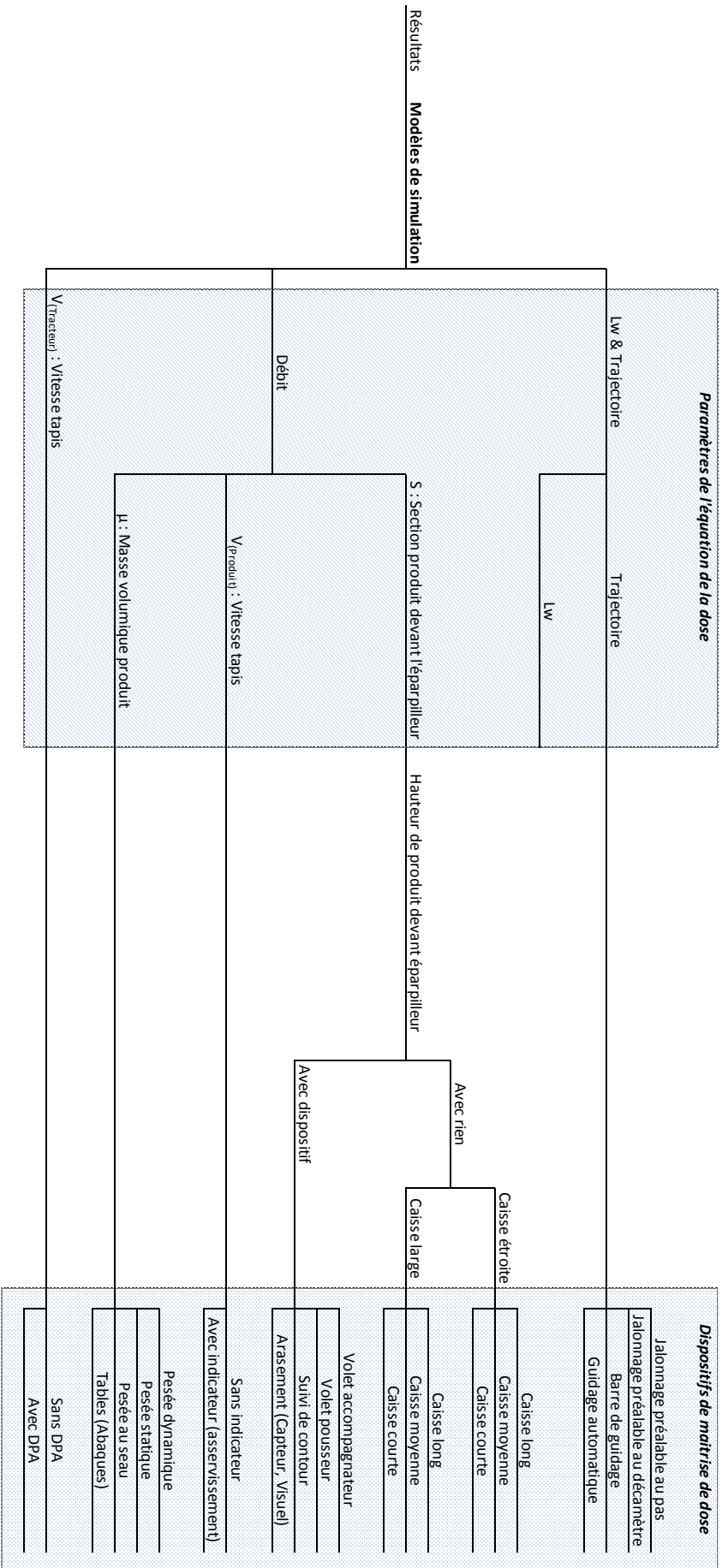


Figure 3 : Modèle & dispositifs de maîtrise de dose



## II - PARAMETRES D'ENTREE DU MODELE

Les paramètres d'entrée permettent de définir l'épandeur et les dispositifs de maîtrise de dose que souhaite évaluer l'utilisateur :

**Définition épandeur**

**Définition de votre épandeur virtuel**

Volume de caisse : 12 mètres cube

Type de caisse : Etroite

Longueur de caisse : 5.5 mètres

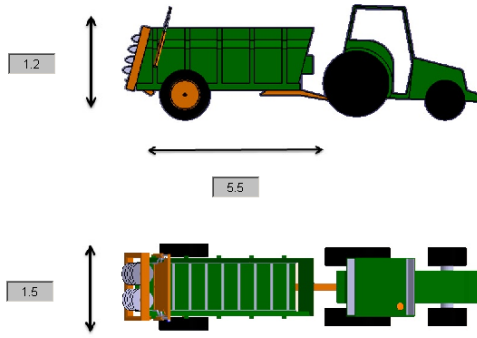
Largeur de caisse : 1.5 mètres

Hauteur de caisse : 1.2 mètres

Dispositif d'épandage : Hérissons verticaux

Type de produit : Fumier

Forme d'épandage : Triangle



OK

**Dispositif de maîtrise de dose**

**Equipements de votre épandeur virtuel**

Objectif de dose : 15 t/ha

Vitesse d'épandage : 10 km/h

Longueur du champ : 100 m

Largeur de travail : 16 m

**Gestion de la largeur de travail**

Jalonnage : Sans jalonnage

**Gestion de la masse volumique**

Pesée dynamique

Pesée statique

Autres : Aucune

**Gestion de la régularité de débit**

Aucun équipement

Volet accompagnateur

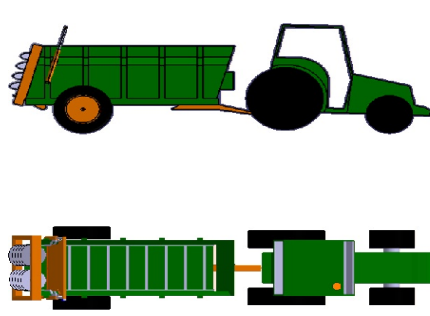
Volet pousseur

Suivi de contour

Arasement

**Gestion de la vitesse du fond mouvant**

Dispositif : Sans DPA sans indicateur



OK

Figure 4 : Paramètres d'entrée du modèle

## II - 1. Types de machine

---

Le choix du type de machine utilisé pour réaliser l'interface repose sur l'étude : Étude du parc des matériels d'épandage de matière organique en France (Mazoyer, 2012). Cette étude montre que les dispositifs d'épandage les plus courants sur le marché sont : les épandeurs avec hérissons verticaux et les tables d'épandage. La description de ces dispositifs est la suivante (Roussel et Mazoyer, 2012) :

### *Les épandeurs à hérissons verticaux*

- Il s'agit de matériels dont les organes d'éparpillages sont constitués de deux rotors de grand diamètre à axe vertical munis de couteaux. Ces hérissons, légèrement inclinés vers l'avant, tournent en sens inverse l'un de l'autre. Les principales variantes de ces hérissons sont dimensionnelles et cinématiques. Le produit est déchiqueté sur toute la hauteur des hérissons, puis éjecté. À la base des hérissons, des plateaux équipés de pales fixes ou mobiles favorisent l'éjection du produit. Ces matériels, plutôt en usage dans les exploitations d'élevage, sont bien adaptés à l'épandage du fumier. Les largeurs de travail sont comprises entre 5 et 12 m.

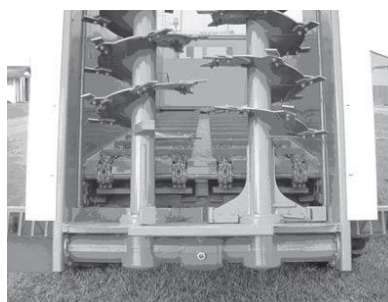


Photo 1 : Hérissons verticaux

### *Les épandeurs à table d'épandage*

Il s'agit d'épandeurs dont les organes de déchiquetage et d'éparpillages sont distincts :

- le déchiquetage est réalisé par des hérissons, indépendants de la table d'épandage, disposés horizontalement et transversalement. De grand diamètre, ces hérissons déchiquettent la matière, et la projettent contre un capot à paroi verticale qui surplombe la table d'épandage

- l'éparpillages est assuré par une table formée de 2 à 4 plateaux rotatifs munis de pales, ou bien de pales rotatives seules. Ces éléments projettent le produit avec une largeur de travail comprise entre 10 et 18 m.



Photo 2 : Table d'épandage

On observe également que les capacités des machines les plus courantes sont de 10 à 20m<sup>3</sup>, au vu du matériel présent sur le marché (Mazoyer, 2012), l'utilisateur pourra choisir entre les capacités suivantes : Caisses étroites : 10 – 12 – 15 et 16m<sup>3</sup> / Caisses larges : 20 et 25m<sup>3</sup>. Notons que ces choix de capacités "machines" donnent un cadre qui correspond également au travail réalisé dans l'étude : (Roussel et Mazoyer, 2006). Cette étude nous permettra de lier la simulation à des données réelles.

## II - 2. Types de produit

---

Afin que l'utilisateur ait un panel de produits à tester nous proposons les choix suivants :

### *Épandeur à hérissons verticaux :*

- Fumier,
- Fumier composté,
- Boues chaulées

### *Épandeur à table :*

- Fumier,
- Fumier composté,
- Co-compost MIATE.

## II - 3. Types d'équipement de maitrise de dose

---

L'étude introduite précédemment (Mazoyer, 2012) a également réalisé un état des lieux des types d'équipement de maitrise de dose présents sur le marché français. Cette étude montre que le nombre et les types d'équipement utilisés sur le marché sont très faibles. Pour atteindre notre objectif de développement d'un outil de renseignement, de sensibilisation et de guide objectif pour un acheteur potentiel ou un conseiller technique, nous avons modélisé la majorité des équipements présents sur le marché jouant un rôle sur la maitrise de la dose et identifiés dans la liste ci-dessous en caractère gras au-delà des pratiques manuelles de jalonnage ou de mesure de la densité du produit (pesée au seau) :

### *Gestion de la largeur de travail :*

- Jalonnage préalable au pas
- Jalonnage préalable au décamètre
- **Barre de guidage**
- **Guidage automatique**

### *Gestion de la régularité de débit :*

- **Volet accompagnateur**
- **Volet pousseur**
- **Suivi de contour**
- **Arasement** (Capteur, Visuel)

### *Gestion de la masse volumique :*

- **Pesée dynamique**
- **Pesée statique** (1-3-4-6 points de mesure sur la machine)
- Pesée au seau
- Tables (Abaques)

### *Gestion de la vitesse du fond mouvant :*

- Sans DPA<sup>1</sup> sans indicateur
- **Sans DPA mais avec indicateur**
- **Avec DPA**

---

<sup>1</sup> DPA : Débit proportionnel à l'avancement

### III - SIMULATION ET MODELES ASSOCIE

Afin de réaliser des simulations au plus proche de la réalité chaque paramètre modélisé représente un phénomène physique.

#### III - 1. Méthode de modélisation d'un paramètre

L'équation constituant le socle du modèle fait intervenir des paramètres qui **peuvent tous être modélisés par une distribution**. La modélisation de ces distributions se fait en deux étapes car très souvent associée à deux variances. Une **variance dite longue (VL)** qui va représenter l'écart à la valeur "juste" et une **variance dite courte (VC)** qui va représenter la dispersion propre de la distribution. Comme le montre la figure suivante, un premier tirage est effectué dans la distribution modélisant la VL. Ce tirage constitue la VL pour cette simulation. Puis en chaque point de la simulation un deuxième tirage dans la distribution modélisant la VC est réalisé. C'est l'ensemble de ces tirages qui constitue la modélisation d'un paramètre pour une simulation donnée.

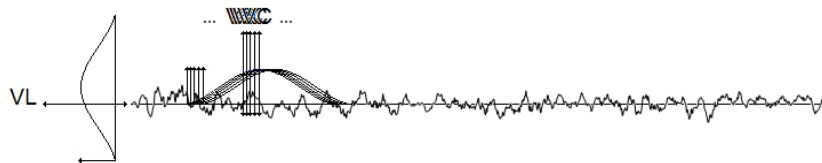


Figure 5 : Modélisation de la distribution d'un paramètre

#### III - 2. Méthode de simulation

La première étape de la simulation est de modéliser les paramètres utilisés par l'opérateur lors des réglages de sa machine comme décrit au paramètre I - 4. L'étape 2 consiste à modéliser chaque paramètre du socle du modèle, suivant la méthode vu au paragraphe précédent. Cette étape alimente l'étape 3 de réalisation de la projection du modèle dans 3 dimensions x, y, z avec x : longueur du champ, y : largeur du champ, z : dose. Ces trois dimensions vont constituer une matrice qui sera exposée au paragraphe III – 2.4..

##### III - 2.1. Modélisation de paramètres de réglage machine

Les paramètres décrits dans l'abaque au paragraphe I – 3. sont de deux types :

- Les paramètres d'entrée du modèle choisis par l'opérateur: dose à épandre, largeur de travail, vitesse tracteur, longueur de la caisse,
- Le paramètre à évaluer : charge de l'épandeur. Ce dernier paramètre se définit lui-même en deux sous-catégories : la charge de l'épandeur réelle et la charge de l'épandeur estimée par l'utilisateur.

##### III - 2.2. Masse réelle du chargement / Masse estimée du chargement.

Pour évaluer la masse réelle du chargement, nous devons connaître le volume réellement chargé. La variabilité du volume est imputable à la forme du trapèze confectionné lors du chargement au-dessus des ridelles (Cf : figure ci-contre). La VC est constituée de deux tirages aléatoires dans deux lois Normales, une centrée sur l'angle BÂC et une autre sur la hauteur DE avec des écart-types représentant leurs variabilités possibles. Une fois le volume réel et la masse volumique réelle (voir paragraphe ci-après) connus, nous obtenons la masse réellement chargée

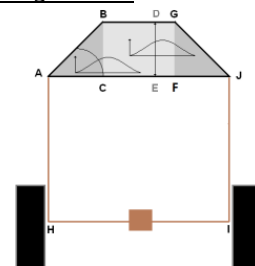


Figure 6 : Chargement

L'utilisateur accède à la masse estimée du chargement par un des dispositifs de maîtrise de dose suivant :

- *Gestion de la masse du chargement :*

- Pesée statique de l'épandeur (1-3-4-6 points de mesure),
- Pesée au seau du produit \* Volume de l'épandeur défini par le constructeur,
- Tableau de densité \* Volume de l'épandeur défini par le constructeur.

III - 2.3. Modélisation des paramètres du socle du modèle

Les modèles de chacun des paramètres utilisés pour la simulation (présentés au paragraphe I – 4.) sont décrits par l'illustration ci-après.

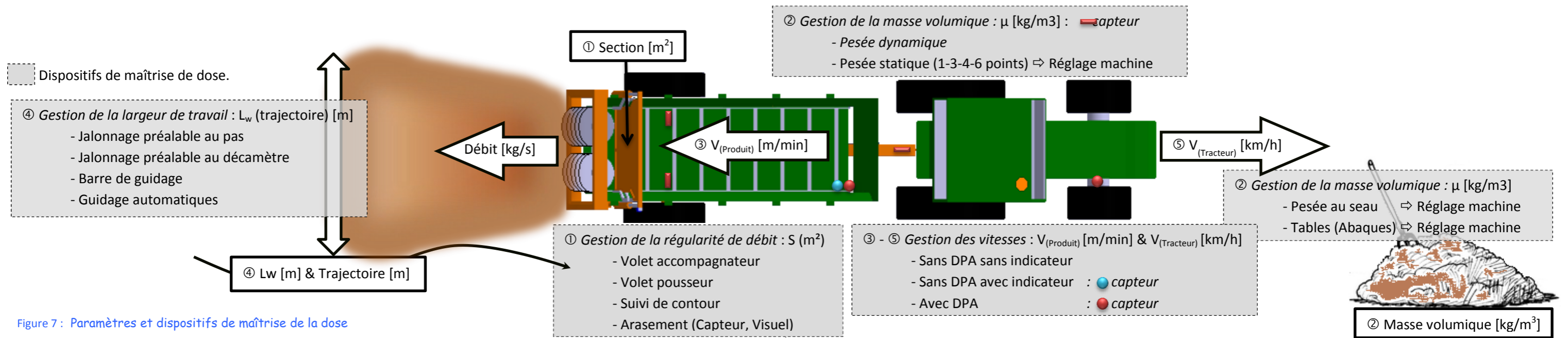


Figure 7 : Paramètres et dispositifs de maîtrise de la dose

$$Dose [t/ha] = \frac{0.6 * Débit [kg/s]}{L_w * V_{(Tracteur)}}$$

$$Débit [kg/s] = \frac{0.6 * S * \mu * V_{(Produit)}}{60}$$

**①  $S$  : section du produit [m<sup>2</sup>]**  
La section est modélisée pour chaque vidange de l'appareil

**VL de  $S$  :**  
Dans le cas de la section, la VL est un peu particulière. Elle est modélisée par trois distributions, elles-mêmes modélisées à partir des valeurs réelles de l'étude (Roussel et Mazoyer, 2006). Le graphique ci-dessous présente un exemple de modélisation de la VL de  $S$  :

**②  $\mu$  : Masse volumique en dynamique [kg/m<sup>3</sup>]**  
La masse volumique en dynamique est modélisée une fois par simulation.

**VL de  $\mu$  :**  
La VL ( $\mu$  réel) est un tirage aléatoire entre deux bornes en fonction du produit. Le choix des bornes fait suite aux essais de caractérisation du produit sur le site de Montoldre.

**VC de  $\mu$  :**  
La VC repose sur un tirage aléatoire dans une loi Normale centrée sur la masse volumique et d'écart-type défini par la variabilité des mesures réalisées sur notre site.

**VC chargement de  $\mu$  :**  
Le chargement induit des cavités, la modélisation d'une deuxième VC sur  $\mu$  modélise ce phénomène. La VC repose sur un tirage aléatoire dans une loi Normale centrée sur la masse volumique et d'écart-type long.

**③  $V_{(Produit)}$  : Vitesse produit [m/min]**  
La  $V_{(Produit)}$  est modélisée pour chaque vidange de l'appareil. Ce modèle est une sinusoïde :

$$VL [(V_{(Produit)} \text{ réel})] + VC [(Amplitude/2 * \sin(\text{Fréquence} * x + \text{Oscillation}))]$$

**VL de  $V_{(Produit)}$  :**  
La VL ( $V_{(Produit)}$  réelle) repose sur un tirage aléatoire dans une loi Normale centrée sur la vitesse tapis choisie par l'utilisateur (réglage de l'épandeur paragraphe : 1 - 3.) et d'écart-type défini par la variabilité intrinsèque de la machine à produire la vitesse correspondant au réglage.

**VC de  $V_{(Produit)}$  :**  
L'amplitude et la fréquence reposent sur un tirage aléatoire dans une loi Normale. L'oscillation est un tirage aléatoire entre les bornes 0 -  $2\pi$ .

**④  $L_w$  (Trajectoire) [m]**  
La trajectoire est modélisée pour chaque traversée de champ. Ce modèle est une sinusoïde :

$$VL [(L_w \text{ réel})] + VC [(Amplitude/2 * \sin(\text{Fréquence} * x + \text{Oscillation}))]$$

**VL Trajectoire :**  
La VL repose sur un tirage aléatoire dans une loi Normale centrée sur la largeur de travail défini par l'utilisateur et d'écart-type défini par la variabilité donnée à la trajectoire de la machine induite par le conducteur.

**VC Trajectoire :**  
L'amplitude et la fréquence reposent sur un tirage aléatoire dans une loi Normale. L'oscillation est un tirage aléatoire entre les bornes 0 -  $2\pi$ .

**⑤  $V_{(Tracteur)}$  : Vitesse Tracteur [km/h]**  
La  $V_{(Tracteur)}$  est modélisée une fois par simulation. Ce modèle est une sinusoïde :

$$VL [(V_{(Tracteur)} \text{ réel})] + VC [(Amplitude/2 * \sin(\text{Fréquence} * x + \text{Oscillation}))]$$

**VL de  $V_{(Tracteur)}$  :**  
La VL ( $V_{(Tracteur)}$  réelle) repose sur un tirage aléatoire dans une loi Normale centrée sur la vitesse tracteur définie par l'utilisateur et d'écart-type défini par la variabilité du régime moteur.

**VC de  $V_{(Tracteur)}$  :**  
L'amplitude et la fréquence reposent sur un tirage aléatoire dans une loi Normale. L'oscillation est un tirage aléatoire entre les bornes 0 -  $2\pi$ .

De plus, des accélérations en début de vidange ainsi que des décélérations/accélérations lors des virages en bout de champs sont ajoutées. Elles sont modélisées par des lois normales basées sur la  $V_{(Tracteur)}$ .

III - 2.4. Projection du modèle sur la largeur de travail ( $L_w$  [m])

Les modèles de chacun des paramètres utilisés pour la simulation (présentés au paragraphe I – 4.) sont à nouveau décrits par l'illustration ci-après ainsi que la projection de ces modèles sur la largeur de travail  $L_w$  [m].

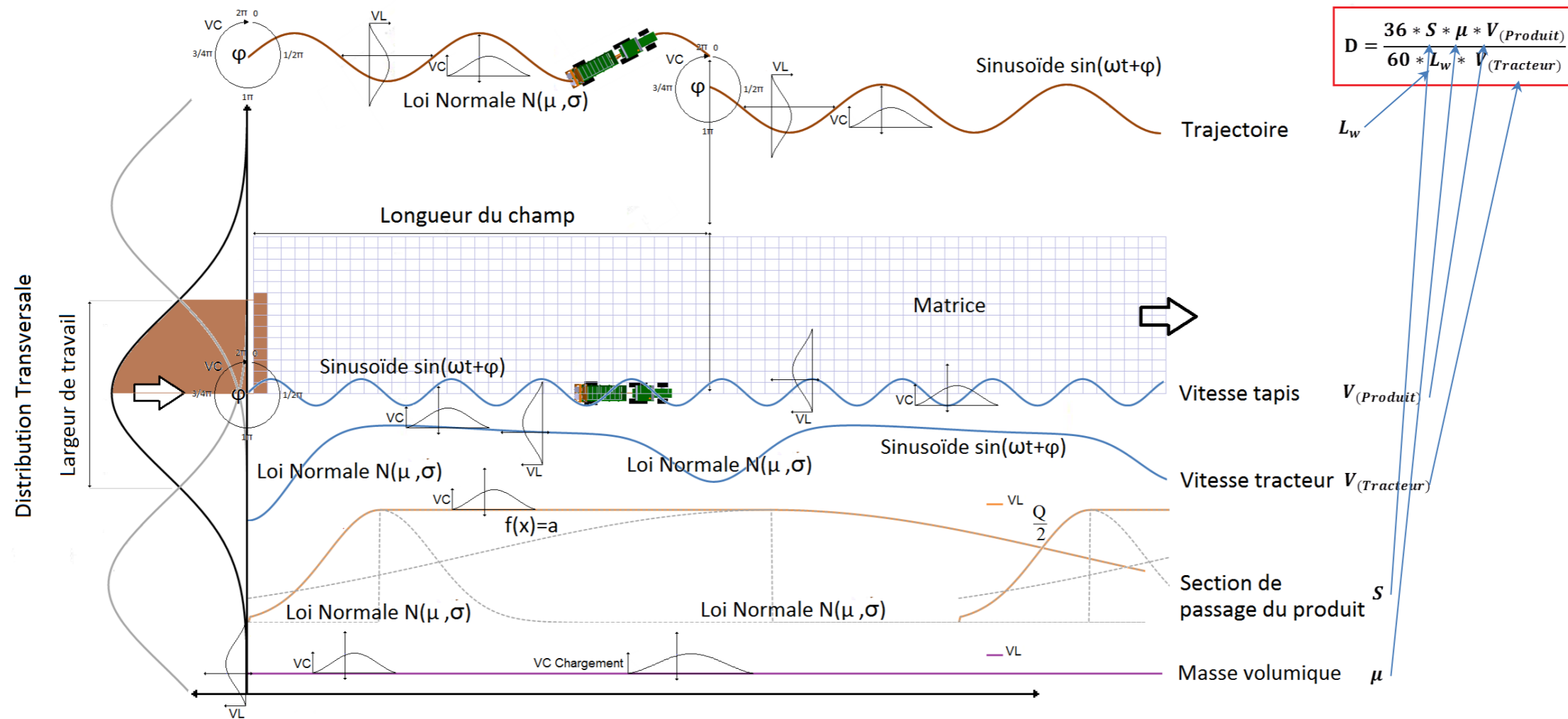
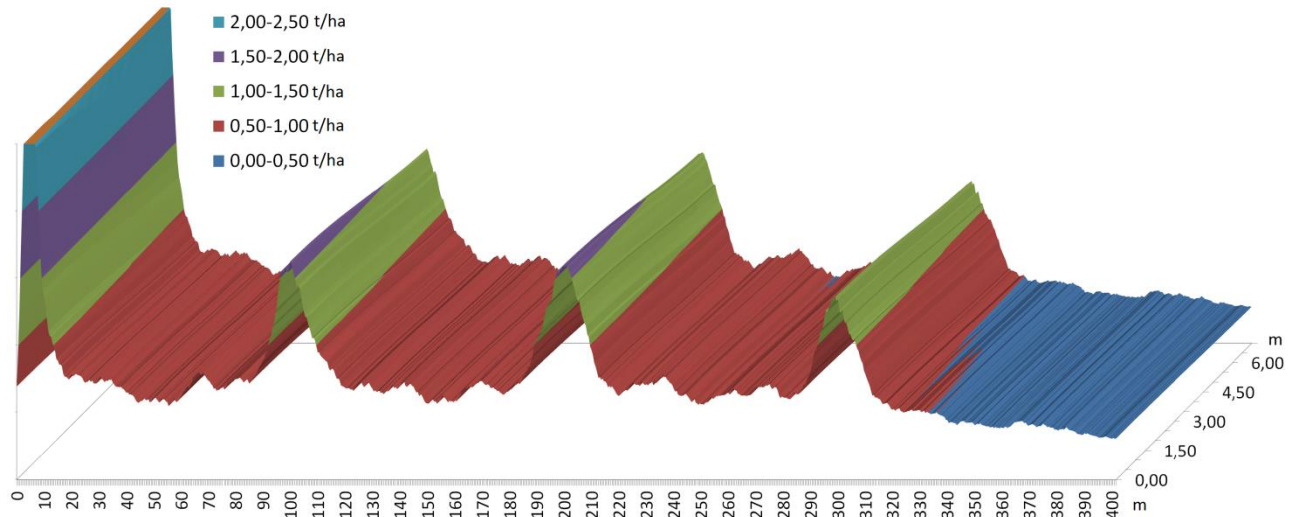


Figure 8 : Projection du modèle dans la matrice

IV - 1. Résultat brut

Un exemple de matrice obtenue, sans utilisation de dispositif de maîtrise de dose, pour une vidange et un champ de 100m de long, est présenté par le graphique suivant :



Graph 2 : Résultat brut

Ce résultat illustre la répartition au champ de la dose au fil de la vidange d'un épandeur. Bien sûr, ce graphique ne constitue pas le résultat dont disposeront au final les utilisateurs du simulateur sur l'interface web, ici nous voulons expliciter ce résultat brut obtenu :

- Tout d'abord, nous observons sur ce graphique la présence de 4 "pics" tous les 100m. En effet, en l'absence du dispositif de maîtrise de dose de type DPA l'opérateur lors de son virage de demi-tour en bout de champs provoque un sur-dosage dû à une décélération.
- Nous observons également en fin de vidange une baisse régulière de la dose. Ce résultat est dû à l'absence de dispositif de maîtrise de dose de la section (Volet accompagnateur, Volet pousseur, Suivi de contour, Arasement...). Sans ce dispositif, l'éboulement en caisse du produit provoque la diminution du débit qui a pour conséquence une diminution régulière du dosage dans la parcelle en fin de vidange.
- Sur les "pics" au centre, nous observons sur la profondeur un dosage plus élevé à 0m qu'à 7m. Cette fois, c'est l'absence d'un dispositif de maîtrise de dose de type transversale : trajectoire et Lw (Jalonnage préalable au pas, Jalonnage préalable au décamètre, Barre de guidage, Guidage automatique...) qui entraîne une variation de la dose apportée dans le champ dans la profondeur.
- Enfin, l'absence de dispositif de maîtrise de dose de la masse volumique (Pesée dynamique, Pesée statique, Pesée au seau, Tables...) aura pour conséquence un sur ou un sous-dosage global de la dose apportée à la parcelle.

Nos efforts ont été ciblés pour construire un moteur de simulation des paramètres intervenant dans l'équation de Dose (paragraphe I – 4.) reposant sur un formalisme mathématique capable de traduire le poids et la dispersion de chacun d'eux. Ce travail de modélisation de fond réalisé au cours de cette étude offre une base solide et ouverte sur laquelle on va pouvoir s'appuyer au final pour représenter le rôle et l'influence de différents systèmes technologiques de maîtrises de doses.



Dans une dernière phase de l'étude (toujours en cours de réalisation), nous sommes en développement d'interfaces graphiques, ces interfaces se voulant beaucoup plus didactiques pour l'utilisateur.

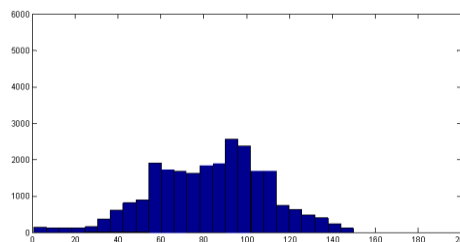
#### IV - 2. Exemple d'illustrations de résultats qui seront présentés dans l'outil web

---

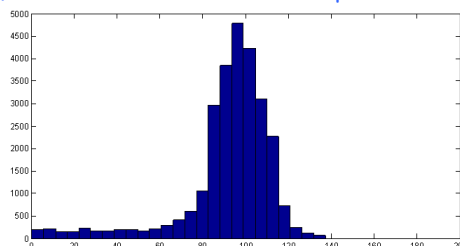
Les graphiques ci-contre présentent la dispersion de la dose que nous pourrions obtenir avec et sans dispositif de maîtrise de dose.

Sur ces graphiques, 100% représente l'objectif de dose. Les classes des histogrammes situées au-dessous des 100% présentent les sous-dosages, avec une perte de rendement qui peut en découler. Les classes d'histogrammes au-dessus des 100% présentent les surdosages, avec les risques environnementaux qui peuvent en résulter.

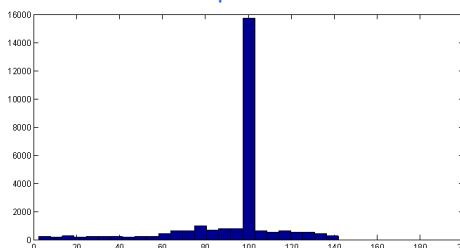
Ce dernier sujet est actuellement en cours de traitement, en particulier pour évaluer l'utilisation de graphiques de "Pareto" montrant l'impact des dispositifs mis en œuvre sur la réalisation de l'objectif de dosage. Le but est bien de faire mieux comprendre le rôle joué par les différents systèmes technologiques de maitrises de doses. Une gamme de prix indicatif des différents systèmes de maîtrise de dose ponctuera la sensibilisation.



Graphe 3 : Distribution sans dispositif



Graphe 4 : Distribution avec un dispositif sur un paramètre



Graphe 5 : Distribution avec un ensemble de dispositifs

## CONCLUSION

---

Le simulateur développé va permettre de renseigner, de sensibiliser et de guider objectivement un acheteur potentiel ou un conseiller technique vers le dispositif de maîtrise de dose le plus adapté à ses attentes. Malheureusement, le développement des modèles a été bien plus chronophage en temps passé de développement que notre estimation d'avant-projet. En effet, nous nous sommes employés à **relier chacun des paramètres de l'équation de la dose (paragraphe 1 – 4) aux phénomènes physiques si reportant dans l'objectif de pouvoir paramétrer les modèles de simulation au plus proche de la réalité.** Cette approche permet également une flexibilité afin d'aller au-delà des seules données réelles connues (sur des machines d'épandage testées particulières associant un ou plusieurs dispositifs de maîtrise de dose cités), en effet de par la connaissance des phénomènes physiques engendrés par un dispositif de maîtrise de dose nous pouvons intégrer des données non expérimentées comme des données bibliographiques.

Aujourd'hui, nous nous employons à développer l'interface web finale. Pour y parvenir nous développons des interfaces graphiques efficaces pour exposer les résultats aux utilisateurs. Nous souhaitons également réaliser des pré-calculs afin de construire une table qui permettra de renseigner l'utilisateur plus rapidement qu'une simulation en ligne et tout aussi efficacement ; **et ce toujours dans le but d'une meilleure valorisation des produits organiques solides par épandage.**

**Cet outil construit a pour but d'inciter les acheteurs potentiels et les conseillers techniques à utiliser un ensemble d'équipements de maîtrise de dose, seul moyen de maîtriser les paramètres constituant la dose et donc la dose elle-même.**

## Bibliographie

Mazoyer J., 2012. Étude du parc des matériels d'épandage de matière organique en France ; Rapport Irstea/MAAF, convention 2010 : agriculture et gestion durable de l'eau ; 38 pages.

Rousselet M., Mazoyer J., 2006. Étude sur l'état des lieux des performances des épandeurs d'engrais organiques ; ADEME ; 60 pages.

Rousselet M. et Mazoyer J., 2012. Évaluation des performances des épandeurs de fumier : premiers résultats selon la norme NF EN 13080 ; Ingénieries N° 46 ; pages.79 à 92.

Chambre d'agriculture de Bretagne et al., 2007. Les bonnes pratiques d'épandage du fumier ; Cloître Imprimeur ; 28 pages