



HAL
open science

Les matériels de fertilisation et traitement des cultures

C. Cedra, M. Rousselet, J. Coillard, A. Miralles

► **To cite this version:**

C. Cedra, M. Rousselet, J. Coillard, A. Miralles. Les matériels de fertilisation et traitement des cultures. Cemagref Editions, pp.343, 1997, Coll. Formagri, 2-85362-458-7. hal-02576943

HAL Id: hal-02576943

<https://hal.inrae.fr/hal-02576943v1>

Submitted on 24 May 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

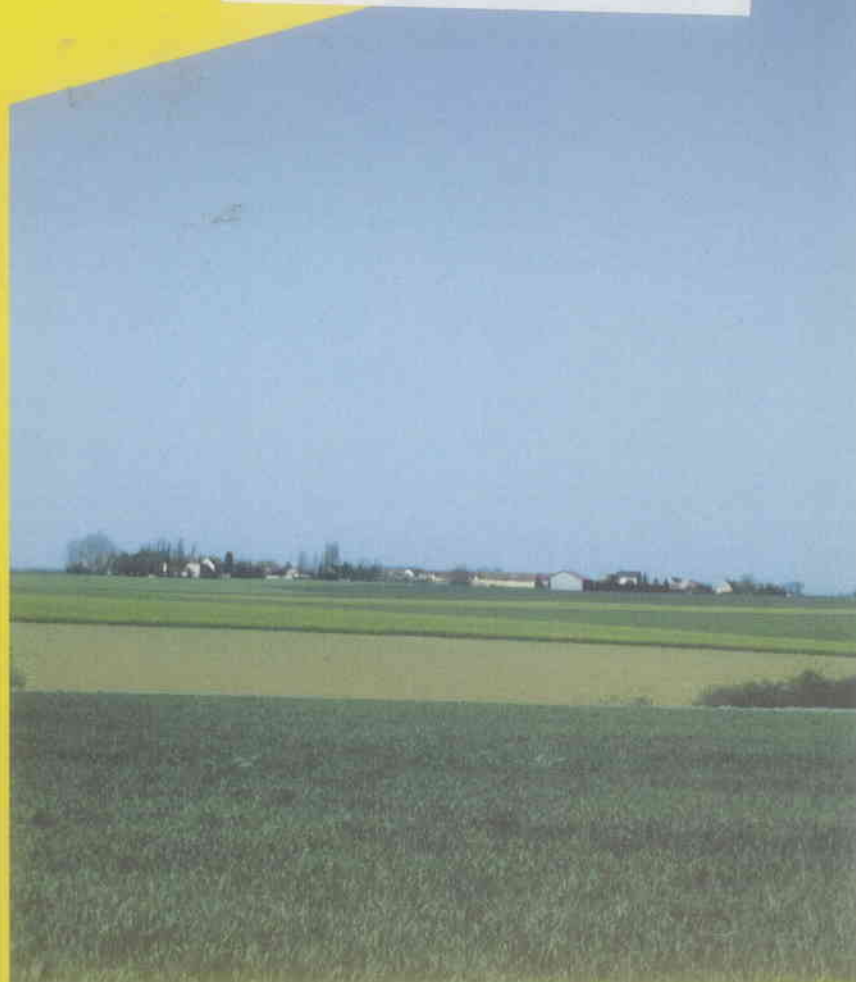
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LES MATERIELS DE FERTILISATION et TRAITEMENT DES CULTURES

Technologies de l'agriculture

Collection
FORMAGRI

PUB00003796



EEA 105

 Cemagref



CEMAGREF
DOCUMENTATION
CLERMONT-FERRAND

Collection *FORMAGRI*

Les Matériels de fertilisation et de traitement des cultures

Volumes 4/5

1^{re} édition

Coordination
Camille CÉDRA

*Direction de la Communication et de la Valorisation
du Cemagref*

Coédition



Cemagref-Dicova
BP 22 - Parc de Tourvoie
92162 Antony Cedex

Fédération Nationale des CUMA

49, avenue de la Grande-Armée
75116 Paris



8, avenue du Président-Wilson
75116 Paris



14, rue de Provigny
94236 Cachan Cedex

Le présent volume de la collection FORMAGRI intitulé **les Matériels de fertilisation et de traitement des cultures** remplace les parties 3 et 4 du tome 2 du livre du maître *Tracteurs et machines agricoles*, publiées par le Cemagref en 1981. Des éléments de la partie « *fertilisants organiques* » ont été extraits d'articles publiés par **Marcel Bertrand** dans le bulletin technique du machinisme et des équipements agricoles (BTMEA) du Cemagref. Des éléments de la partie « traitement des cultures » ont été extraits et actualisés à partir de l'ouvrage *les Traitements par pulvérisation et les pulvérisateurs en agriculture* de **S. Mussilami**, Cemagref, 1982.

© Cemagref-Dicova 1997

ISBN : 2-85362-458-7

© Lavoisier-TEC et DOC 1997

ISBN : 2-7430-0187-9

© ITCF 1997

© FNCUMA 1997

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente publication (ou le présent ouvrage), faite sans l'autorisation de l'éditeur, est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Code de la propriété intellectuelle. Art. L. 122 et L.122-5, et code pénal Art. 425).

Autres titres publiés dans la collection FORMAGRI :

Lexique illustré du machinisme et des équipements agricoles : ISBN 2-85362-218-5 ; 2^e édition, 1991, 17 x 24, relié 350 pages, 1 500 termes, 286 dessins, 70 photos , 195 F ;

Les Tracteurs agricoles : ISBN 2 -85362-259-2 ; 1^{re} édition, 1992, 17 x 24, relié 392 pages, 250 dessins, 66 photos, 165 F ;

Les Matériels de travail du sol, semis et plantation : ISBN 2-85362-348-3 ; 1^{re} édition, 1994, 17 x 24, relié 388 pages, 265 dessins, 73 photos, 165 F ;

Les Matériels de récolte des fourrages, ensilage, distribution : ISBN 2-85362-404-8 ; 1^{re} édition, 1995, 17 x 24, relié 380 pages, 320 dessins et photos, 175 F ;

Les Moissonneuses-batteuses et les équipements pour la récolte des graines : ISBN 2-85362-288-6 ; 1^{re} édition, 1993, 17 x 24, relié 269 pages, 198 dessins, 49 photos, 145 F

Les Matériels de fertilisation et de traitement des cultures

Coordination, rédaction, illustration
Camille CÉDRA

Direction de la Communication
et de la Valorisation du Cemagref

Rédaction, partie fertilisation :

- Marc ROUSSELET, ingénieur de recherche au Cemagref, division technologie du machinisme agricole, Clermont-Ferrand, Montoldre,
- Jean COILLARD, ingénieur de recherche, division qualité des eaux, Cemagref, Lyon.

Rédaction, partie traitement des cultures :

- André MIRALLES, ingénieur de recherche, division génie des équipements agricoles et forestiers, Cemagref, Montpellier.

Mise en page : Malika DAOUD, Cemagref-Dicova

Ont également participé à la préparation de cet ouvrage :

Recherche documentaire : Christian SONDAG

Illustrations : Françoise PEYRIGUER, Cemagref-Dicova

Nous remercions les centres de formation, les services techniques et de communication des constructeurs pour leur importante contribution documentaire et iconographique.

Comité de lecture :

BASSEZ J., conseiller agricole, TRAME-BCMA, Rennes,
BOISGONTIER D., ingénieur, responsable du service agro-équipements, ITCF, Boigneville,
COLLOT M., ingénieur au service de l'information scientifique et technique du Cemagref,
COQUILLE J.-C., professeur, ENESAD de Dijon,
COUERE J.P., professeur, ENITA de Clermont-Ferrand,
DEBROIZE D., ingénieur agro-équipements, ITCF, Boigneville,
DECROUX J., ingénieur agronome, AZF, Europe Sols, Toulouse,
DENOIRJEAN J., ingénieur agro-équipements, ITCF, Boigneville,
FODERE X., ingénieur, département prévention des risques professionnels, caisse centrale de la Mutualité sociale agricole, Paris,
GAUVRIT C, directeur de recherche, département phytopharmacie, INRA, Dijon
HABID ZIAD, ingénieur agro-équipements, FNCUMA, Paris,
LARRAT J.-P., ingénieur, département prévention des risques professionnels, caisse centrale de la Mutualité sociale agricole, Paris,
MALLET J.-C., ingénieur, ministère de l'Agriculture, sous-direction de la Protection des Végétaux, bureau expérimentation et méthodologie, Paris,
MEGNIEN J.-C., technicien de recherche au Cemagref, division technologie du machinisme agricole, groupement de Clermont-Ferrand, Montoldre,
OLLIVIER D., ingénieur agro-équipements, TRAME-BCMA, Paris,
PARRAIN C., professeur au LEGTA de Montargis-le-Chesnoy,
POLVECHE V., ingénieur de recherche, division Génie des équipements agricoles et forestiers, Cemagref Montpellier,
SCHIVRE H., professeur au LEGTA de Montargis-le-Chesnoy,
SONDAG C., agriculteur, enseignant, Sainte-Marguerite, Moselle,
THOMAS Y., ingénieur, Association régionale de mécanisation de Toulouse, pour la FNCUMA, Paris
VAQUIÉ P.-F., ingénieur, responsable du service agro-équipements, FNCUMA, Paris,
VILLEROY M., Ingénieur ANPP et CIETAP, Fontenay-aux-Roses.

SOMMAIRE

LES MATÉRIELS DE FERTILISATION

1. La vie végétale et la fertilisation des cultures	9
2. Les engrais minéraux solides	33
3. Les distributeurs d'engrais minéraux solides	51
4. Les paramètres d'épandage, l'utilisation et les réglages des distributeurs d'engrais minéraux solides	103
5. Les fertilisants organiques et les matériels d'épandage	133 -135
11. Annexe documentaire et adresses utiles	327
12. Index alphabétique général	333

LES MATÉRIELS DE TRAITEMENT

6. Les traitements phytosanitaires	193
7. La pulvérisation	211
8. Les pulvérisateurs pour les traitements des cultures basses	241
9. Les pulvérisateurs pour les traitements viticoles et arboricoles	297
10. L'utilisation, les réglages et l'entretien des pulvérisateurs	313
11. Annexe documentaire et adresses utiles	327
12. Index alphabétique général	333

Quelques définitions

• Sol	10
• Nutrition des plantes	12
• Fertilisation	13
• Matières fertilisantes	15
• Epandage des fertilisants	17

Les fonctions végétales et la fertilisation

• Les principales fonctions végétales	20
• Les principaux constituants des végétaux	20
• Le rôle de la fertilisation	22
• Les principaux éléments nutritifs	23

La maîtrise des apports fertilisants

• La définition de la dose à appliquer par hectare	27
• Le diagnostic de l'alimentation azotée des cultures	28
• La connaissance des produits fertilisants	30
• La maîtrise des épandages	31

Ce premier chapitre « **la vie végétale et la fertilisation des cultures** » et le suivant « **les engrais minéraux solides** » ne constituent qu'un aperçu des connaissances en la matière. Ils ont été rédigés dans l'esprit de fournir des informations générales sur les aspects biologiques et agronomiques de la fertilisation, afin de mieux maîtriser l'utilisation des équipements.

Pour des connaissances plus approfondies, nous invitons nos lecteurs à se reporter aux publications des chercheurs de l'INRA, des Instituts techniques (ITCF, CETIOM, Institut de l'Élevage...) et des organismes professionnels de développement nationaux et régionaux (SNIE, COMIFER, Chambres d'agriculture, Geda, Ceta, Fertimieux...), se reporter à l'annexe documentaire et aux catalogues de ces organismes. Pour une large part, les définitions concernant le sol et la nutrition des plantes, la fertilisation et les matières fertilisantes sont extraites du glossaire de la fertilisation NPK (Comifer 1993).

QUELQUES DÉFINITIONS

• SOL

• Bilan humique :

Selon la structure du sol, le Ph, la profondeur de labour, le coefficient de minéralisation... les pertes d'humus peuvent être plus ou moins importantes et rapides. Afin de préserver la fertilité du sol, ce déficit doit être compensé par l'apport de matières organiques restituées par des cultures (résidus de récoltes, pailles, prairies...), par des élevages (fumiers, lisiers...) ou par d'autres activités (composts, boues résiduaires...). Le bilan humique indique le solde positif ou négatif entre les pertes et les gains de matières organiques, évalués soit de manière prévisionnelle, soit au terme d'un exercice cultural.

• Carence d'un sol en éléments nutritifs :

Constat d'une insuffisance d'un ou de plusieurs éléments nutritifs dans le sol. Ce constat peut être établi, *a priori*, à partir d'une analyse de sol ou, *a posteriori*, par l'apparition de symptômes caractéristiques sur les végétaux cultivés.

• Coefficient de minéralisation K2 :

Le coefficient K2 permet d'évaluer la perte annuelle d'humus due à la minéralisation des éléments. Il se situe en moyenne entre 1 et 2 % environ (en France). Ce processus de minéralisation entraîne une perte annuelle d'humus de 800 à 1 000 kg/ha et libère de 40 à 80 kg/ha d'azote.

• Coefficient isohumique K1 :

Il indique la quantité d'humus stable fournie par kg de matière sèche apportée au sol. Le coefficient K1 est en moyenne de 0,4 à 0,5 pour le fumier partiellement décomposé (20 % de MS), de 0,1 à 0,15 pour les pailles (85 % de MS), 0,15 pour les résidus de plantes annuelles

(85 % de MS) et proche de 0 pour les engrais verts (20 % de MS). Ce coefficient est utilisé pour la réalisation des bilans humiques (bilan de l'humus d'une parcelle).

- **Complexe argilo-humique :**

Ensemble ou complexe constitué par de l'argile et de l'humus. Ces deux éléments colloïdaux sont liés par l'intermédiaire d'ions Ca^{++} , d'ions Fe^{+++} et, le cas échéant, par attraction électrique. L'humus protège l'argile contre sa dispersion et stabilise la structure du sol. Par ses propriétés absorbantes, le complexe argilo-humique retient la solution du sol et limite les risques de lessivage des éléments nutritifs.

- **Humus :**

L'humus est le résultat de la décomposition par des micro-organismes des débris végétaux et animaux (voir aussi matières organiques). Il forme avec l'argile des complexes argilo-humiques, contribue à la capacité d'échange cationique (CEC) et favorise l'activité biologique du sol.

La matière organique du sol est estimée par l'analyse de sa teneur en carbone organique. On distingue la **matière organique libre** et la **matière organique liée** : la matière organique libre est séparable par des moyens physiques ; elle correspond aux débris végétaux (résidus culturaux divers, racines mortes). La matière organique liée n'est pas séparable par des moyens mécaniques, car elle est intimement associée aux minéraux du sol (constituants biologiques ou humifiés).

- **Lessivage :**

Entraînement par l'eau de percolation de particules fines du sol et de substances dissoutes. Ce terme est couramment utilisé en agronomie pour désigner un entraînement par l'eau de percolation d'éléments minéraux hors de la zone potentiellement exploitable par les racines. L'azote est particulièrement concerné par le lessivage.

- **Lixiviation :**

Du latin *lixivia* qui signifie lessive, le terme lixiviation est utilisé en agronomie pour préciser des situations de lessivage conduisant à l'entraînement dans le sol **d'éléments solubles** par l'eau qui percole.

- **Matières organiques :**

Les matières organiques sont l'ensemble des substances carbonées provenant des débris végétaux, des déjections et des cadavres d'animaux. Les matières organiques se transforment en permanence, passant de l'état de « matières organiques fraîches » (restes de récolte, fumier...) à l'état d'humus et d'éléments minéraux assimilables par les plantes. Sous la forme d'humus, les matières organiques représentent de 1 à 5 % du poids de la couche de sol travaillée. Les matières organiques exercent un rôle très important sur la formation et l'évolution des sols. Elles améliorent les propriétés physiques de la terre (stabilité structurale, capacité de rétention en eau, porosité...) et ses propriétés chimiques (libération progressive d'éléments nutritifs, notamment l'azote).

- **Minéralisation :**

Ensemble de processus de transformation biologique dans le sol de différentes molécules organiques en composés minéraux : CO_2 , NH_4^+ , H_2O ...

- **Nitrification :**

Processus d'oxydation biologique de l'azote, réalisé par des micro-organismes, au cours duquel l'azote passe de la forme ammoniacale (NH_4^+) à la forme nitreuse (NO_2^-), puis nitrique (NO_3^-).

- **Percolation :**

Passage par gravité de l'eau et des substances qu'elle entraîne de haut en bas au travers d'un sol.

- **NUTRITION DES PLANTES**

- **Élément nutritif :**

Élément chimique (corps simple) indispensable à la vie végétale : azote (N), phosphore (P_2O_5), potassium (K_2O)...

- **Biodisponibilité :**

État biochimique d'un ou de plusieurs éléments nutritifs présents dans le sol et parvenus à une forme potentiellement assimilable par les végétaux. La biodisponibilité résulte du fonctionnement du complexe argilo-humique du sol et de la transformation biochimique des matières fertilisantes constituantes de la solution du sol, en relation avec le système racinaire de la culture.

- **Solution du sol :**

Ce terme définit globalement l'ensemble des éléments minéraux solubles dissous avec l'eau du sol. La solution du sol représente la forme nutritive finale assimilable par le système racinaire des plantes (prélèvement ionique).

- **Nutrition des plantes :**

Ensemble des processus qui conduisent les plantes à puiser dans le sol les éléments nutritifs nécessaires à l'élaboration de la matière végétale. Dans les sols, les éléments nutritifs sont prélevés sous la forme d'ions (K^+ , Ca^{2+} , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- ...).

- **Minéralisation :**

Ensemble de processus de transformation biologique dans le sol de différentes molécules organiques en composés minéraux : CO_2 , NH_4^+ , H_2O ...

- **Nitrification :**

Processus d'oxydation biologique de l'azote, réalisé par des micro-organismes, au cours duquel l'azote passe de la forme ammoniacale (NH_4^+) à la forme nitreuse (NO_2^-), puis nitrique (NO_3^-).

• FERTILISATION

• Dose :

La dose est la quantité de matières fertilisantes qu'il faut apporter par unité de surface pour compléter la fourniture du sol. Cette quantité de matière fertilisante à appliquer résulte d'un raisonnement agronomique de la fertilisation prenant en compte les besoins de la culture, les disponibilités du sol laissées par les précédents culturaux et les conditions pédo-climatiques.

• Fumure :

Quantité d'éléments fertilisants épandue sous forme minérale et/ou organique. Cette quantité est traditionnellement exprimée en unités fertilisantes. La fumure est établie en fonction des besoins de la culture et de la fourniture disponible dans le sol. La fumure azotée peut être calculée au moyen du bilan azote.

• Fumure de fond :

Apport de matières fertilisantes sur un sol destiné à recevoir une culture. Il s'agit soit d'une fumure incorporée au sol avant la mise en place d'une culture pérenne, soit d'une fumure P.K appliquée avant ou sur labour, ou sur prairie en période de repos de la végétation (hiver).

• Titre :

Terme utilisé pour préciser la teneur ou la proportion d'une solution ou d'un mélange (exemple : ammonitrate titrant 33,5 % de N).

• Unité fertilisante :

Unité exprimant en kg la teneur en éléments, N, P₂O₅ ou K₂O pour 100 kg de fertilisant. Exemple : l'ammonitrate dose (d) 33,5 kg d'azote pour 100 kg de produit, si les besoins (U) sont de 120 kg/ha d'azote (120 unités), la dose d'engrais (Q) à épandre par hectare est :

$$Q = \frac{U}{d} \times 100 \quad \text{soit} \quad \frac{120}{33,5} \times 100 = 358 \text{ kg/ha}$$

• Fumure de couverture :

Il s'agit généralement d'un ou de plusieurs apports d'engrais N, NP ou NPK appliqués sur une culture pour couvrir ses besoins de croissance. Pour une culture donnée, la fumure de couverture est appliquée à des stades précis (tallage, épis 1 cm, ...) et suivant des doses bien déterminées selon l'objectif de rendement et le bilan azote de la parcelle.

• Fertilisation :

Action consistant à entretenir ou à améliorer la fertilité d'un sol en lui apportant des matières fertilisantes (engrais) et des amendements organiques et minéraux.

- **Nitrification :**

Processus d'oxydation biologique de l'azote, réalisé par des micro-organismes, au cours duquel l'azote passe de la forme ammoniacale (NH_4^+) à la forme nitreuse (NO_2^-), puis nitrique (NO_3^-).

- **Nitrates :**

Les nitrates constituent la forme essentielle de l'alimentation azotée des plantes. Les nitrates résultent de la minéralisation d'éléments organiques (humus, déjections animales...) ou de l'apport d'engrais minéraux azotés (sulfate d'ammoniaque, ammonitrates, urée, ammoniac anhydre...). Les nitrates, très solubles dans l'eau, peuvent être facilement entraînés en profondeur par les flux successifs d'eau (pluies, orages, irrigation excessive...).

- **Bilan-diagnostic :**

Bilan réalisé sur un ou plusieurs éléments nutritifs et sur une période donnée.

Il prend globalement en compte les « entrées » et les « sorties » d'éléments :

– les entrées d'éléments dépendent des matières fertilisantes apportées, des fixations biologiques dans le sol, des aliments consommés, des retombées atmosphériques, des litières et de toutes autres origines ;

– les sorties d'éléments s'opèrent sous forme de produits animaux et/ou végétaux exportés, d'aliments revendus, de volatilisation, de dénitrification, de lessivage et d'entraînement par érosion.

Le bilan peut être établi à l'échelle d'exploitations, de zones, de bassins versants ou de régions. Selon les cas, les postes retenus et les méthodes de calcul sont adaptés.

- **Bilan cultural F-E (ou bilan Fumure-Exportation) :**

Ce bilan représente pour un élément et une période (un ou plusieurs cycles culturaux) donnés la différence entre les **Fumures** et les **Exportations** exprimée en kg/ha. Ce calcul est applicable à la parcelle, à un groupe de parcelles homogènes ou à l'exploitation.

- **Bilan azote d'une culture :**

Bilan prenant en compte les différentes disponibilités d'azote minéral du sol, afin de déterminer la quantité (**x**) d'engrais nécessaire à l'élaboration de l'objectif de rendement (**y**) d'une culture donnée entre deux dates. Le bilan s'exprime globalement par la relation suivante :

besoin azote de la culture (B) = fourniture du sol (FS) + apport d'engrais (x) par l'agriculteur

Le **besoin azote (B)** de la culture est connu par la relation **B = b . y**

– « **b** » : **besoin spécifique** de la récolte en kg d'azote par tonne/ha de récolte (à la fermeture du bilan). Ce besoin spécifique est indiqué par les différentes instances de conseil (exemples : 3 kg/quintal pour le blé, 2 kg/quintal pour le maïs grain, 15 kg/tonne de MS pour le maïs fourrage...),

– « y » : **rendement** de la récolte produit ou escompté en tonnes/ha de grain sec ou de MS pour les fourrages.

Le bilan azote peut être établi de manière prévisionnelle ou réelle. Dans la pratique du **bilan prévisionnel**, le facteur « y » correspond à l'objectif de rendement et « b » à la quantité d'azote présente par unité de rendement, quand la fumure azotée est optimale. Pour le **bilan réel**, le facteur « b.y » correspond à la quantité d'azote mesurée, effectivement prélevée par la culture.

• MATIÈRES FERTILISANTES

• Amendement :

Substance incorporée au sol pour améliorer sa constitution physico-chimique. On distingue les **amendements organiques**, les **amendements calcaires** et les **amendements magnésiens** : les amendements organiques sont destinés à entretenir le stock d'humus et la structure du sol, les amendements calcaires apportent du calcium pour corriger le Ph du sol et améliorer le fonctionnement du **complexe argilo-humique** : **chaux vive** agricole, **chaux éteinte**, **craie**, **marne**, **calcaires marins** (maërl), les amendements magnésiens sont souvent apportés en combinaison avec des amendements calciques (chaux magnésienne vive, chaux magnésienne éteinte...).

• Coefficient engrais :

Le coefficient engrais est un coefficient qui permet de corréliser la valeur fertilisante d'un élément fertilisant (N, P₂O₅ ou K₂O) d'une matière organique avec son équivalent engrais minéral. Après analyse, ce coefficient est appliqué pour le calcul de la dose d'épandage des matières fertilisantes organiques (fumiers, lisiers, fientes...).

• Compost :

Mélange fermenté de constituants organiques d'origine animale et/ou végétale, utilisé comme matière fertilisante. La caractérisation des composts est décrite par la norme NFU 44.051.

• Culture intermédiaire :

Culture ayant pour objectif d'occuper le sol entre deux cultures principales pour capter l'azote disponible dans le sol et prévenir les risques de « fuites » de nitrates.

• Effluent :

Sous-produit d'une activité industrielle, agricole ou domestique, pouvant contenir des éléments nutritifs, susceptible d'être épandu en l'état sur les sols, sous réserve d'innocuité à l'égard de l'homme, des animaux et de l'environnement. Selon leur nature, les effluents peuvent être utilisés sous trois formes distinctes :

- matière fertilisante homologuée ou répondant à des normes,
- rejets, dépôts ou résidus dont l'épandage est autorisé au cas par cas (autorisations préfectorales),
- produits organiques obtenus à partir de tous les produits de l'exploitation agricole n'ayant pas subi de traitements chimiques.

- **Matières fertilisantes :**

Les matières fertilisantes comprennent les engrais, les amendements et, d'une manière générale, tout produit dont l'emploi est destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux, ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

- **Élément fertilisant :**

Élément nutritif provenant des matières fertilisantes.

- **Élément nutritif :**

Élément chimique (corps simple) indispensable à la vie végétale : azote (N), phosphore (P_2O_5), potassium (K_2O)...

- **Engrais minéral :**

Généralement fournis par les industries chimiques ou des gisements miniers, les engrais minéraux apportent aux plantes un (des) élément(s) directement utile(s) à leur nutrition : (azote, phosphore, potassium) et doivent être conformes à la réglementation en vigueur.

- **Engrais organique :**

Les engrais organiques, ou fertilisants organiques, pouvant être épandus sur les sols sont issus des substances carbonées provenant des débris végétaux, des déjections et des effluents des systèmes d'épuration ou des industries. L'épandage des déjections et des effluents nécessite l'observation de règles importantes pour le respect de l'environnement. Dans le sol, les matières organiques se transforment en permanence, passant de l'état de « matières organiques fraîches » (restes de récolte, fumier...) à l'état d'humus et d'éléments minéraux assimilables par les plantes.

- **Engrais :**

Matières fertilisantes dont la fonction principale est d'apporter aux plantes un (des) élément(s) directement utile(s) à leur nutrition : la teneur en élément(s) nutritif(s) est au moins égale à 3 % en masse pour l'un des trois éléments nutritifs majeurs (azote, phosphore, potassium) et doit être conforme à la réglementation en vigueur.

La législation française distingue différents types d'engrais suivant leur forme chimique ou physique et leur nature minérale ou organique (normes NFU 42 001, 002, 003 et 004).

- **Engrais vert :**

Culture destinée à être enfouie dans le sol. Cette culture peut occuper le terrain pendant une campagne culturale ou plus et peut également être associée à la culture principale.

La pratique de « l'engrais vert » a pour objectif :

- l'amélioration du niveau de fertilité du sol,
- l'amélioration de la structure du sol (action des racines...),
- la stimulation de l'activité microbienne dans le sol.

Ce terme est parfois employé improprement pour désigner les cultures intermédiaires destinées à limiter les fuites de nitrates ou à protéger le sol contre l'érosion.

• ÉPANDAGE DES FERTILISANTS

• Distance ou intervalle de passage :

La distance de passage est en pratique la distance qui sépare deux passages aller-retour de l'appareil d'épandage. La distance de passage doit être égale à la largeur optimale de travail de l'épandeur pour avoir un bon recouvrement et un épandage régulier. Tout écart de la distance de passage par rapport à la largeur optimale de travail fait varier (en plus ou en moins) la dose appliquée sur les zones de recouvrement. Cette distance de passage est repérée au préalable par un jalonnement réalisé avec le plus de précision possible par l'agriculteur.

• Dose :

La dose d'épandage est la quantité de matières fertilisantes qu'il faut apporter par unité de surface pour compléter la fourniture du sol. Cette quantité de matières fertilisantes à appliquer résulte d'un raisonnement agronomique de la fertilisation prenant en compte les besoins de la culture, les disponibilités du sol laissées par les précédents culturaux et les conditions pédo-climatiques.

• Épandeur ou distributeur :

Ces deux termes s'appliquent aux appareils d'épandage des matières fertilisantes : épandeur d'engrais, épandeur de fumier ... Le mot distributeur est réservé aux engrais minéraux solides pour lesquels les doses à épandre peuvent être inférieures à 200 kg/ha ; on dit parfois aussi fertiliseur.

• Épandage en va-et-vient :

Principe d'épandage réalisé par allers et retours successifs. Selon la direction du travail, ou bien le côté gauche de la nappe d'épandage retour recouvre le côté gauche du passage aller, ou bien le côté droit de la nappe d'épandage retour recouvre le côté droit du passage aller.

• Épandage en tournant :

Il s'agit d'un mode d'épandage réalisé en tournant autour de la parcelle. Dans ce cas, si le sens de rotation est à droite, le côté droit de la nappe d'épandage recouvre le côté gauche du passage précédent, et inversement si l'on épand en tournant à gauche.

• Largeur totale d'épandage :

La largeur totale d'épandage est égale à la distance atteinte par les grains d'engrais projetés de part et d'autre par l'appareil d'épandage. C'est la distance qui sépare les points extrêmes de la nappe d'épandage dans le sens perpendiculaire à l'axe d'avancement.

• Largeur de travail :

La largeur de travail est égale à la distance entre les lignes de recouvrement. Elle est égale à la distance ou à l'intervalle de passage lorsque le jalonnement est correct.

- **Largeur optimale de travail :**

La largeur optimale de travail correspond à la largeur sur laquelle la quantité d'engrais répartie uniformément correspond à la dose/ha. Pour un produit donné, la connaissance et le respect de la largeur optimale de travail sont les composantes essentielles d'un bon épandage.

- **Recouvrement :**

Selon le type d'appareil utilisé, la quantité d'engrais distribuée lors d'un passage aller diminue régulièrement du centre de l'appareil vers les extrémités ou décroît seulement sur les extrémités. Pour distribuer la même quantité d'engrais en tout point de la parcelle, il est nécessaire de prévoir au retour un recouvrement partiel du passage précédent. La qualité du recouvrement est appréciée par l'analyse de la **courbe de recouvrement** et le **coefficient de variation** (de la courbe de recouvrement).

- **Régularité d'épandage :**

La régularité d'un épandage d'engrais se traduit par un apport constant de la dose déterminée en tout point de la parcelle supposée homogène en fertilité. Dans le sens longitudinal (selon l'axe d'avancement du tracteur), la variation de la quantité apportée est faible : elle ne dépend que de la variation de la vitesse d'avancement du tracteur. Pour les appareils dont le débit est proportionnel à l'avancement (DPA), la variation longitudinale est pratiquement nulle. Dans le sens transversal, par contre, la variabilité de la quantité apportée est beaucoup plus importante. Elle dépend du mode d'épandage utilisé et du **recouvrement** des passages aller-retour.

- **Diagramme de répartition transversale :**

Représentation graphique de la répartition de l'engrais sur la largeur de la nappe d'épandage d'un épandeur. Les valeurs de construction du diagramme sont obtenues lors d'essais par pesage des quantités d'engrais recueillies dans des bacs de réception cloisonnés après un passage. L'analyse du diagramme d'épandage permet d'apprécier la régularité transversale et la symétrie de la nappe d'épandage.

- **Répartition transversale :**

La répartition transversale ou distribution transversale caractérise les variations de quantité d'engrais observées sur toute la largeur de la nappe d'épandage. L'appréciation de la forme et de la qualité de cette répartition est réalisée en plaçant des bacs de réception au sol, sur une ligne perpendiculaire à l'axe d'avancement. La pesée du contenu de chaque bac permet le traçage du diagramme de distribution transversale.

- **Diagramme d'épandage :**

Représentation graphique de la répartition de l'engrais sur la largeur épandue, compte tenu du recouvrement des passages. Les valeurs de construction du diagramme sont obtenues lors d'essais par pesage des quantités d'engrais recueillies dans des bacs de réception cloisonnés après un aller-retour à la largeur de passage. L'analyse du diagramme d'épandage permet d'apprécier le recouvrement, la régularité transversale, la symétrie et donc l'homogénéité de l'apport d'engrais au sol.

• **Coefficient de variation (CV) :**

Le coefficient de variation (de la courbe de recouvrement) permet d'apprécier l'incidence d'un recouvrement imparfait : plus le recouvrement est excessif (surdosage entre les passages), plus le coefficient (CV) est élevé. Il s'exprime en pourcentage par l'équation : $CV = (\sigma / \bar{x}) \times 100$.

σ est l'écart-type donné par l'équation :
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

dans laquelle n est le nombre de bacs sur la largeur de travail, x_i est la quantité recueillie dans chaque bac après recouvrement et \bar{x} la moyenne absolue des quantités recueillies :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

LES FONCTIONS VÉGÉTALES ET LA FERTILISATION DES CULTURES

• LES PRINCIPALES FONCTIONS VÉGÉTALES

Les fonctions essentielles qui permettent le développement des plantes sont (fig.1) l'**assimilation chlorophyllienne** (photosynthèse), la **respiration**, l'**absorption racinaire** et la **transpiration**.

• L'assimilation chlorophyllienne :

L'**assimilation chlorophyllienne** permet aux plantes d'utiliser le **carbone** et l'**hydrogène** dont elles ont besoin, à partir du **gaz carbonique** (CO_2) contenu dans l'atmosphère et l'eau. Le carbone et l'hydrogène captés par la photosynthèse entrent notamment dans la synthèse des glucides ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$).

• La respiration :

Elle correspond à une absorption d'oxygène atmosphérique par le feuillage et à une libération de gaz carbonique (CO_2). La respiration fournit aux plantes l'énergie nécessaire aux réactions chimiques et à la synthèse de certaines molécules organiques (acides aminés, nucléotides, ...).

• L'absorption racinaire :

Il s'agit du système d'alimentation des plantes dans le sol qui agit en prélevant les **éléments minéraux** (N, P, K, Ca, S, Mg, oligo-aliments, ...) contenus dans la **solution du sol** sous forme d'**ions**. Les racines sont la principale voie d'**alimentation des plantes en eau** ; cette eau, outre son rôle de liquide «porteur» des aliments, fournit oxygène et hydrogène et joue un rôle physiologique fondamental.

• La transpiration :

La **transpiration** est une fonction qui assure la **régulation thermique**. Les **stomates** et, dans certains cas, la **cuticule** laissent s'évaporer plus ou moins de vapeur d'eau des tissus végétaux sous l'effet du rayonnement solaire et de la sécheresse de l'air. Outre sa fonction de régulation thermique, cette évaporation favorise la **circulation interne de l'eau** dans la plante, et donc son **alimentation minérale**.

• LES PRINCIPAUX CONSTITUANTS DES VÉGÉTAUX

Les plantes sont constituées d'environ de 80 à 90 % d'eau, le reste (de 10 % à 20 % environ) constitue la **matière sèche**. L'analyse de la matière sèche révèle la présence de **carbone**, d'**oxygène**, d'**hydrogène**, d'**azote**, de **phosphore**, de **soufre**, de **potassium**, de **calcium**, de **magnésium** et de nombreux **oligo-éléments** indispensables (moins de 1 %). Ces éléments sont prélevés par les plantes :

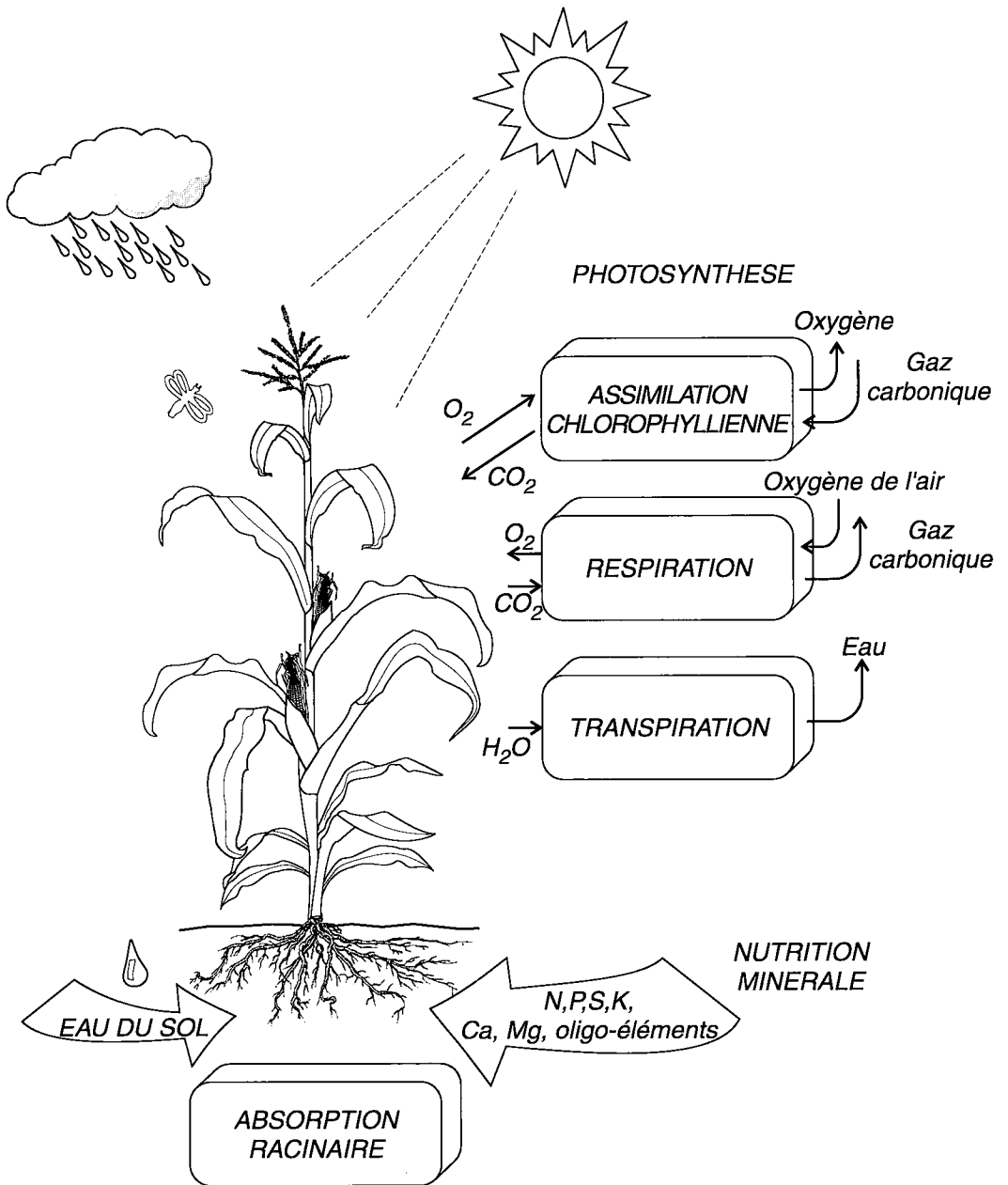


Fig. 1 - Les fonctions élémentaires de la vie végétale

- **dans l'air** (le carbone, l'oxygène et une partie du soufre SO₃) ;
- **dans l'eau du sol** (tous les éléments minéraux) ;
- **dans le sol** (N, P, S, K, Ca, Mg et les oligo-éléments).

Le monde végétal « naturel » se développe de manière autarcique avec l'air et l'eau dont il dispose et avec les aliments disponibles dans le sol, notamment apportés par la décomposition de la matière organique fournie par le couvert végétal et la faune environnante. Cette situation résulte d'un équilibre naturel complexe et conduit, dans le temps, à une évolution lente de l'écosystème (modifications climatiques locales, domination de certaines espèces...).

Le monde végétal « cultivé » est, au contraire, conduit de manière à produire des végétaux d'espèces bien déterminées avec des objectifs de qualité et d'intensification plus ou moins poussés. Ce système « cultivé », pratiqué par l'agriculture moderne, nécessite d'apporter aux plantes les aliments qu'elles ne peuvent trouver dans le sol en quantité suffisante, compte tenu des prélèvements importants des cultures (exportations), du rythme de croissance et de la qualité recherchée pour la culture en place. Les besoins en eau peuvent être complètement satisfaits par **l'irrigation**, les besoins en éléments nutritifs, par la **fertilisation**. Des précautions permanentes doivent être prises pour prévenir ou réparer les dommages à l'environnement : érosions, pollutions, atteintes à la flore et à la faune...

• LE RÔLE DE LA FERTILISATION

Un sol agricole est un ensemble complexe dont la structure physique, la composition chimique, la teneur en eau, la microfaune et la microflore permettent de répondre aux besoins spécifiques de développement des plantes qui y sont cultivées.

Les caractéristiques physiques d'un sol, c'est-à-dire sa granulométrie, sa cohésion et sa perméabilité à l'air et à l'eau, peuvent être améliorées par les façons culturales mais aussi, le cas échéant, par l'apport d'éléments extérieurs correctifs appelés **amendements**.

Pour les productions végétales, le **potentiel nutritif** d'un sol vis-à-vis d'une culture, découle de la composition chimique de ce sol et de la **biodisponibilité** des réserves nutritives. Ces réserves proviennent du fonctionnement du sol et des **apports d'engrais** minéraux ou organiques, simples ou composés, appliqués en fumure de fond ou en fumure de couverture. Le rôle essentiel de la fertilisation est donc de maintenir la **fertilité du sol** et de satisfaire la demande des plantes en éléments nutritifs en fonction des objectifs de qualité et de rendement souhaités.

Les quantités d'amendements et surtout d'engrais épandus périodiquement sur les sols cultivés représentent une part importante des intrants de l'agriculture moderne (en 1990 : 17 % en grande culture, 13 % en élevage et 5 % en viticulture, sources FNSEA et sonde RICA).

Dans ce domaine, raison et technicité sont deux clefs indispensables pour **maîtriser les coûts de production et préserver l'environnement**, sachant que :

- **le sol est un support de culture « vivant » dont tous les constituants sont « mobiles » ;**

- les **éléments nutritifs retenus par le sol** nécessitent un certain temps d'assimilation par les plantes et leur disponibilité est limitée dans le temps et l'espace ;
- si, pour des raisons climatiques et agronomiques, les cultures ne parviennent pas à « consommer » tous les éléments nutritifs disponibles, ces derniers (nitrates, chlorures, sulfates...) sont soit entraînés peu à peu vers les couches profondes du sol et vers les réserves d'eau des nappes phréatiques, soit entraînés directement vers les cours d'eau et les milieux aquatiques par les réseaux de drainage ou par ruissellement.

Les conséquences sont triplement négatives : gaspillage d'engrais, perte de production et atteintes à l'environnement (pollution des eaux, eutrophisation des milieux aquatiques...). La fertilisation doit donc être considérée comme le maillon important d'une stratégie globale prenant en compte :

- les **potentialités des sols** de l'exploitation,
- La **biodisponibilité des éléments du sol**,
- le **cycle d'assolement**,
- les **itinéraires culturaux** et les **objectifs** de rendement et de qualité,
- les **alternatives possibles** en cas d'aléas climatiques ou agronomiques,
- le type de **jachère** choisi (fixe, tournante, nue ou cultivée...).

• LES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS NUTRITIFS

• L'azote (fig. 2) :

L'azote se trouve dans l'air (80 % environ) et sous des **formes minérales** (ammoniaque ou nitrate) ou des **formes organiques** (dans l'humus, les déjections animales...). L'azote est un constituant des protéines végétales et de la chlorophylle. En contribuant à la production de la chlorophylle, l'azote est le stimulant principal de la **croissance des végétaux** (fig. 2).

Par ailleurs, c'est en consommant les matières végétales que les animaux herbivores trouvent l'essentiel de l'azote dont ils ont besoin pour leur croissance, l'entretien de leur organisme et le métabolisme de l'eau.

Mises à part les légumineuses, les plantes s'alimentent à partir de **l'azote minéral du sol**, essentiellement sous forme de **nitrates**. Ces nitrates résultent de la minéralisation d'éléments organiques (humus, déjections animales...) ou de l'apport **d'engrais minéraux azotés** (sulfate d'ammoniaque, ammonitrates, urée, ammoniac anhydre...). Les nitrates, très solubles dans l'eau, peuvent être facilement entraînés en profondeur par les flux successifs d'eau (pluies, orages, irrigation excessive...). En période sèche, si leur localisation n'est pas trop profonde, une partie peut remonter vers les racines, avec l'eau, par capillarité.

Rappelons que, contrairement aux autres plantes, les **légumineuses** sont capables d'absorber l'azote de l'air (N_2) grâce à un système racinaire muni de **nodosités** où se fixent des bactéries ou **rhizobium**. Le rhizobium fournit la nitrogénase qui effectue la fixation d'azote N_2 dans les nodosités. Le rhizobium fournit à la plante plus de 90 % de l'azote qu'elle fixe.

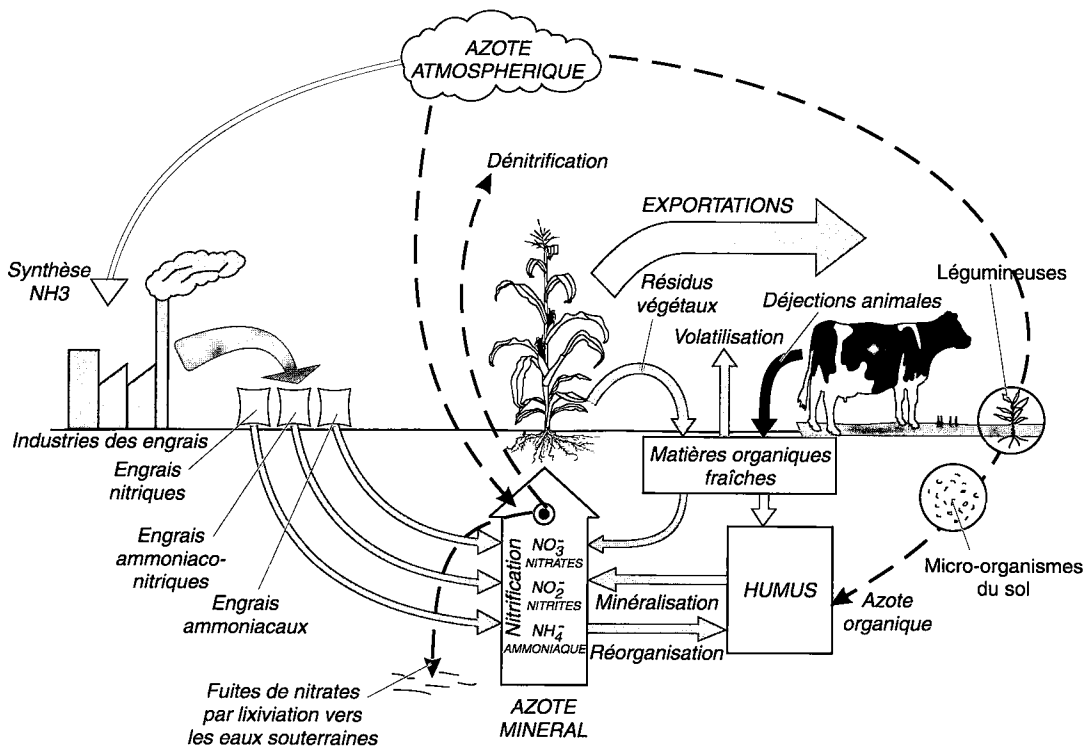


Fig. 2 - Représentation simplifiée du cycle de l'azote

Après la mort des plantes, l'azote organique stocké dans les nodosités du système racinaire des légumineuses est restitué au sol en se transformant peu à peu en azote minéral.

• Le phosphore (P) :

Le phosphore (PO₄H²⁻) est un élément constituant de la matière vivante. Il intervient notamment dans le fonctionnement physiologique des plantes (respiration, photosynthèse...), dans les processus de croissance et de précocité et dans la résistance aux maladies.

Les plantes contiennent de 0,4 à 1 % de phosphore. Le phosphore présent dans la **solution du sol** est issu de la désorption du pool phosphate-sol, de la minéralisation de la matière organique et de l'apport d'**engrais minéraux phosphatés**. Ces engrais sont essentiellement fabriqués à partir de **phosphates naturels** miniers ou, dans une plus faible mesure, à partir des **scories de déphosphoration** de l'industrie sidérurgique.

C'est dans leur alimentation, notamment fourragère, que les animaux puisent le phosphore indispensable à leur organisme (squelette, processus de la digestion et du métabolisme, fertilité et production du lait par exemple).

• Le potassium (K) :

La matière sèche des végétaux contient de 0,5 à 7 % de potassium. Celui-ci se trouve surtout sous forme minérale dissoute dans la **solution du sol** et, sous forme échangeable, dans le **complexe argilo-humique**. Le potassium favorise la synthèse et le stockage des glucides, réduit la transpiration et participe à la formation des protéines. Une part importante des réserves de potassium du sol, « exportée » avec les végétaux récoltés, doit être restaurée par apport d'engrais potassiques. Le potassium contenu dans les aliments fourragers contribue au développement et au fonctionnement musculaire des animaux et intervient dans de nombreux systèmes enzymatiques, mais il est rejeté en partie par les urines.

• Le calcium (Ca) :

Le calcium est un aliment des plantes, qui en contiennent de 0,01 à 4,5 % (en % de CaO dans la MS), principalement assimilable sous la forme de carbonate de calcium (Ca_2^+). Le calcium joue un rôle physiologique très important (constituant des parois cellulaires, neutralisant antitoxique, stimulant du système racinaire...). Si les réserves du sol sont en général suffisantes pour satisfaire les besoins des plantes, il peut être indispensable (après analyse) d'apporter du calcium sous la forme d'**amendements calcaires** : **chaux vive** agricole, **chaux éteinte**, **craie**, **marne**, **calcaires marins** (maërl), ... pour corriger le Ph du sol et améliorer le fonctionnement du **complexe argilo-humique**.

• Le soufre (S) :

Le soufre intervient dans la synthèse des protéines et dans la composition d'enzymes et de vitamines. Son assimilation par les plantes s'effectue sous la forme de sulfates SO_4 par le système racinaire et, dans une moindre mesure, sous la forme d'anhydride sulfureux atmosphérique (SO_2) par leurs stomates.

Les apports complémentaires peuvent être réalisés en épandant soit certains engrais complexes contenant du soufre, soit du sulfate de chaux, ou en pulvérisant certaines spécialités soufrées.

• Le magnésium (Mg) :

Le magnésium est un constituant de la chlorophylle des plantes ; il participe au transfert du phosphore vers les graines et à l'élaboration des sucres, protéines et vitamines. Les **carences** de magnésium se manifestent, selon les végétaux, par des chloroses plus ou moins prononcées et le dessèchement des feuilles les plus âgées.

Le magnésium est apporté soit en combinaison avec des **amendements calciques** (chaux magnésienne vive, chaux magnésienne éteinte), soit en combinaison avec des engrais minéraux, soit par pulvérisations de solutions (sulfate, oxyde ou nitrate de magnésie).

• Les oligo-éléments :

Il s'agit d'éléments entrant en très faible quantité dans la constitution des végétaux. Malgré ces très faibles quantités, ils jouent un rôle important dans la vie végétale et leur disponibilité insuffisante conduit à des carences plus ou moins graves. Parmi les nombreux oligo-éléments, citons le **fer**, le **manganèse**, le **cuivre**, le **zinc**, le **bore**, le **molybdène**...

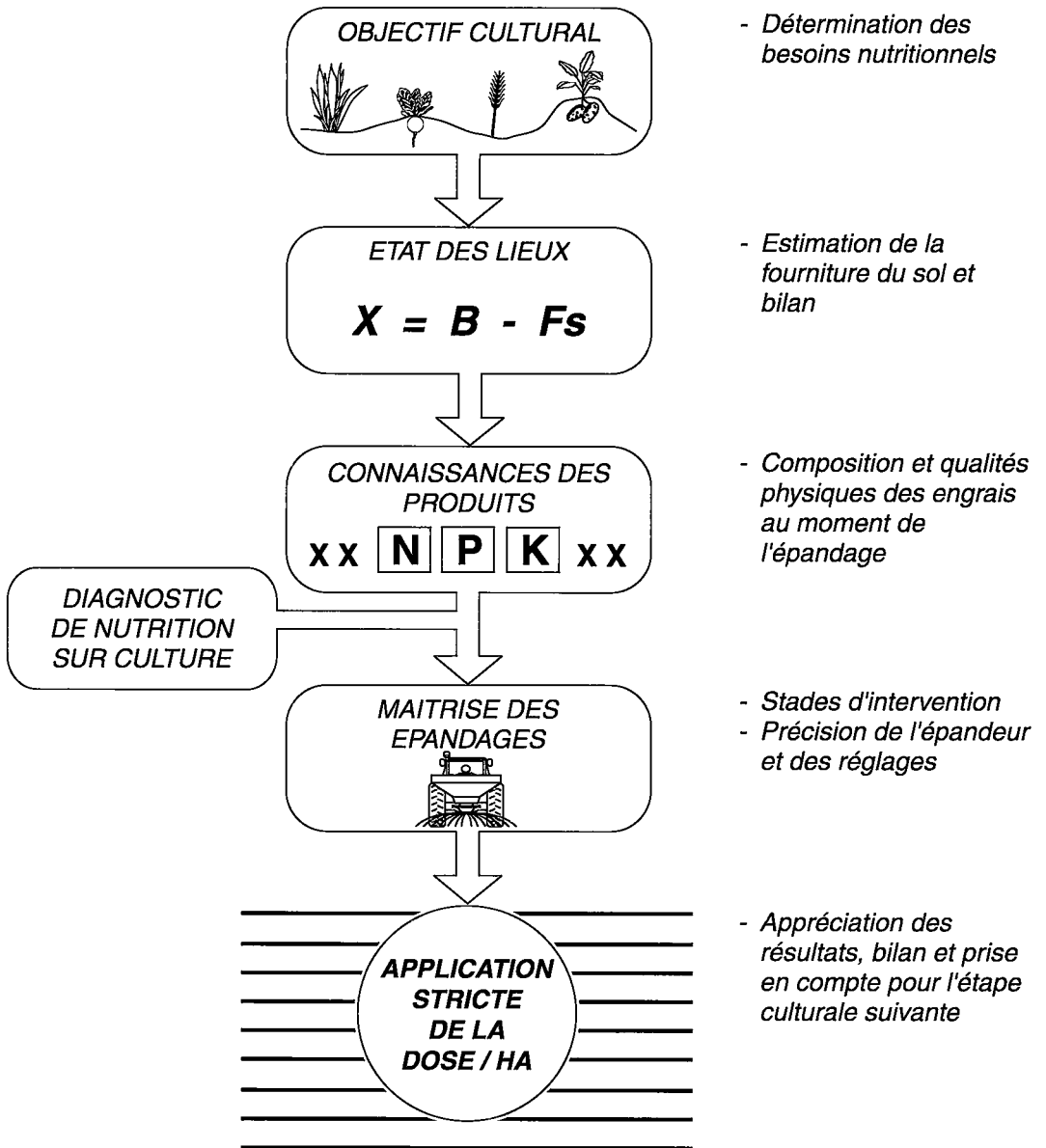


Fig. 3 - Les principales étapes du raisonnement de la fertilisation

LA MAÎTRISE DES APPORTS FERTILISANTS

• LA DÉFINITION DE LA DOSE À APPLIQUER PAR HECTARE

La dose d'épandage est la quantité de matières fertilisantes qu'il faut apporter par unité de surface pour compléter la fourniture du sol.

Cette quantité de matière fertilisante à appliquer doit résulter d'un raisonnement agronomique de la fertilisation (fig. 3) fondé sur :

- un **état des lieux** communément appelé **bilan**,
- un **objectif cultural** défini,
- une bonne **connaissance des produits** utilisés (minéraux et/ou organiques),
- une parfaite **maîtrise de l'épandage**.

Pour un objectif cultural donné et s'il appréhende correctement les effets des précédents culturaux, l'agriculteur peut se limiter à un **bilan cultural** et à un **bilan azoté** de la culture. Pour certaines cultures, pour lesquelles il existe des références fiables, il est très intéressant de pratiquer sur le végétal un **diagnostic de l'alimentation azotée**. Périodiquement un **bilan-diagnostic** plus approfondi prenant en compte les effets des rotations culturales sur les réserves ou les carences du sol doit être réalisé.

Toutes ces démarches conduisent finalement à **définir le nombre d'unités fertilisantes le plus pertinent à apporter pour chaque élément nutritif, puis à calculer la dose ou le poids/ hectare de produit à épandre. Malgré toutes ces précautions, et pour parvenir à une véritable maîtrise de la fertilisation, il est primordial de réaliser des épandages précis avec des matériels performants.**

• Le bilan cultural :

Appelé aussi bilan F-E (**bilan Fumure-Exportation**), le bilan cultural comptabilise pour un ou plusieurs éléments et pour une période (un ou plusieurs cycles culturaux) donnés, la différence entre les **Fumures** (entrées) et les **Exportations** (sorties) exprimée en kg/ha. Ce calcul est applicable à la parcelle, à un groupe de parcelles homogènes ou à l'exploitation.

• Le bilan azote d'une culture :

Ce bilan prend en compte les différentes disponibilités d'azote minéral du sol afin de déterminer la quantité (**x**) d'engrais nécessaire à l'élaboration de l'objectif de rendement (**y**) d'une culture donnée entre deux dates. Le bilan s'exprime globalement par la relation suivante :

besoin azote de la culture (B) = fourniture du sol (FS) + apport d'engrais (x) par l'agriculteur

Le **besoin azote (B)** de la culture est connu par la relation **B = b . y**

- « **b** » : **besoin spécifique** de la récolte en kg d'azote par tonnes/ha de récolte (à la fermeture du bilan). Ce besoin spécifique est indiqué par les différentes instances de conseil (30 kg/tonne pour le blé, 20 kg/tonne pour le maïs-grain, 15 kg/tonne de MS pour le maïs-fourrage...),
- « **y** » : **rendement** de la récolte produit ou escompté en tonnes/ha de grain sec ou de MS pour les fourrages.

Pour les plantes récoltées en grains, les fournitures du sol (**FS**) sont calculées à partir de la relation :

$$FS = (R_h - R_f) + M_H + M_R + M_A$$

R_h = reliquat d'azote minéral à la sortie de l'hiver

R_f = reliquat d'azote minéral après récolte de cette même culture

M_H = minéralisation nette de l'humus du sol

M_R = minéralisation nette des résidus de récolte du précédent cultural

M_A = minéralisation nette des amendements organiques

- finalement, l'équation du bilan azote peut s'écrire :

$$(b - b_o)y = R_h - R_f + M_H + M_R + M_A + X$$

(b_o étant la quantité d'azote absorbée en kg par tonne produite à la date d'ouverture du bilan).

et la quantité totale de produit appliqué par l'agriculteur (en fractionnant les apports) est :

$$X = B - FS$$

OU

$$X = (b - b_o)y - R_h + R_f - M_H - M_R - M_A$$

Le bilan azote peut être établi de manière prévisionnelle ou réelle. Dans la pratique du **bilan prévisionnel**, le facteur "y" correspond à l'objectif de rendement et "b" à la quantité d'azote présente par unité de rendement, quand la fumure azotée est optimale. Pour le **bilan réel**, le facteur "b.y" correspond à la quantité d'azote mesurée, effectivement prélevée par la culture. Lorsque les références existent, le bilan doit intégrer un **coefficient d'efficience de la fertilisation** appelé aussi **coefficient apparent d'utilisation de l'engrais (CAU)**. Ce coefficient traduit le taux probable d'assimilation de l'engrais par la plante ; il peut varier de 40 à 100 % selon le système sol-plante et surtout selon la date et le stade de l'application.

La réalisation du bilan azoté d'une culture nécessite des références (besoin spécifique selon la variété, incidence des conditions pédo-climatiques...) fournies par la recherche et les structures de conseil.

• LE DIAGNOSTIC DE L'ALIMENTATION AZOTÉE DES CULTURES

La pratique du **bilan prévisionnel** demeure la démarche de base en matière de fertilisation. Cela dit, des marges de progrès importantes peuvent être obtenues en matière de réduction des apports pour un même **objectif de rendement** et de **réduction des pollutions** par les

nitrate en pratiquant des diagnostics sur les cultures elles-mêmes. Ces diagnostics permettent d'orienter la décision d'appliquer un dernier apport d'azote, surtout lorsque plusieurs incertitudes existent : **effet du précédent cultural, situation pédo-climatique, sol peu profond** ou caillouteux...

Cette pratique connaît un certain développement, notamment pour le blé, en procédant à l'analyse de la **teneur en nitrate du jus de base de tiges** ou en évaluant sur place la **teneur en chlorophylle des feuilles**.

• L'analyse de la teneur en nitrate du jus de base de tiges :

Cette analyse peut être réalisée, par exemple, par la méthode JUBIL® proposée par l'INRA et l'ITCF ou la méthode Ramsès® proposée par l'UNCAA. Dans les deux cas, le diagnostic comprend quatre étapes :

– pour la méthode JUBIL® :

- **calcul de la dose** d'engrais azoté en pratiquant le **bilan prévisionnel** (se reporter à la définition du bilan azote),
- **application de la dose** indiquée par le bilan, moins 40 kg/ha, en deux étapes : tallage, puis épi 1 cm,
- suivi de la **teneur en nitrate du jus de tige** depuis le stade 1 nœud jusqu'au stade dernière feuille, en réalisant deux ou trois prélèvements,
- **décision** d'un troisième apport de 40 kg/ha, seulement si la teneur en nitrate mesurée est inférieure au seuil d'intervention prescrit selon la culture.

– pour la méthode Ramsès® :

- **prélèvement de sol** en janvier pour analyser la quantité d'azote minéralisable,
- **application de l'azote** nécessaire en deux fois : un premier apport au tallage et un second au stade épi 1 cm,
- 2 à 3 semaines après le second apport, réalisation de trois à cinq **prélèvements de jus de tige** espacés de dix jours environ, pour analyse de la teneur en nitrate ;
- **décision** d'appliquer un troisième apport de 50 kg/ha, seulement si la teneur en nitrate du jus est inférieure à l'indice 20 du protocole Ramsès®.

• L'évaluation de la teneur en chlorophylle des feuilles :

Cette méthode consiste à utiliser la teneur en chlorophylle des feuilles comme indicateur de nutrition azotée des plantes. Par exemple, avec l'appareil N-Tester proposé par Hydro, la « lecture » de la teneur en chlorophylle est réalisée directement au champ en présentant des feuilles devant la cellule photométrique d'un petit appareil électronique à affichage digital.

• Le bilan-diagnostic :

Ce bilan plus approfondi est réalisé sur un ou plusieurs éléments nutritifs et sur une période donnée.

Il prend globalement en compte les «entrées» et les «sorties» d'éléments :

- les entrées d'éléments dépendent des matières fertilisantes apportées, des fixations

biologiques dans le sol, des aliments consommés, des effets atmosphériques et de toutes autres origines ;
– les sorties d'éléments sont repérées sous forme de produits animaux et/ou végétaux exportés, d'aliments revendus, de volatilisation, de dénitrification, de lessivage et d'entraînement par érosion.

Selon les régions et les pratiques culturales, la réalisation de ces bilans nécessite des supports de conseils (instituts techniques, organismes de développement) afin d'utiliser des règles et des méthodes de calcul adaptées.

• LA CONNAISSANCE DES PRODUITS FERTILISANTS

Pour ce qui concerne la connaissance des produits, il convient de distinguer les engrais minéraux commerciaux et les fertilisants organiques (fumiers, lisiers, boues, composts...).

• Les engrais minéraux commerciaux :

Les engrais minéraux commerciaux présentent des teneurs (ou titre) en N-P-K garanties par la réglementation et contrôlées par les services de la répression des fraudes. Cette teneur exprime en kg la teneur en éléments, N, P₂O₅ ou K₂O pour 100 kg de fertilisant. Sachant qu'un kilogramme d'élément fertilisant est considéré comme **une unité fertilisante**, le calcul de la quantité d'engrais à apporter par hectare se définit simplement. Prenons pour exemple une fumure qui requière 120 unités d'azote par hectare avec un ammonitrate titrant 33,5 % de N (33,5 kg d'azote pour 100 kg de produit), la dose d'engrais (Q) à épandre par hectare est :

$$Q = \frac{U}{d} \times 100 \quad \text{soit} \quad \frac{120}{33,5} \times 100 = 358 \text{ kg/ha}$$

Afin de respecter la dose recherchée, il est indispensable d'employer des engrais solides de qualité qui possèdent des propriétés physiques (granulométrie, diamètre médian, sphéricité, dureté...) bien définies, avec absence de poussières et de reprise en masse (agglomérats). Ces propriétés physiques ont une influence importante sur la qualité de l'épandage (se reporter au chapitre 2 « *les engrais minéraux...* »).

Pour pratiquer l'épandage par projection, l'emploi d'un engrais de qualité permet d'obtenir la largeur de travail souhaitée lors de l'épandage avec une répartition transversale et longitudinale uniforme (se reporter au chapitre 4 : « *Les paramètres d'épandage, l'utilisation et les réglages des distributeurs d'engrais minéraux solides* »).

Un engrais de qualité conserve ses propriétés physiques pendant le transport, le stockage et la manutention ; il doit être référencé dans les tableaux de réglages des constructeurs pour faciliter la mise en œuvre précise des épandages.

• Les fertilisants organiques :

Pour les fertilisants organiques, l'épandage doit être réalisé en pratiquant le même raisonnement agronomique que pour celui des engrais commerciaux (objectif cultural, bilan...) avec, toutefois,

un handicap majeur dû :

- à la **difficulté de connaître la teneur des produits** en éléments fertilisants, nécessairement fluctuante selon l'origine et la nature des produits ;
- à la **difficulté de régler les matériels** d'épandage avec une consigne de dose fiable, en raison de l'hétérogénéité des produits ;
- aux **contraintes d'application** liées à la fois aux limites des volumes de stockage sur les exploitations, aux surfaces d'épandage disponibles et aux conditions pédo-climatiques.

Compte tenu de l'impact important que peuvent avoir les épandages des matières organiques sur l'environnement, ces pratiques sont soumises à des dispositions réglementaires, à des recherches et des travaux de normalisation.

• LA MAÎTRISE DES ÉPANDAGES

La maîtrise des épandages d'engrais et de matières organiques repose sur l'efficacité d'emploi, les performances des matériels et le comportement de l'utilisateur (se reporter au chapitre 3 : *les distributeurs d'engrais minéraux solides*, au chapitre 4 : « *les paramètres d'épandage, l'utilisation et les réglages des distributeurs d'engrais minéraux*, et au chapitre 5 : « *les fertilisants organiques et les matériels d'épandage* »).

Pour simplifier, on peut dire que la maîtrise des épandages est fonction de critères dépendant de l'utilisateur et de critères dépendant du matériel :

- les principaux critères dépendant de l'utilisateur sont :
 - la connaissance et la maîtrise des informations susceptibles de l'aider dans sa **stratégie de fertilisation** et ses **décisions d'application** : **objectif de rendement, fourniture du sol, besoins nutritifs de la culture, stades d'application et coefficient d'utilisation de l'engrais par le système sol-plante** ;
 - une utilisation du matériel conforme aux indications données par la notice du constructeur en veillant particulièrement au bon **choix des réglages du débit et de la largeur de travail** ;
 - un **entretien attentif** afin de conserver le bon fonctionnement, la fiabilité et la précision des appareils. Particulièrement pour les distributeurs d'engrais, les organes d'épandage sont des pièces d'usure qu'il y a lieu de remplacer périodiquement.
- les principaux critères dépendant du matériel sont :
 - l'aptitude à distribuer des doses de produit de façon homogène et régulière sur toute la surface du champ ;
 - la possibilité de réaliser les épandages sur les bordures en évitant les projections à l'extérieur du champ ;
 - l'adaptabilité aux différentes doses et types de produits utilisés et disposer des réglages de débit et de largeur en conséquence.

Lors d'un achat, il faut se rappeler que l'investissement consacré à un distributeur d'engrais minéraux solides performant est faible et qu'il sera aisément rentabilisé par la quantité totale d'engrais qu'il aura à épandre.

Les principales formes d'engrais minéraux	34
• Les engrais azotés simples	34
• Les engrais phosphatés simples	34
• Les engrais potassiques simples	35
• Les engrais composés	35
La qualité des engrais minéraux solides	37
Les principales caractéristiques physiques des engrais solides	38
• La masse volumique apparente	40
• La distribution granulométrique	40
• La sphéricité	43
• Le taux d'écoulement	43
• La dureté	44
• La friabilité	44
• Le taux de poussières	45
• La résistance à la reprise d'humidité	45
• La résistance à la reprise en masse	45
L'influence des caractéristiques physiques sur la précision d'épandage des engrais solides	46
Le conditionnement, l'étiquetage et les risques particuliers	46

LES PRINCIPALES FORMES D'ENGRAIS MINÉRAUX

Pour l'essentiel, les formulations d'engrais minéraux utilisées par les agriculteurs apportent l'**azote (N)**, le **phosphore** (P_2O_5) et le **potassium** (K_2O) soit sous la forme **d'engrais simples** qui ne contiennent qu'un élément N, ou P ou K, soit sous la forme **d'engrais composés** binaires (deux éléments) ou ternaires (trois éléments NPK associés).

• LES ENGRAIS AZOTÉS SIMPLES

Parmi les principaux engrais azotés simples, citons :

- les **ammonitrates**, de loin les plus utilisés en France, contenant de 26 à 34,5 % d'azote sous forme de nitrate d'ammoniaque ;
- l'**urée**, obtenue par synthèse de l'ammoniac et du gaz carbonique, contenant 46 % d'azote ;
- le **sulfate d'ammoniaque** (SO_3), 21% N -
- les **engrais nitriques** : nitrate de potasse (16 % N et 46 % de K_2O), nitrate de soude du Chili (16 % d'azote nitrique, 2,5 % de sodium et certains oligo-éléments), nitrate de chaux (15,5 % d'azote nitrique et 25 % de CaO), nitrate de chaux et de magnésie (15 % d'azote nitrique, 14 % de CaO et 8 % de MgO) ;
- l'**ammoniac anhydre**, engrais gazeux liquéfié sous pression qui contient 82 % d'azote ammoniacal, et qui est injecté dans le sol en phase gazeuse ;
- l'**azote liquide en solution** (solution azotée) sous forme de nitrate d'ammoniaque et d'urée (de 36 à 40 unités d'azote pour 100 litres), d'urée (de 20 à 24 unités d'azote pour 100 litres), d'une association de sulfate d'ammoniaque, de nitrate d'ammoniaque et d'urée (26 unités d'azote pour 100 litres).

• LES ENGRAIS PHOSPHATÉS SIMPLES

La dénomination des engrais phosphatés est décrite dans la norme française NF U 42-001. Parmi les nombreuses dénominations, citons **les superphosphates, les phosphates naturels et les scories Thomas**.

- Les **superphosphates** sont des engrais à **action rapide** facilement solubles dans l'eau. Ils sont obtenus par traitement chimique (à l'acide sulfurique ou à l'acide phosphorique) des **phosphates naturels miniers**. Selon leur teneur minimale en P_2O_5 (analysée selon des conditions réglementées), on distingue le superphosphate normal (minimum 16 %), concentré (minimum 25 %) ou triple (+ de 38 %).
- Les **phosphates naturels** sont surtout des **engrais de fond** en sol acide, issus du broyage de phosphates miniers (phosphates naturels, phosphates broyés + calcination) ou issus de phosphates miniers partiellement solubilisés par attaque acide.

– Les **scories Thomas** doivent leur nom au sidérurgiste britannique Thomas, qui mit au point en 1876 un procédé de déphosphoration des minerais de fer. Le phosphore (indésirable pour l'obtention d'aciers résistants) est extrait par une réaction oxygène-calcium qui le sépare et le regroupe à la surface de la fonte en fusion. Après récupération et refroidissement, ces scories sont broyées en poudre. Utilisées comme **engrais de fond** et **amendement**, elles contiennent au minimum 12 % de P_2O_5 , de 40 à 45 % de chaux dont 10 % de chaux libre, du magnésium et divers oligo-éléments.

• LES ENGRAIS POTASSIQUES SIMPLES

Les engrais potassiques sont essentiellement fabriqués à partir des gisements naturels de sels bruts de trois principaux types :

- la sylvinite : chlorure de potassium et chlorure de sodium,
- la carnallite : chlorure de potassium et chlorure de magnésium,
- la kainite : chlorure de potassium et sulfate de magnésium.

Les produits entrant dans la fabrication des engrais potassiques sont le **chlorure de potassium** et le **sulfate de potassium**.

– Le **chlorure de potassium** est un sel pratiquement pur qui est commercialisé soit «perlé» (contenant 61 % d'oxyde de potassium), soit granulé (contenant 60 % d'oxyde de potassium). Il est utilisé notamment lors de la préparation des terres, quelques semaines avant le semis.

– Le **sulfate de potassium simple** contient 50 % d'oxyde de potassium et 43 % de SO_3 . Il est fréquemment utilisé, notamment pour les cultures sensibles à la présence de chlore ou les cultures exigeantes en soufre.

– Le **sulfate double de potassium**, appelé aussi **patentkali**, est dosé à 30 % d'oxyde de potassium, 45 % de SO_3 et 10 % de MgO (oxyde de magnésium). Il est principalement destiné aux cultures sensibles aux carences en magnésium (vignes, pommiers, maïs...).

• LES ENGRAIS COMPOSÉS

Afin de répondre aux différentes séquences de la fertilisation, les fabricants proposent, en plus des engrais simples, des **engrais composés binaires ou ternaires**. Les engrais binaires sont du type NP, NK ou PK et les engrais ternaires NPK. Selon la nature physique et chimique des engrais de base, ces associations se présentent sous quatre formes : **les engrais composés complexes, les engrais composés de mélange, les engrais composés liquides en solution, les engrais composés liquides en suspension**.

– Les **engrais composés complexes** sont obtenus dès l'élaboration des produits de base par réaction et traitement chimique : c'est le cas par exemple du phosphate d'ammoniaque 18-46 (18 % de N et 46 % de P_2O_5).

– les **engrais de mélange** (bulk blends aux USA) sont obtenus par mélange mécanique de deux ou trois engrais de base. Étant donné les conséquences de ce mélange sur l'homogénéité physique du mélange (densité, forme et granulométrie différentes), ces produits ne peuvent être considérés comme des engrais au sens réglementaire du terme. Cela dit, à la date de rédaction de cet ouvrage, de nombreux travaux sont conduits par les instances européennes et internationales et les fabricants pour parvenir à des normes et à des textes de références.

– les **engrais composés liquides en suspension** contiennent des éléments nutritifs solides maintenus en suspension avec ou sans substance porteuse (argile par exemple). Ces engrais contiennent des éléments solubles en solution sursaturée ; ils nécessitent un brassage périodique et sont généralement préparés par des organismes distributeurs locaux peu avant leur utilisation.

Les engrais liquides azotés sont appliqués en localisation ou en plein avec des pulvérisateurs munis de buses à filets ou à miroir conçus pour résister à la corrosion.

Les engrais composés **binaires** ou **ternaires** sont identifiés selon des **normes** et des **réglementations strictes**. Les teneurs en éléments fertilisants sont repérées par trois nombres indiquant, dans l'ordre de lecture, la teneur en N, P_2O_5 et K_2O , soit : azote, anhydride phosphorique et oxyde de potassium.

Ces teneurs s'expriment en kilos de N, P_2O_5 et K_2O pour 100 kilos de produit. Ainsi, on peut trouver par exemple des formules 20-20-0, 0-20-20, 10-18-24...

La proportion des éléments entre eux est appelée « **équilibre** », la formule 15-15-15 par exemple correspond à un équilibre de 1, la formule 10-20-20 appartient à l'équilibre 1-2-2, la formule 20-20-10 appartient à l'équilibre 2-2-1...

La teneur des engrais en éléments fertilisants et leur forme chimique figurent obligatoirement sur l'étiquette des sacs et les documents (notices commerciales, factures...).

LA QUALITÉ DES ENGRAIS MINÉRAUX SOLIDES

Un engrais de qualité possède des propriétés physiques (granulométrie, diamètre médian, sphéricité, dureté...) bien définies, avec absence de poussières et de reprise en masse (agglomérats). Ces propriétés physiques ont une influence importante sur la qualité de l'épandage.

Pour pratiquer l'épandage par projection (rappelons que les distributeurs centrifuges sont les plus répandus), l'emploi d'un engrais de qualité permet d'obtenir la largeur de travail souhaitée lors de l'épandage, avec une répartition transversale et longitudinale uniforme.

Un engrais de qualité conserve ses propriétés physiques pendant le transport, le stockage et la manutention ; il doit être référencé dans les tableaux de réglages des constructeurs pour faciliter la mise en œuvre précise des épandages.

L'efficacité de l'unité fertilisante apportée sur une culture dépend des **caractéristiques chimiques** et des **caractéristiques physiques** de l'engrais utilisé :

• Les caractéristiques chimiques :

Les caractéristiques chimiques des engrais minéraux sont connues et ont fait l'objet d'une normalisation déjà ancienne dans le cadre de l'AFNOR et de l'ISO. Ces normes concernent les formes chimiques des éléments fertilisants de l'engrais, la solubilité dans l'eau et les réactifs chimiques, l'association des éléments fertilisants entre eux et la teneur (garantie du titre).

• Les caractéristiques physiques :

Les caractéristiques physiques des engrais minéraux ont été abordées dans le cadre des travaux de normalisation destinés à favoriser une meilleure efficacité agronomique. On peut signaler la norme NFU 42-001 (ou la directive 76-116-CEE) qui précise seulement des valeurs de finesse de mouture pour un certain nombre d'engrais phosphatés. Cela dit, à la date de rédaction de cet ouvrage, des normes sont en voie d'élaboration pour fixer des caractéristiques physiques et des valeurs favorables à une application de qualité. Ces travaux, indispensables à la maîtrise des apports d'engrais et au respect de l'environnement, sont les maillons essentiels d'une chaîne de qualité qui conduit à l'obtention d'épandages précis et réguliers avec une répartition homogène et une conservation du titre en tout point de la parcelle. Pour les engrais minéraux solides, les éléments de cette chaîne de qualité sont :

- **des caractéristiques physiques de fabrication favorables** à un épandage de précision tenant compte des paramètres d'application ;
- **une bonne aptitude à conserver les caractéristiques physiques initiales** pendant les périodes de stockage et au cours des manipulations de transfert : transport, stockage, manutention et écoulement dans les trémies et organes de distribution ;
- **des appareils distributeurs fiables ayant une bonne adaptabilité** de leurs réglages aux différents produits et conditions d'utilisation ;
- **une bonne maîtrise par l'utilisateur de l'utilisation des matériels et de l'organisation** des chantiers.

LES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES ENGRAIS SOLIDES

Les engrais solides sont les plus répandus et se présentent sous des formes variées : granulée, perlée (fig. 4), compactée, cristallisée ou pulvérulente (produits broyés). La forme granulée est largement prédominante et continue à se développer. L'industrie fournit des engrais pulvérulents seulement quand la nature des produits se prête mal à leur granulation, ou pour des raisons agronomiques. Certains engrais (notamment ceux qui sont peu solubles) doivent en effet être réduits en fines particules pour avoir une bonne action dans le sol (c'est le cas des phosphates tricalciques par exemple). Les engrais pulvérulents ne peuvent être épandus par projection (énergie cinétique), mais avec des appareils à rampe.

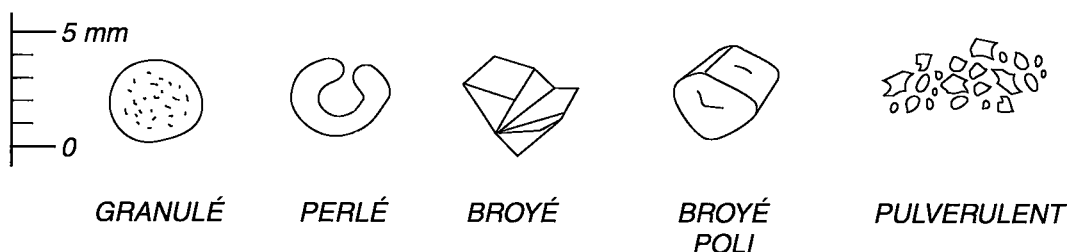


Fig. 4 - Différentes formes géométriques d'engrais minéraux solides

Parmi les nombreuses caractéristiques physiques des engrais solides (fig. 5), citons :

- la masse volumique apparente,
- la distribution granulométrique,
- la sphéricité,
- le taux d'écoulement,
- la dureté,
- la friabilité,
- le taux de poussières,
- la résistance à la reprise d'humidité,
- la résistance à la reprise en masse.

La masse volumique apparente, la distribution granulométrique, la sphéricité et le taux d'écoulement ont une influence significative sur l'homogénéité de l'engrais et son comportement dans les appareils de distribution et sur sa trajectoire dans l'air (distribution centrifuge). La prise en compte de ces caractéristiques par les constructeurs permet d'optimiser la conception des matériels d'épandage et de proposer aux utilisateurs des réglages aptes à assurer l'application des différents engrais dans le respect des doses souhaitées et avec une régularité et une homogénéité de couverture la plus précise possible.

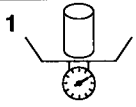
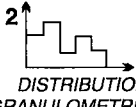


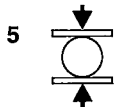
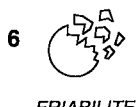


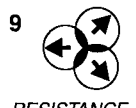
Caractéristiques physiques	Propriétés recherchées	But recherché
<p>1</p>  <p>MASSE VOLUMIQUE</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Masse volumique importante et homogène. 	<ul style="list-style-type: none"> - Régularité d'écoulement dans les distributeurs - Régularité d'épandage - Aptitude à l'épandage centrifuge
<p>2</p>  <p>DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Granulométrie homogène et calibre suffisant des granulés. 	<ul style="list-style-type: none"> - Répartition homogène du produit épandu pour les différentes largeurs d'épandage
<p>3</p>  <p>SPHERICITE</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Surface sphérique la plus régulière possible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Facilité d'écoulement dans les distributeurs - Trajectoire stable dans l'air - Faible résistance aux frottements
<p>4</p>  <p>TAUX D'ECOULEMENT</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Aptitude à l'écoulement par gravité. Propriété dépendante de 1 - 2 - 3 - 5 - 6 - 7 et 8. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bon écoulement dans les trémies et les mécanismes de dosage - Régularité d'épandage
<p>5</p>  <p>DURETE</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Conservation des caractéristiques dimensionnelles de fabrication. - Résistance aux chocs et pressions lors des manipulations et épandages 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des risques d'écrasement et de poussières - Prévenir les conséquences d'une modification granulométrique à l'épandage (chocs contre les pales)
<p>6</p>  <p>FRIABILITE</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Conservation des caractéristiques dimensionnelles de fabrication. - Résistance à l'abrasion par frottements et chocs. Dépend de 5. 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction du risque de poussière - Prévenir les conséquences d'une modification granulométrique à l'épandage (chocs contre les pales)
<p>7</p>  <p>TAUX DE POUSSIÈRES</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Conservation des caractéristiques dimensionnelles de fabrication. - Dépend de 5 et 6. 	<ul style="list-style-type: none"> - Prévenir la reprise en masse - Prévenir la dérive du produit ou un surdosage au milieu de la zone d'épandage (par projection)
<p>8</p>  <p>RESISTANCE A LA REPRISSE D'HUMIDITE</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de la tendance des produits à fixer l'humidité de l'air. 	<ul style="list-style-type: none"> - Prévenir les risques de désintégration des granulés et la reprise en masse du produit
<p>9</p>  <p>RESISTANCE A LA REPRISSE EN MASSE</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Conservation des caractéristiques dimensionnelles et de mobilité des granulés entre eux. - Dépend aussi de 7 et 8. 	<ul style="list-style-type: none"> - Prévenir l'agglomération des produits et les difficultés d'épandage

Fig. 5 - Les principales propriétés physiques des engrais minéraux solides

La dureté, la friabilité, le taux de poussières, la résistance à la reprise d'humidité et la résistance à la reprise en masse sont des caractéristiques qui déterminent l'aptitude des produits à conserver leurs propriétés initiales dans le temps et au cours des opérations de maintenance et de stockage.

Pour chacune des caractéristiques décrites ci-après, des critères et des valeurs limites sont déterminés par des procédures reconnues faisant appel à une instrumentation particulière.

• LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE

Cette caractéristique importante des engrais granulés a fait l'objet d'une normalisation (NFU 42401, ISO 8397, pr EN-1236). La masse volumique apparente d'un engrais est exprimée en kilogrammes par décimètre cube (kg/dm^3). Précisons que, en dehors des conditions normalisées de mesure, la masse volumique apparente d'un engrais donné peut varier selon le taux d'humidité qu'il contient.

La masse volumique apparente d'un engrais doit être prise en compte lors du réglage des distributeurs centrifuges en raison de son incidence sur l'énergie cinétique (facteur balistique) des granulés, et donc sur leur trajectoire et la largeur de travail. Ainsi, pour un même réglage du distributeur, un engrais de faible masse volumique est projeté moins loin qu'un engrais de masse volumique plus élevée pour un même diamètre, les particules les plus denses vont plus loin.

La masse volumique apparente a, par ailleurs, une influence sur le débit d'écoulement (influence gravitaire), et donc sur le réglage de la dose d'engrais à apporter par hectare.

Pour résumer, rappelons que la masse volumique apparente des engrais a des conséquences directes sur la largeur de travail des appareils centrifuges et la quantité (Q) épandue par hectare. Pour le réglage des matériels, il convient donc que la masse volumique apparente de chaque produit soit bien connue et constante (exemples : ammonitrate 0,850 à 0,950 kg/dm^3 et engrais NP-PK-NPK 0,900 à 1,200 kg/dm^3).

• LA DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE

Pour tous les engrais **granulés** ou « **perlés** » (ou prillés), la granulométrie intervient de manière déterminante sur le réglage des distributeurs centrifuges et la qualité de répartition. Avec les distributeurs centrifuges, majoritairement utilisés par les agriculteurs, plus la granulométrie du produit épandu est irrégulière, plus la répartition au sol est aléatoire et plus le diamètre augmente, plus la portée de projection tend à s'accroître (à masse volumique identique et pour un même réglage de l'appareil).

La « distribution granulométrique » définit la taille moyenne et la diversité dimensionnelle des particules constituant un produit. Elle est analysée par tamisage d'un échantillon d'engrais (200 grammes par exemple) au travers d'un empilage de tamis normalisés (tamis ISO) ayant des mailles de plus en plus petites (par exemple : 5 mm, 4 mm, 3,15 mm, 2,5 mm, et 2 mm).

D'autres dimensions de tamis peuvent être utilisées. Le contenu de chaque tamis, appelé « refus », est pesé afin de tracer la courbe des refus de tamisage pour chaque maille de tamisage. Cette courbe permet de définir les deux paramètres de la distribution granulométrique : **le diamètre médian (appelé D50) et l'étalement granulométrique (E)**. A partir de l'exemple d'une analyse granulométrique d'un ammonitrate, la figure 6 indique la répartition granulométrique dans les tamis et la courbe des refus cumulés. Observons les résultats du tamisage :

- le premier tamis à mailles de 5 mm n'a rien retenu (il a laissé passer 100 % de l'échantillon),
- le second tamis de 4 mm a retenu 18 grammes, soit 9 % de l'échantillon,
- le troisième tamis de 3,15 mm a retenu 110 grammes, soit 55 % de l'échantillon,
- le quatrième tamis de 2,5 mm a retenu 70 grammes, soit 35 % de l'échantillon,
- le cinquième tamis de 2 mm a retenu les 2 grammes restant, soit 1 % de l'échantillon.

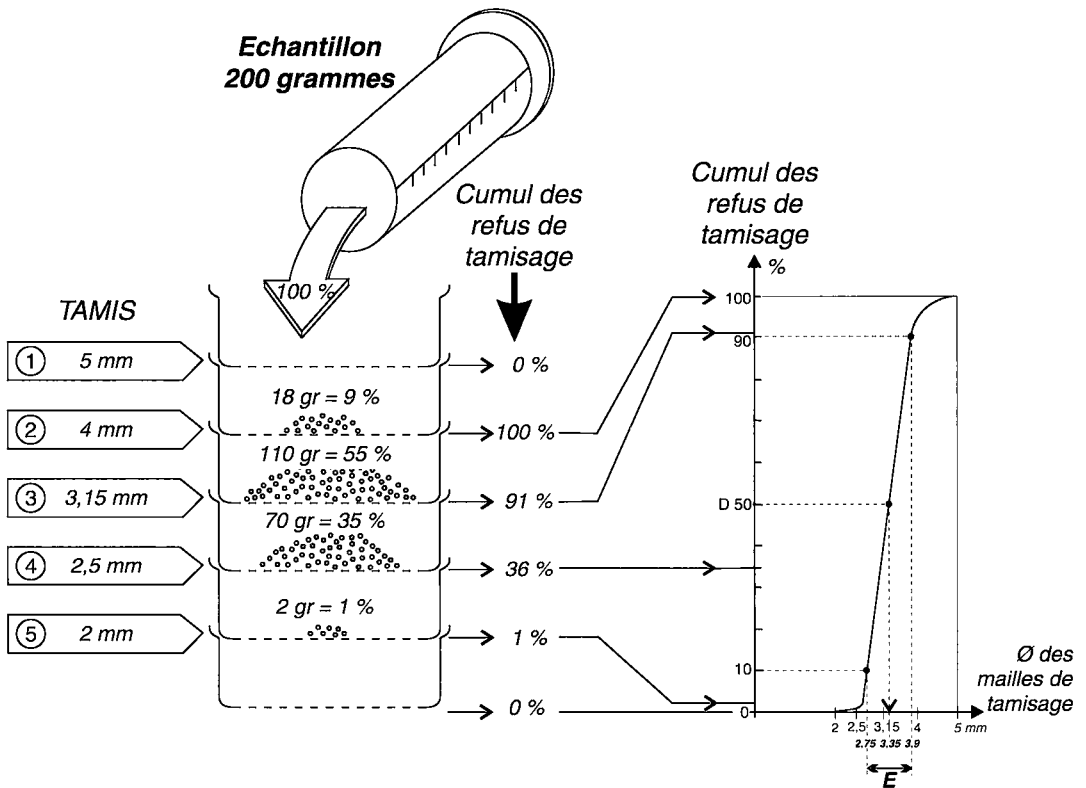


Fig. 6 - Les deux paramètres de la distribution granulométrique : le diamètre médian (D50) et l'étalement granulométrique (E)

La courbe des écoulements cumulés correspondant au tamisage de cet engrais permet de situer (fig. 6) la valeur du diamètre médian (**D50**) à 3,35 sur l'échelle des diamètres de tamisage. Cette valeur correspond à l'ouverture théorique des mailles d'un tamis qui aurait laissé passer 50 % de l'échantillon, d'où cette appellation D50. L'examen de la courbe des cumuls de refus de la figure 12 permet aussi de localiser les valeurs de l'**étalement granulométrique (E)**. L'**étalement granulométrique E** correspond à la différence d'ouverture **D** des mailles théoriques qui laisseraient passer respectivement 90 % (D90) et 10 % (D10) de l'échantillon. Dans cet exemple, les valeurs étant 3,9 pour 90 % des cumuls de refus et 2,75 pour 10 % des cumuls de refus, **E** est donc égal à $3,9 - 2,75 = 1,15$.

Les mesures des laboratoires s'effectuent selon un protocole plus complexe en interpolant, par exemple, les valeurs de plusieurs séquences de tamisage avec des tamis ISO de gammes d'ouvertures se rapprochant de la maille théorique recherchée. La méthode qui vient d'être décrite est fondée sur la pesée des « refus » de tamis, il existe une autre méthode fondée sur la pesée des « passants » (pesée des quantités écoulées).

Sur le terrain, la distribution granulométrique d'un engrais peut être facilement appréciée au moyen d'un boîtier équipé de 3 ou 4 tamis normalisés. Ce granulomètre simplifié (fig. 7) peut être fourni par certains fabricants d'engrais ou d'appareils distributeurs d'engrais.

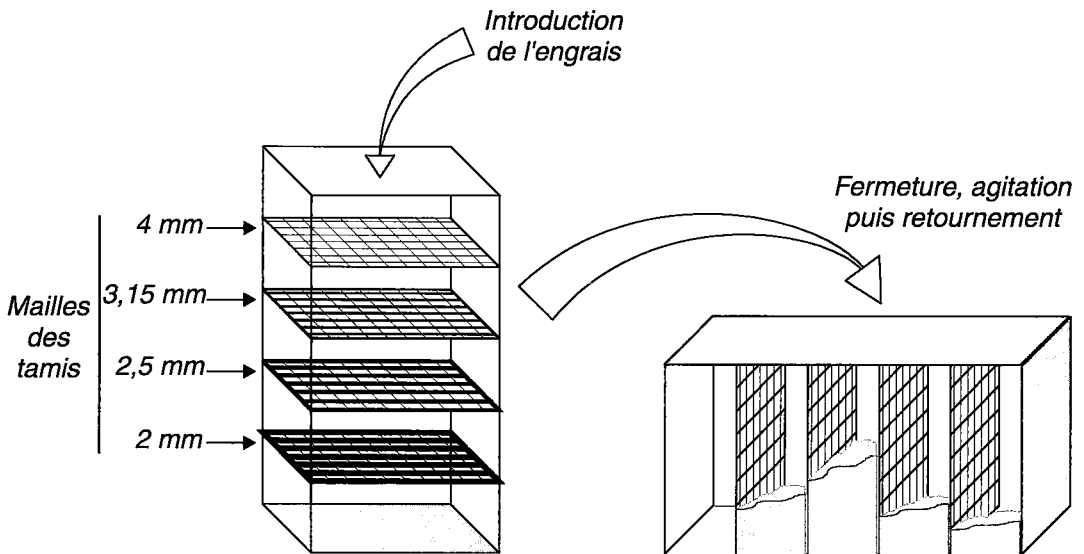


Fig. 7 - Principe d'un granulomètre manuel

Un diamètre médian D50 voisin de 3 mm avec près de 80 % des particules comprises entre 2,5 et 4,0 mm (fig. 8) sont des critères à rechercher pour réussir un épandage en grande largeur : 24 m et plus.

Ainsi, suivant l'origine de sa fabrication, le D50 d'un ammonitrate peut varier de 1,9 à 3,2 mm et l'étalement granulométrique E de 0,8 à 1,8 mm.

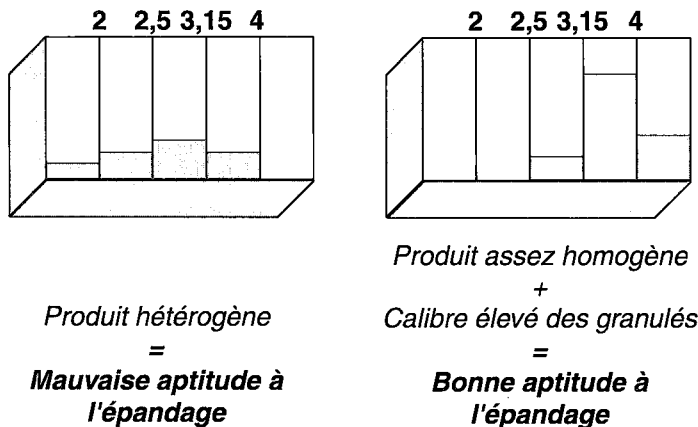


Fig. 8 - Exemple de distribution granulométrique indiquée par un granulomètre manuel

• LA SPHÉRICITÉ

La sphéricité caractérise la forme et la nature de la surface des granulés et perles (surface sphérique plus ou moins parfaite ou irrégulière). Elle influe notamment sur la coulabilité des engrais et leur déplacement dans l'air. La sphéricité est évaluée en mesurant le pourcentage de masse de grains ayant franchi une pente normalisée de 12 % sur une distance d'au moins 600 mm (après le lancement préalable sur un plan incliné de 45 %). Si les grains sont sphériques, au moins 60 % d'entre eux arrivent au bas du plan incliné.

Avec un engrais sphérique, l'angle de talutage est plus faible et l'écoulement dans la trémie du distributeur est régulier. Avec les systèmes d'épandage centrifuge (épandage par projection), plus les particules sont sphériques, plus leur résistance aérodynamique est faible, plus la distance de projection est grande et plus la trajectoire dans l'air est stable.

Si le produit est anguleux et rugueux, le coefficient de frottement entre l'organe de projection et l'engrais augmente, le temps de séjour de l'engrais sur le disque s'allonge, la vitesse d'éjection diminue et la trajectoire des particules dans l'air devient irrégulière.

• LE TAUX D'ÉCOULEMENT

Le taux d'écoulement (fig. 9) définit la faculté d'un engrais à s'écouler par gravité et permet d'apprécier la mobilité de ces particules lors de la manutention (vrac) et de leur écoulement dans la trémie et les mécanismes de dosage des distributeurs d'engrais.

Ce comportement résulte de la plupart des caractéristiques physiques : masse volumique apparente, distribution granulométrique, sphéricité, conservation de l'état de surface, dureté, friabilité, taux de poussières, résistance à la reprise d'humidité, résistance à la reprise en masse....

La méthode d'évaluation du taux d'écoulement proposée par le Comité européen de normalisation (CEN) consiste à mesurer le temps d'écoulement de 2 kg d'un échantillon d'engrais. Les valeurs observées avec cette méthode varient de 4 kg à 8 kg par minute selon les produits.

TAUX D'ÉCOULEMENT ÉLEVÉ

TAUX D'ÉCOULEMENT FAIBLE

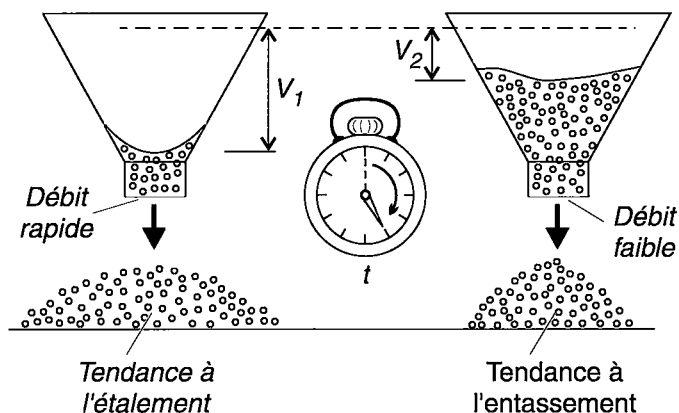


Fig. 9 - Principe de l'appréciation du taux d'écoulement

plus la dureté est importante. Pour l'ammonitrate 33,5 % qui est un engrais sensible à ce risque, la valeur minimale recherchée dépasse 30 N, par exemple. Cette dureté peut atteindre des valeurs très faibles de l'ordre de 7 newtons.

Si l'engrais a mal supporté les contraintes de stockage et de manutention et si aucun contrôle de la granulométrie (D50 et E) n'est effectué au moment de l'épandage, le réglage choisi ne correspondra pas aux caractéristiques réelles des particules. Si la dureté est insuffisante, les particules s'écrasent à leur arrivée sur le disque du distributeur et le spectre granulométrique initial du produit est profondément modifié.

• LA FRIABILITÉ

Cette notion permet d'apprécier l'importance de l'abrasion due au frottement et aux chocs mutuels que peuvent subir les particules d'engrais (et plus particulièrement l'engrais azoté) de la sortie de l'atelier à leur arrivée sur le sol de la parcelle de l'agriculteur, au cours de toutes les manipulations effectuées.

Cette mesure a lieu en laboratoire dans des conditions précises. On détermine par exemple la quantité de particules brisées produites par le passage d'un échantillon d'engrais (ammonitrate) dans un cyclone alimenté par un débit d'air contrôlé. On exprime le résultat de ce traitement par le pourcentage de particules inférieures à 1,6 mm de diamètre. D'autres méthodes de mesure existent.

Un ammonitrate résistant bien à l'abrasion a une friabilité ou taux de bris inférieur à 5 %. Cette valeur peut aller de 5 à 70 % suivant l'origine de la fabrication.

• LA DURETÉ

L'engrais, au cours des différentes manutentions et de l'épandage, doit conserver les caractéristiques physiques qui lui ont été apportées lors de la fabrication ; la dureté de l'engrais exprime sa capacité à résister aux chocs et aux pressions. Plus la dureté de l'engrais est élevée, moins il y a de risques de fragmentation, d'écrasement et de poussières. La mesure de dureté s'effectue en soumettant un granulé ou un perlé, représentatif du produit, à une force d'écrasement de 0 à 120 newtons, sous une petite presse mécanique. Plus la force d'écrasement est élevée,

• LE TAUX DE POUSSIÈRES

La présence de poussières dans un engrais granulé est très défavorable à la bonne tenue du produit, elle peut être due à plusieurs causes :

- fabrication défectueuse,
- vieillissement accéléré,
- dégranulation due aux variations de température, d'humidité et à des réactions chimiques lentes.

La tolérance est très faible car la présence de poussières est un facteur favorable à la reprise en masse de l'engrais (l'hygroscopie est augmentée). A l'épandage, la poussière tend à provoquer une concentration à l'arrière du distributeur et elle présente une forte sensibilité au vent latéral (dérive).

La poussière pose par ailleurs un problème d'hygiène et de sécurité, car sa suspension dans l'air est nocive pour les manutentionnaires d'engrais.

Pour apprécier le taux de poussières, on détermine par exemple la perte de poids d'un échantillon d'engrais, après plusieurs passages dans une colonne équipée de grilles, dans laquelle circule un courant d'air ascendant. Cette perte de poids doit toujours être la plus faible possible et ne jamais dépasser 0,1 %.

• LA RÉSISTANCE À LA REPRISE D'HUMIDITÉ

L'excès d'humidité est toujours très nuisible à la conduite du stockage en vrac et à la qualité de l'épandage – surtout dans le cas de produits poussiéreux.

Le taux d'humidité à la sortie de l'usine est normalement de l'ordre de 0,2 % pour l'ammonitrate, de 1 % pour les engrais complexes et de 5 %, voire plus, pour les engrais PK. Mais ces valeurs peuvent varier d'une façon importante suivant les origines.

On peut apprécier la résistance d'un engrais à la reprise d'humidité, par exemple, en mesurant l'évolution d'un poids d'échantillon d'engrais exposé pendant vingt-quatre heures à une atmosphère d'humidité relative de 74 % à température ambiante. L'idéal est une évolution de poids proche de zéro.

• LA RÉSISTANCE À LA REPRISE EN MASSE

La reprise en masse est un phénomène qui conduit l'engrais à s'agglomérer en mottes compactes de tailles plus ou moins importantes. Le risque de prise en masse d'un engrais est d'autant plus élevé que ses taux d'humidité et de poussières sont élevés. Selon le degré d'agglomération atteint, la prise en masse peut rendre très difficile, voire, impossible l'épandage de l'engrais par les procédés normaux. **La résistance à la reprise en masse** caractérise l'aptitude d'un engrais à conserver ses particules séparées les unes des autres durant toute l'existence du produit. Pour apprécier cette résistance, un test de laboratoire consiste à mesurer la charge nécessaire à la rupture d'une pastille d'engrais fabriquée dans des conditions de température, de pression et de dureté déterminées. A la fabrication, la résistance à la reprise en masse peut être accrue par un enrobage des granulés à base de différentes formulations propres à chaque producteur d'engrais.

L'INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES SUR LA PRÉCISION D'ÉPANDAGE DES ENGRAIS SOLIDES

Pour atteindre la **largeur de projection** correspondant effectivement à la **largeur de passage** choisie (de 12 à 36 m avec des distributeurs centrifuges double disque), il convient que l'engrais ait un **diamètre médian D50** très voisin de 3 mm, un **étalement** granulométrique E le plus resserré possible et une **friabilité** (ou taux de bris) la plus basse possible, inférieure à 5 %.

La **régularité d'épandage**, qui se mesure par le **coefficient de variation (CV)**, est jugée satisfaisante au banc d'essai si la variation de la **répartition** au sol est inférieure à 10 %. Pour cela, il faut que l'engrais ait :

- une **dureté** suffisante (30 newtons et plus) pour éviter un éclatement et la formation de poussière sur les pales de l'appareil distributeur,
- une **masse volumique** des granulés suffisante et constante pour effectuer le trajet correspondant à l'impulsion des pales du distributeur (au moins 850 kg/m³),
- une bonne **sphéricité** afin que la trajectoire du granulé dans l'air soit la plus stable possible.

Précisons que pour les **engrais de mélange** mécanique (bulk), en plus des caractéristiques décrites précédemment, il convient que les caractéristiques physiques des matières premières constitutives du mélange soient les plus semblables possible. Cette homogénéité physique favorise la régularité d'épandage et la stabilité de la largeur optimale de travail. De plus, l'homogénéité du mélange réduit la sensibilité du produit aux effets de la manutention et aux phénomènes de triage (densimétrie et granulométrique) pendant les écoulements.

LE CONDITIONNEMENT, L'ÉTIQUETAGE ET LES RISQUES PARTICULIERS

• Le conditionnement :

Avec le développement de la fertilisation, l'augmentation des quantités épandues, l'augmentation de la taille des exploitations et la diminution de la main-d'œuvre disponible, les modes de conditionnement se sont nettement développés pour permettre une plus grande facilité d'utilisation. De l'utilisation de sacs de 50 kg épandus par l'agriculteur au service rendu-racines, plusieurs possibilités sont offertes aux utilisateurs :

– **les sacs de 50 kg** en plastique souple, souvent micro-perforé, permettent un stockage sur palette en milieu couvert ou à l'extérieur avec un film de protection. Les sacs de 50 kg présentent l'avantage de constituer des unités de conditionnement faciles à intégrer dans les calculs et favorables à un contrôle simple de la dose épandue ; en revanche, ils ont l'inconvénient de nécessiter de la main-d'œuvre et des efforts physiques, surtout au moment du remplissage des trémies des distributeurs.

– **les sacs de 500 kg** en matière textile synthétique peuvent être stockés à l'intérieur ou à l'extérieur. Leur manutention est totalement mécanisée et nécessite une potence arrière ou

un chargeur frontal. Le chantier d'épandage requiert souvent un second tracteur affecté à la manutention et une capacité de trémie du distributeur suffisante pour recevoir le contenu d'un ou de plusieurs sacs.

– **l'engrais en vrac** présente l'avantage de bénéficier d'une manutention totalement mécanisée (remplissage du distributeur à l'aide d'un godet, d'une vis ou par gravité). Selon les cas, l'agriculteur peut s'approvisionner directement au dépôt du vendeur ou par l'intermédiaire d'un conteneur déposé sur l'exploitation (en consigne, en propriété ou en location).

– **le service rendu-racines** proposé par des vendeurs d'engrais, des coopératives ou des entrepreneurs consiste à décharger l'utilisateur des problèmes de stockage et d'épandage. Après avoir déterminé son plan de fumure, le calendrier d'épandage et la nature des engrais choisis, le contrat de service est exécuté par l'applicateur. Cette pratique est surtout utilisée pour les engrais pulvérulents qui nécessitent un équipement spécifique.

– **les engrais liquides** stockés en cuves spéciales anticorrosion sont appliqués par des pulvérisateurs équipés de buses spécifiques à filets (se reporter à la partie de cet ouvrage consacrée aux pulvérisateurs à rampes et aux buses). Leur utilisation, surtout pour les solutions azotées, est courante dans les exploitations de grandes cultures, mais ne remplacent pas les distributeurs d'engrais solides, indispensables pour beaucoup d'applications.

– **les produits gazeux** sont principalement représentés par **l'ammoniac anhydre**. L'application de l'ammoniac anhydre nécessite l'utilisation d'un **appareil applicateur** (fig. 10) qui comporte un **réservoir de stockage en phase liquide** à 7 bars, un **détendeur de pression** d'où

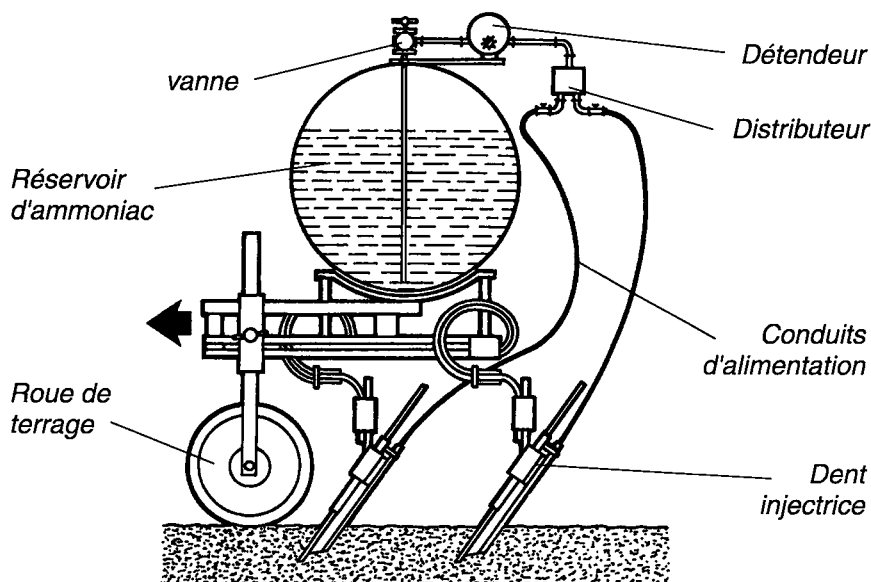


Fig. 10 - Schéma de principe d'un applicateur d'ammoniac anhydre

l'ammoniac sort vers des **tubulures** aboutissant à des **socs d'enterrage**, appelés **dents d'injection**. Le produit passe en **phase gazeuse** à la sortie des tubes et est immédiatement fixé par l'humidité du sol.

• **L'étiquetage :**

En matière d'étiquetage, la législation concernant les engrais impose surtout le respect des teneurs affichées. Ainsi une étiquette implique un certain nombre de mentions obligatoires alors que d'autres sont facultatives (fig. 11).

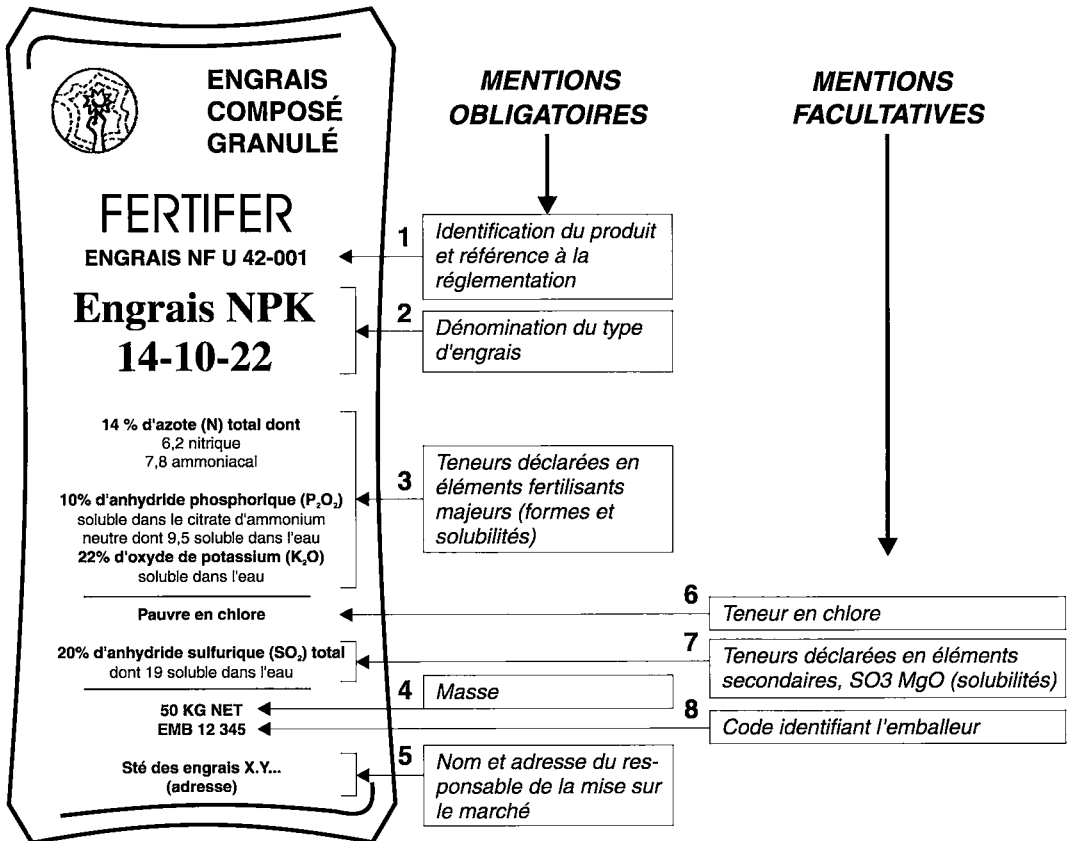


Fig. 11 - Principales indications fournies par l'étiquetage des engrais minéraux commerciaux (source FNIE)

• Les risques particuliers :

En matière de sécurité, les engrais font l'objet de dispositions réglementaires concernant la production, le transport et l'utilisation. Ces dispositions visent à prévenir les risques d'incendie (certains engrais comme les ammonitrates sont des combustibles), les risques de toxicité, les risques de pollution atmosphérique (fabrication) et les risques de pollution des sols et de l'eau au cours des étapes de fabrication, de transport, de stockage et de fertilisation :

– **au niveau des sites de fabrication**, les industriels doivent respecter notamment les normes et textes réglementaires concernant la sécurité des sites, l'hygiène et la sécurité des travailleurs, le respect des limites de rejets dans l'air et l'eau...

– **au niveau des transports**, certains engrais, au même titre que les matières inflammables, les produits chimiques et les matières toxiques, sont soumis à la Réglementation intérieure et internationale pour le Transport des Matières Dangereuses (réglementation RTMDR, ministère des Transports), portant notamment sur une signalisation par classe de risque, des précautions d'emballage, des véhicules de transports agréés, des personnels qualifiés...

– **au niveau des sites de stockage et des manipulations**, respecter les dispositions réglementaires et les règles d'hygiène et de sécurité. Toutes les précautions doivent être prises notamment pour prévenir les risques de contact avec d'autres marchandises ou aliments, les risques de corrosion des structures (abris, hangars...), les risques de combustion ou d'explosion (matières combustibles, inflammables...) et les risques de pollution des eaux.

– **au niveau de l'exploitation agricole**, l'agriculteur doit, d'une part, respecter les règles de stockage et de manipulation décrites ci-dessus et, d'autre part, maîtriser et raisonner la fertilisation (choix des engrais, définition des dosages les plus pertinents, dates optimales des apports, respect des doses, qualité des épandages...) afin de respecter les dispositions réglementaires pour la protection de l'environnement.

Compte tenu des règles de sécurité liées à la manipulation de l'ammoniac, toutes les opérations de maintenance, de manipulation et de transvasement sont réalisées exclusivement par un personnel qualifié, avec des équipements spécifiques et en respectant les procédures édictées par le réseau de commercialisation de l'ammoniac agricole.

LES DISTRIBUTEURS D'ENGRAIS MINÉRAUX SOLIDES **3**

Typologie des distributeurs d'engrais minéraux solides	53
Les distributeurs centrifuges à disques	61
Les paramètres dynamiques et mécaniques de l'épandage centrifuge	65
Les systèmes d'épandage à réglage du point de chute	72
Les systèmes d'épandage à réglage des pales	74
Les systèmes d'épandage à changement de pales	76
Les systèmes d'épandage à boîte de vitesses	77
Les systèmes d'épandage à vitesse de rotation variable	80
Les distributeurs à bras oscillant	83
Les distributeurs à rampes	84
Les distributeurs pneumatiques.	84
Les distributeurs mécaniques à vis	86
Les épandeurs en nappe	89
Les équipements pour la fertilisation localisée	91
Les dispositifs de régulation et d'aide à l'épandage	96
Les consoles d'indication et de commande	96
Les systèmes de régulation du débit	96
Les systèmes intégrés d'étalonnage de débit et de largeur	99
La gestion intraparcellaire	101

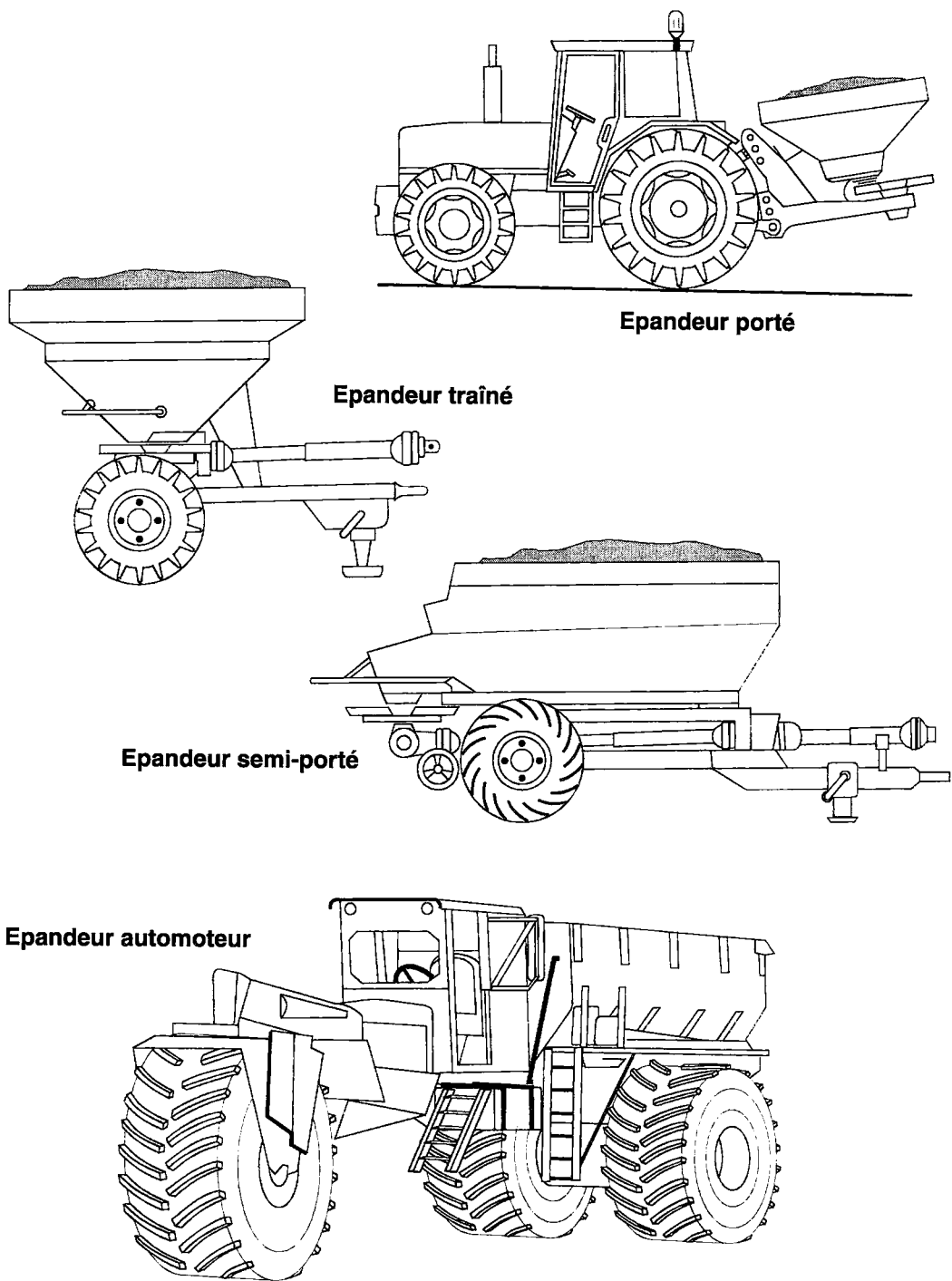


Fig. 12 - Les différents types de distributeurs d'engrais

TYOLOGIE DES DISTRIBUTEURS D'ENGRAIS MINÉRAUX SOLIDES

Selon leur capacité de trémie, les distributeurs peuvent être portés, semi-portés, traînés ou automoteurs (fig. 12).

Les distributeurs automoteurs sont surtout utilisés par des CUMA, des entreprises de travaux agricoles ou par des sociétés d'application intervenant dans le cadre de contrats de fertilisation (service « rendu-racines »). Équipés de distributeurs centrifuges ou de rampes de grande largeur et de grandes trémies (de 5 à 10 m³), ces véhicules sont chaussés de pneumatiques basse pression de grande largeur afin de dégrader le moins possible les sols.

Par leur nature chimique et physique, les engrais sont très corrosifs et abrasifs. La fabrication des distributeurs d'engrais nécessite des traitements particuliers :

- pour la protection des métaux et particulièrement les parois des trémies : phosphatation, apprêt phénolique, peinture au four, revêtements époxy... Certains organes, notamment les trémies, peuvent être réalisés en matière plastique moulée,
- pour les pièces coulissantes (trappes, volets...), utilisation d'acier inoxydable et (ou) de revêtement anti-frottement (Rilsan ou Téflon...),
- pour les pièces soumises à l'abrasion (disques, pales...) la fabrication en acier inoxydable (nuance 18-10 ou plus) est fréquente.

D'une manière générale (fig. 13), les distributeurs disposent :

- d'une **trémie**,
- d'un **système d'alimentation et de dosage**,
- d'**organes d'épandage**.

• La trémie :

Les appareils portés ont une capacité de trémie de 300 à 2 000 litres (parfois jusqu'à 3 000 litres) tandis que les appareils tractés peuvent avoir une capacité de trémie de 2 000 à 10 000 litres.

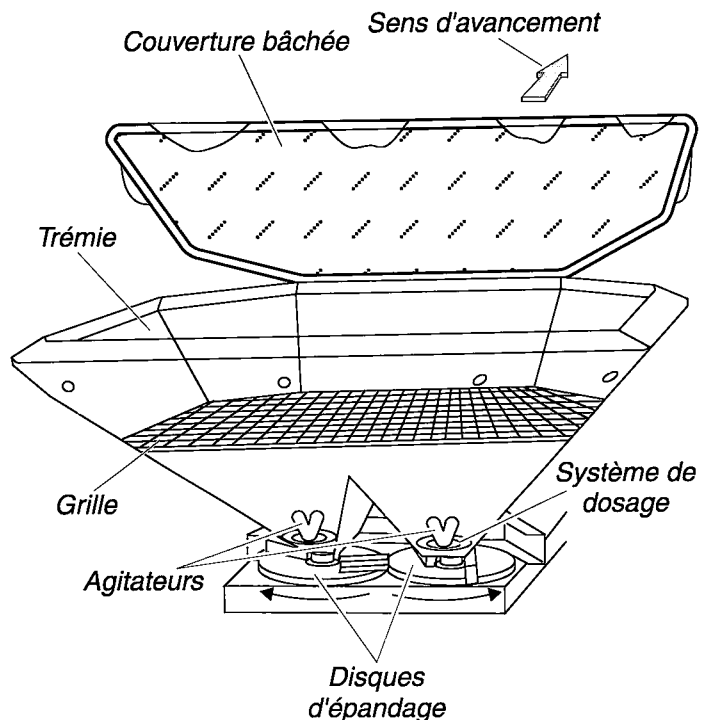


Fig. 13 - Vue descriptive d'un épandeur centrifuge porté

Selon les cas, ces capacités sont obtenues directement ou par l'adjonction de rehausses qui permettent, pour un modèle donné, d'adapter l'autonomie de l'appareil aux pratiques des exploitations.

Souvent, les trémies disposent d'une bâche (fig. 13) qui protège leur contenu en cas d'épandage par temps humide et évite, en dehors des périodes d'épandage, l'entrée d'éléments indésirables. Certaines trémies sont en matière plastique insensible à la corrosion chimique des engrais.

Au-dessus des organes de distribution, la trémie comprend souvent une grille qui sert de surface de retenue et de dislocation pour les éventuelles mottes qui peuvent résulter d'un début de **reprise en masse** de l'engrais.

L'épandage en grande largeur s'accompagne généralement d'un problème de **ravitaillement** facile à comprendre : pour une vitesse d'avancement et une dose/ha données, le débit est proportionnel à la largeur de travail ($D = Q.L.V/600$). Prenons l'exemple d'un épandeur avec une trémie de 1 500 litres, soit 2 100 kg d'engrais (valeur correspondant à un engrais ayant une masse volumique de 1,4), à 8 km/h et à 350 kg/ha :

– pour une largeur de travail de 12 mètres, le débit est de **56 kg/min** et le temps d'épandage d'une trémie est de **36 minutes**,

– pour une largeur de travail de 24 mètres, le débit est de **112 kg/min** et le temps d'épandage d'une trémie est de **18 minutes**,

– pour une largeur de travail de 36 mètres, le débit est de **168 kg/min** et le temps d'épandage d'une trémie est de **12 minutes** !

Ce problème de ravitaillement peut être résolu de trois manières :

– en utilisant un appareil ayant une capacité de trémie limitée (appareil porté) et disposer à proximité des parcelles d'une **benne de ravitaillement**. Les bennes de ravitaillement sont des bennes semi-portées à trémie en « V », munies au fond et à l'arrière d'un convoyeur de transfert, d'un attelage trois points et d'une prise de force pour l'animation d'un épandeur centrifuge. Selon les cas, l'équipement peut être utilisé soit en benne de ravitaillement (placée en bordure de champ), soit en benne por-

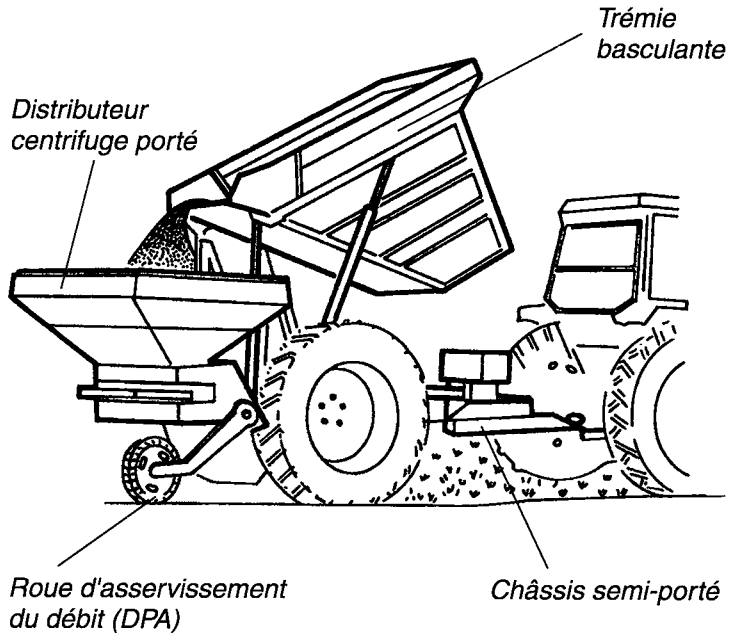


Fig. 14 - Distributeur porté à l'arrière d'une benne

teuse avec un épandeur centrifuge attelé à l'arrière (fig. 14), soit en épandeur de pulvérisants, si l'adaptation d'un équipement à rampes est prévu,

- en utilisant un épandeur de capacité de trémie limitée attelé à une benne porteuse,
- en utilisant un épandeur semi-porté ayant une grande capacité de trémie.

Bien entendu, le choix de l'une ou de l'autre de ces possibilités doit tenir compte des équipements existants et de la pertinence des investissements. Dans le cas de bennes porteuses ou d'épandeurs de grande capacité, il convient de prendre toutes les dispositions pour éviter la dégradation du sol : choix des pneumatiques, adéquation tonnage/roue et nature du sol...

• Le système d'alimentation et de dosage :

Dans le cas le plus simple et le plus fréquent, l'alimentation des organes d'épandage par projection s'effectue par gravité et le dosage par un système de volet ou de trappe réglable. La régularité d'écoulement est assurée par un **agitateur** (fig. 15) dont les modèles sont très variés afin d'éviter les brisures de granulés et les effets de voûte, surtout avec les produits pulvérulents. L'entraînement des agitateurs peut être permanent ou périodique (à couple constant) ; l'entraînement périodique à couple constant s'effectue grâce à un moteur hydraulique dont le couple d'entraînement est ajusté par un limiteur de pression réglable : lorsque la chambre d'alimentation est remplie d'engrais, la résistance à la rotation de l'agitateur est élevée et celui-ci est soumis à un couple avec mouvement lent ou nul (pour prévenir le broyage du produit), si la compression de l'engrais dans la chambre d'alimentation devient faible (écoulement interrompu ou insuffisant), l'agitateur est entraîné à sa vitesse nominale.

Pour les matériels de capacité importante pour lesquels la trémie ne peut pas être située au-dessus des organes d'épandage, l'alimentation est assurée par des tapis ou des chaînes (fig. 16).

Pour les distributeurs à rampes (se reporter dans ce chapitre à la partie « *les distributeurs pneumatiques* », fig. 52 et 53), le dosage peut être réalisé par des **rouleaux doseurs** tournant plus ou moins vite.

Selon les matériels et leur niveau de sophistication, le réglage du débit peut être obtenu soit :

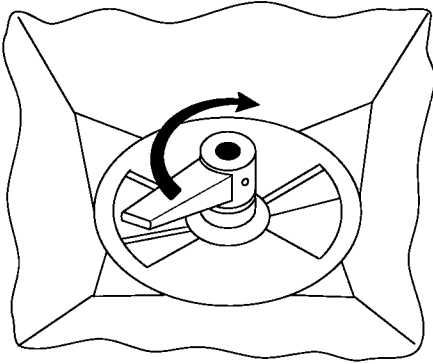
- par une **commande directe** (manuelle), opérateur au sol,
- par **commande à distance** depuis le poste de conduite (tringlerie ou commande flexible),
- par **télécommande** électrique (vérin électrique) ou hydraulique (par vérin simple ou double effet).

– par télécommande électrique ou hydraulique asservie à la vitesse d'avancement (DPA : débit proportionnel à la vitesse d'avancement).

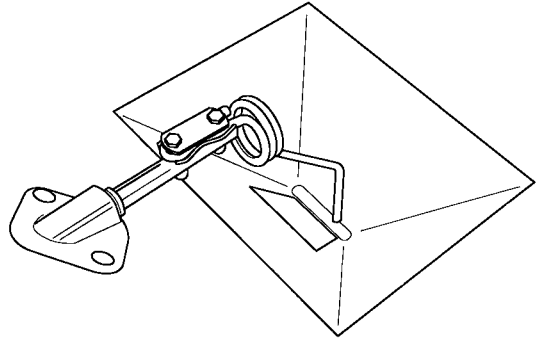
• Les modes d'épandage :

L'épandage des engrais minéraux solides peut être réalisé en **plain** ou en **localisation** :

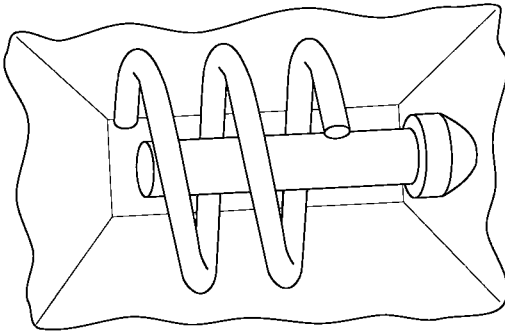
– **l'épandage en plain** (fig. 17) s'effectue le plus souvent par projection avec des **systèmes centrifuges à un ou à deux disques** (fig. 18), des systèmes à **bras oscillant** (fig. 18) ou, plus rarement, par des **rouleaux d'éjection** (fig. 18). L'épandage en plain peut aussi être réalisé en couverture avec des **appareils à rampes** (fig. 17) à **transport pneumatique** ou



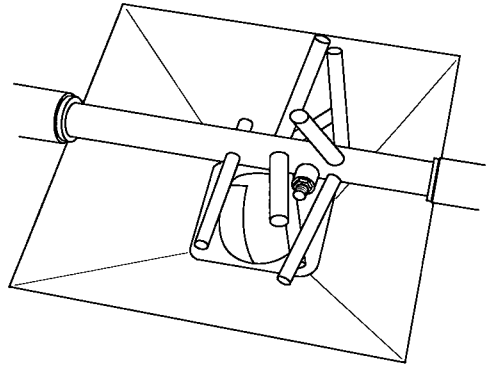
**Doigt rotatif
à axe vertical**



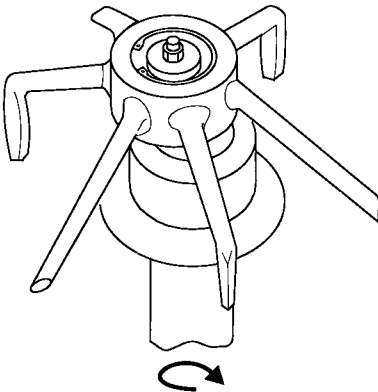
**Dent oscillante
à axe horizontal**



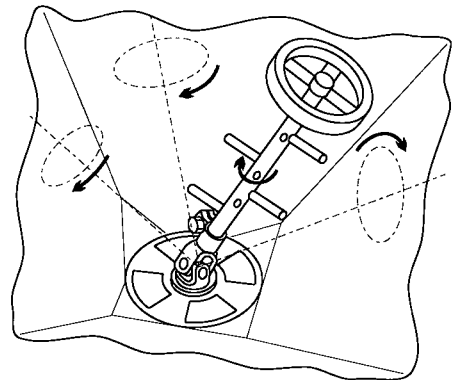
Vis à axe horizontal



**Doigts rotatifs
à axe horizontal**



**Doigt à rotation
libre par excentrique
et axe vertical**



**Rampe à doigts,
à axe vertical et cardan
pour pulvérulents**

Fig. 15 - Quelques principes d'agitateurs

mécanique (à vis) de l'engrais, ou des épandeurs en nappe à trémie transversale (fig. 17).

Les distributeurs par projection, portés ou semi-portés, ont des largeurs d'épandage variant de 9 à 24 mètres et plus (28, 30, 36 mètres...). Ils sont largement utilisés en raison de leur maniabilité et de leur coût nettement plus faible que les appareils à rampes. La technique de l'épandage par projection, **ou jet projeté**, s'applique surtout aux engrais solides granulés compactés ou perlés ; elle présente l'avantage de pouvoir épandre sur une largeur de travail indépendante de la largeur de l'appareil (la largeur de projection peut atteindre de dix à quinze fois la largeur de l'appareil). Dans tous les cas, c'est l'énergie cinétique initiale

communiquée aux particules d'engrais par l'organe de projection qui assure leur déplacement dans l'air jusqu'au sol. La distance de projection des particules d'engrais et, donc la largeur d'épandage dépendent très étroitement du principe d'éjection utilisé et des paramètres balistiques : **masse volumique, énergie cinétique, forme, coefficient de frottement** des particules... La bonne répartition de la quantité épandue dépend essentiellement de la maîtrise des paramètres de projection et de l'homogénéité des particules d'engrais : **distribution granulométrique, sphéricité...**

Sous réserve d'utiliser des engrais de qualité (se reporter au chapitre 2 « *les engrais minéraux solides* ») et de maîtriser les réglages des appareils en fonction de la nature des produits à épandre (se reporter au chapitre 4 « *les paramètres d'épandage, l'utilisation et les réglages...* »), la symétrie d'épandage est généralement satisfaisante et les passages s'effectuent avec un recouvrement important (fig. 19) pouvant tolérer des variations modérées de largeur de travail (courbes de répartition transversale, triangulaire ou trapézoïdale), sans incidence forte sur la dose d'engrais apportée au sol.

– **la localisation** (se reporter dans ce chapitre à la partie « *les équipements pour la fertilisation localisée* », fig. 58) est utilisée sur certaines cultures pérennes (viticulture, arboriculture...) et en cultures annuelles au moment du semis avec des localisateurs d'engrais (fig. 64) associés aux semoirs (maïs, betteraves...).

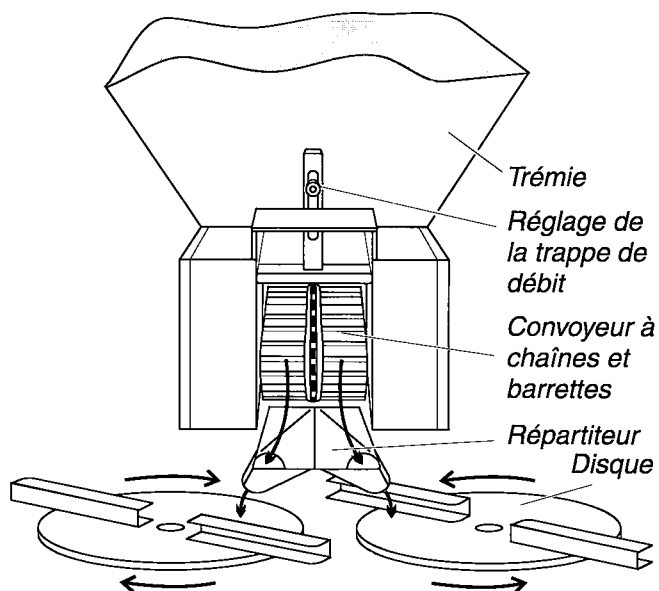
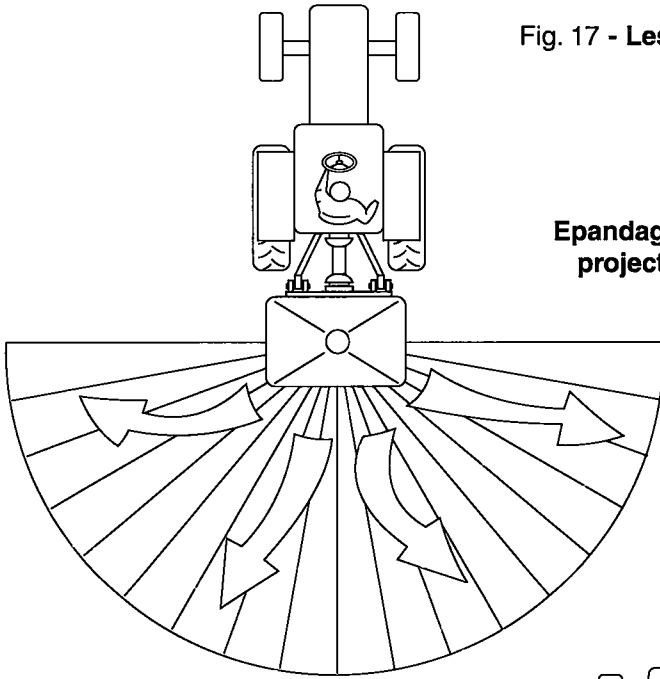
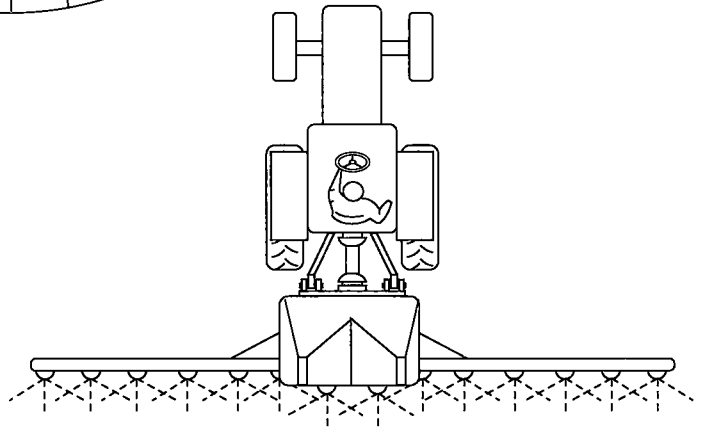


Fig. 16 - Principe d'un distributeur centrifuge à alimentation mécanique par chaînes

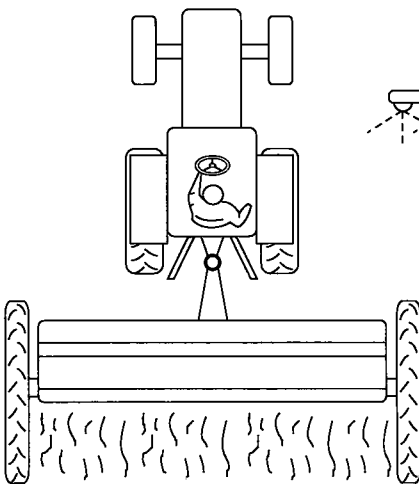
Fig. 17 - Les équipements d'épandage en plain



Epandage par projection



Epandage avec des appareils à rampes



Epandage en nappe avec un appareil à trémie transversale

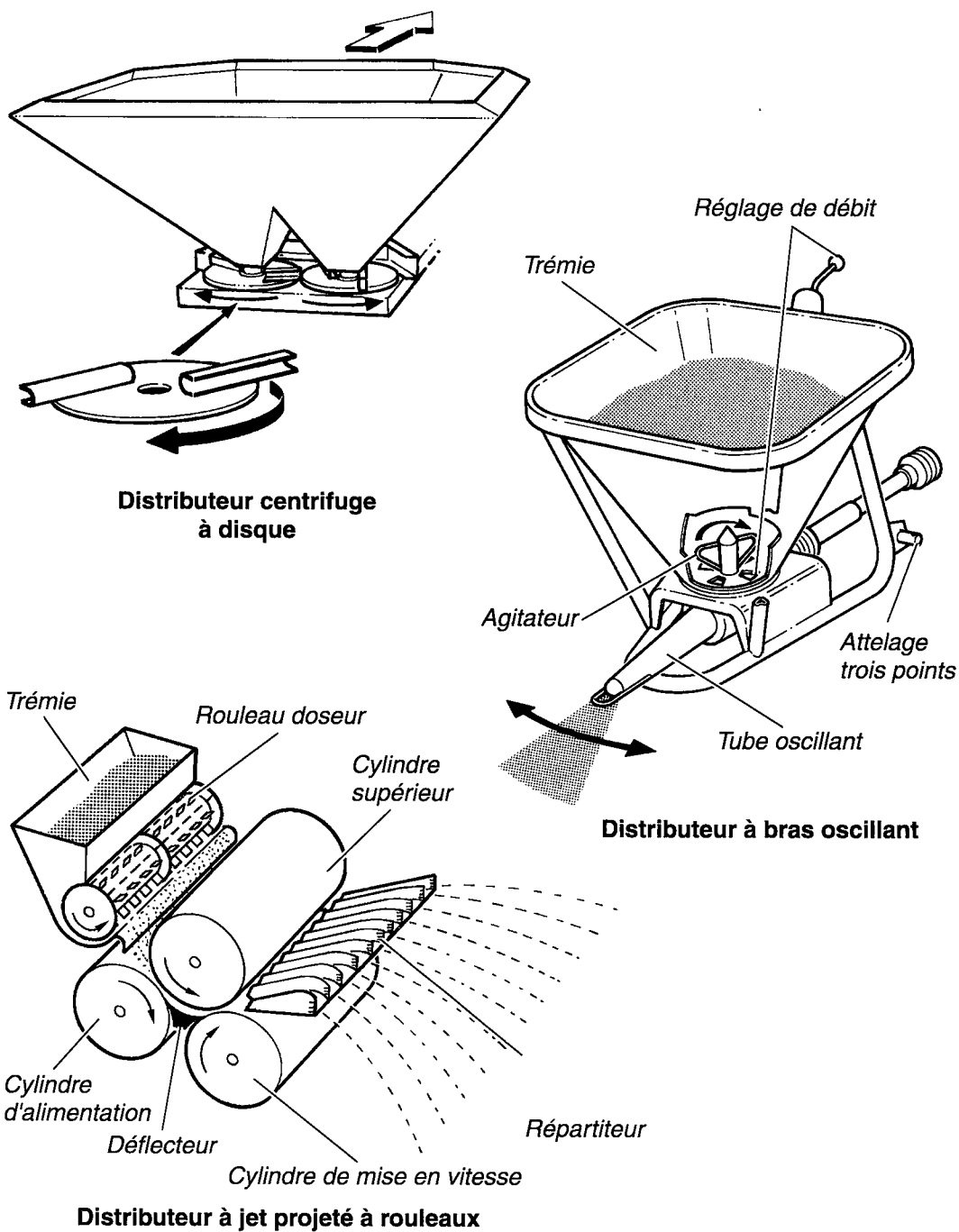


Fig. 18 - Distributeurs d'engrais par projection

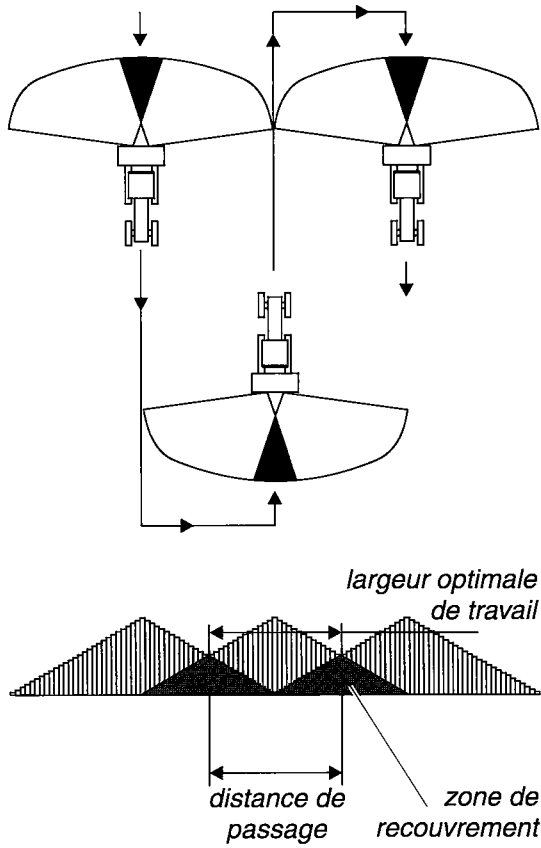


Fig. 19 - Principe du recouvrement des passages avec un épandeur par projection à courbe de répartition transversale triangulaire

LES DISTRIBUTEURS CENTRIFUGES À DISQUES

Très nombreux sur le marché, ces épandeurs par projection peuvent être monodisques (fig. 20) ou bidisques (fig. 21). Les modèles à disque unique ont une largeur d'épandage généralement inférieure à 20 mètres et sont le plus souvent portés à alimentation gravitaire.

Les matériels bidisques ont une largeur d'épandage pouvant atteindre 36 mètres ; ils sont soit portés, soit tractés (traînés ou semi-portés) ou automoteurs, à **alimentation gravitaire** ou à **alimentation mécanique** selon la position et la forme de la trémie.

Dans le cas d'une **alimentation gravitaire**, l'appareil comporte une trémie, un système de réglage de débit et un ou deux disques (fig. 13). Le ou les disques sont munis de **palettes** (fig. 22), appelées aussi **aubes** ou **palettes** plus ou moins radiales, en acier inoxydable, qui éjectent l'engrais derrière l'appareil (fig. 23) selon une aire en forme de demi-cercle ou de demi-voute plus ou moins régulières.



Fig. 20 - Vue d'un épandeur centrifuge monodisque (photo Sulky-Burel)

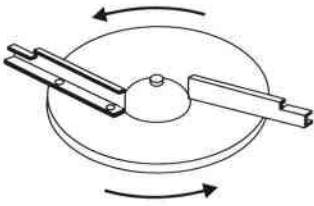


Fig. 21 - Vue d'un épandeur centrifuge bidisque (photo Kuhn)

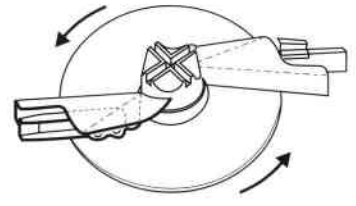
La forme des disques et surtout des aubes est très variable (fig. 22). Les aubes peuvent être montées sur des secteurs gradués et les disques sont souvent interchangeables en fonction de la largeur de travail souhaitée.

La plupart des appareils utilisent l'entraînement mécanique des disques par la prise de force du tracteur et une transmission à pignons (fig. 24), parfois des courroies sont utilisées. Dans les systèmes à deux disques, la transmission par pignons permet un **entraînement synchrone**. Il existe aussi des entraînements par **moteurs hydrauliques**.

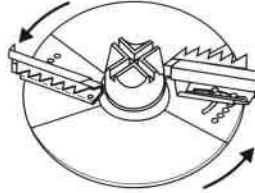
Selon les constructions, les disques sont soit à **rotation divergente** (fig. 25), soit à **rotation convergente** (fig. 26).



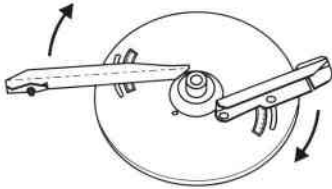
Disque à pales fixes étagées aux extrémités (Sulky)



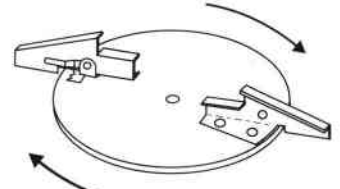
Disque à pales fixes à deux étages (Kuhn)



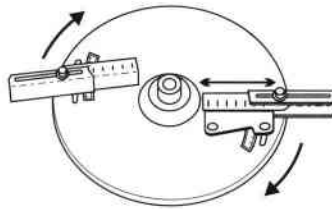
Disque à pales dentées réglables en inclinaison et longueur (Kuhn)



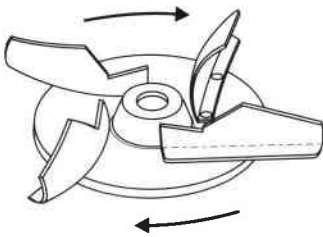
Disque à pales asymétriques réglables en inclinaison (Amazone)



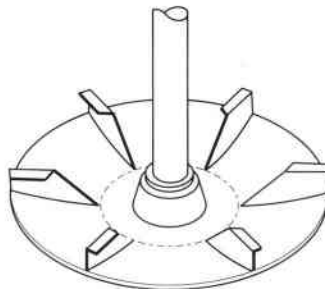
Disque à pales interchangeables (ici pales "bordures" Bogballe)



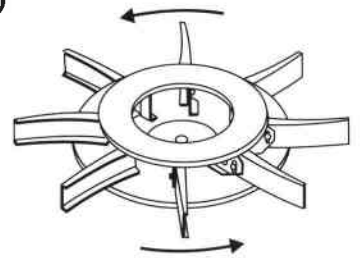
Disque à pales réglables en inclinaison et longueur pour les bordures (Amazone)



Disques à pales arrondies et cambrées (Lely)



Disque concave à pales radiales (Roger)



Rotor à pales cambrées amovibles (Vicon)

Fig. 22 - Différentes formes de disques et de pales d'épandage

Fig. 23 - Principe de l'épandage centrifuge

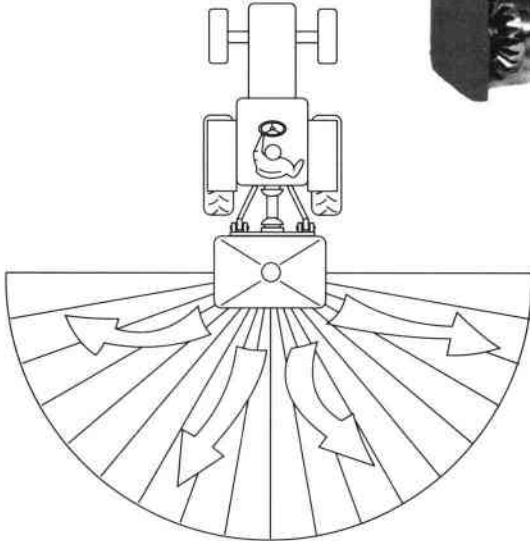


Fig. 24 - Vue en coupe d'une transmission mécanique d'un distributeur centrifuge à disques (document Kuhn)

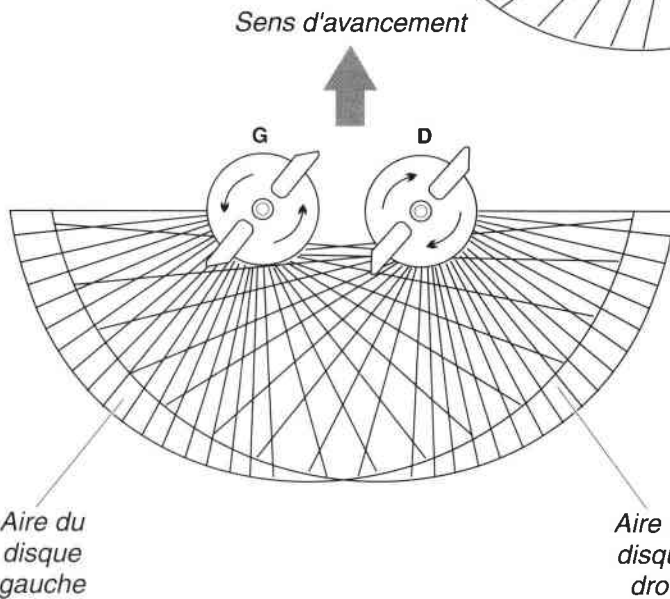


Fig. 25 - Principe d'épandage d'un appareil centrifuge à deux disques à rotation divergente

Fig. 26 - Principe d'épandage d'un appareil centrifuge à deux disques à rotation convergente (d'après document Bogballe)

Les disques sont le plus souvent placés sur un même plan horizontal. Dans le cas des **entraînements synchrones** (deux disques liés par une transmission sans glissement), afin de limiter les anomalies de trajectoires (collisions des grains d'engrais), le calage des disques est étudié de manière à ce que les jets des pales du disque gauche s'intercalent entre ceux du disque droit.

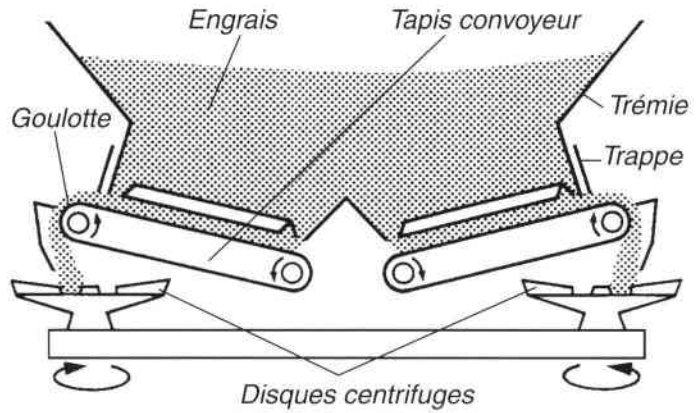


Fig. 27 - Principe d'un distributeur centrifuge à alimentation par tapis

L'alimentation mécanique

est surtout utilisée sur les distributeurs de grosse capacité pour lesquels la trémie ne peut se trouver au-dessus des disques. La figure 27 montre l'exemple d'un appareil à alimentation mécanique dans lequel l'engrais est conduit par un convoyeur longitudinal (fond de trémie mouvant) vers deux bandes transporteuses latérales en caoutchouc qui alimentent les disques. Le réglage du débit est, dans ce cas, obtenu par des trappes réglables situées en amont des bandes latérales, ou par modification de la vitesse du convoyeur longitudinal.



Fig. 28 - Étude de la projection des granulés d'engrais au laboratoire du Cemagref de Montoldre (photo Cemagref)

Les appareils à disques rotatifs peuvent être équipés d'un système de régulation de débit proportionnel à la vitesse d'avancement (DPA).

La mise au point des systèmes d'épandage à disques rotatifs est délicate et complexe (fig. 28) en raison des différences importantes de comportement des particules de produit selon la nature des engrais et le mode de projection. De nombreuses recherches ont conduit les constructeurs à définir des **profils de disques et de pales** très particuliers, ainsi que des **systèmes d'alimentation à point de chute réglable**. En plus de la recherche de nappes d'épandage les plus symétriques possible avec une bonne répartition transversale, des précautions particulières de conception doivent être prises pour limiter l'agressivité des systèmes et prévenir la désintégration des granulés (chocs

et éclatement des grains lors des écoulements et contre les pales). **Pour ces raisons, les épandeurs centrifuges à disques doivent être maintenus en parfait état et utilisés dans le respect stricte des instructions du constructeur.**

Selon les constructeurs et les modèles, les disques présentent des formes différentes, une longueur et un nombre de pales varié. Le point de chute de l'engrais sur le disque, qu'il soit fixe ou réglable, varie également selon les différents modèles avec toutefois une limite : plus l'engrais tombe loin du centre du disque, plus le risque de bris est important. En effet, pour une vitesse angulaire donnée, la vitesse circonférentielle croît proportionnellement avec le diamètre et l'énergie d'impact augmente avec le carré de cette vitesse !

• LES PARAMÈTRES DYNAMIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉPANDAGE CENTRIFUGE

L'épandage centrifuge à disques, très répandu et utilisé depuis plus de quarante ans, est un système mécanique très simple en apparence. Cela dit, pour obtenir une précision d'épandage correcte, prévenir les risques de surdosage et les erreurs d'utilisation, les constructeurs sont conduits à développer des dispositifs plus ou moins complexes capables de maîtriser la largeur d'épandage et la dose à appliquer en fonction des caractéristiques physiques des engrais. Rappelons-nous que la réussite d'une application d'engrais repose sur quatre éléments : **les caractéristiques du produit à épandre, l'aptitude du matériel utilisé, la cohérence des réglages et l'organisation du travail.** Pour mieux comprendre les différentes techniques décrites ci-après, observons de manière simplifiée deux paramètres dynamiques élémentaires qui caractérisent la projection des particules d'engrais : **la vitesse et la direction de projection.**

La vitesse de projection, pour une particule de forme et de masse volumique données, est le résultat d'une accélération des grains d'engrais depuis le milieu du disque où ils sont tombés à vitesse pratiquement nulle, jusqu'à la périphérie où ils sont projetés à une vitesse (V). Cette vitesse (V) donne à chaque particule l'énergie cinétique ($E = \frac{1}{2} m V^2$) nécessaire au parcours de sa trajectoire. En théorie, la vitesse de projection (V) résulte de la vitesse périphérique de l'extrémité des pales (18 à 30 m/s selon le diamètre et la vitesse des plateaux) et de la vitesse engendrée par la force centrifuge (fig. 29). Les essais de laboratoire montrent qu'en réalité la vitesse de projection est influencée par l'inclinaison des pales et par les frottements des grains d'engrais contre les parois métalliques des disques et des

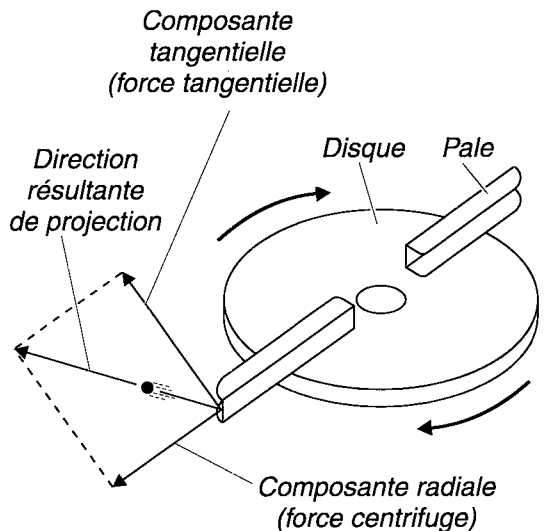


Fig. 29 - Les composantes directionnelles de la projection centrifuge pour un disque à pales radiales (disque côté gauche)

pales. Pour simplifier, retenons que la vitesse de projection (de 25 à 42 m/s, soit de 90 à 150 km/h) dépend de la masse volumique du produit, de la vitesse de rotation des disques, du diamètre de rotation des extrémités des pales, de l'inclinaison des pales et des frottements ; vitesse, diamètre et inclinaison sont des paramètres dépendant directement du matériel utilisé, tandis que masse volumique et frottements (coefficient de frottement, sphéricité...) dépendent de la nature du produit à épandre.

La direction de la projection, pour une vitesse et donc une énergie de projection donnée, a une conséquence directe sur la qualité de la nappe d'épandage et la largeur de travail. En effet, une nappe d'épandage est construite par l'ensemble des trajectoires des particules d'engrais ; chacune de ces particules étant projetée avec une vitesse et une direction qui lui sont propres et qui dépendent de son parcours initial contre le disque (fig. 30) et la pale qui l'a projetée (transfert). La bonne répartition transversale est le résultat d'une action mécanique judicieuse du mécanisme de répartition (disque, pales, déflecteurs...).

Pour un point de chute fixe de l'engrais sur le disque et une vitesse de rotation donnée, la direction des grains d'engrais, par rapport à l'avancement de l'épandeur, dépend de leur **temps de transfert** (fig. 31) contre les pales et de leur **direction résultante** (fig. 29 et 30) lorsqu'ils quittent les pales.

Le temps de transfert dépend de la facilité d'écoule-

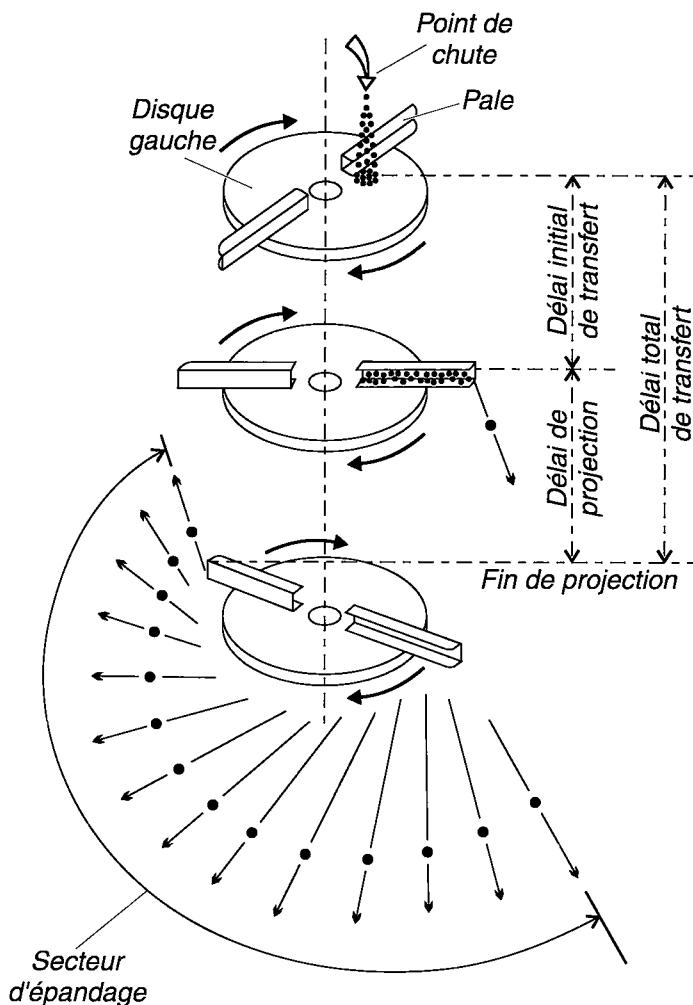


Fig. 30 - Principe d'action d'une pale d'épandeur centrifuge (disque côté gauche)

ment de l'engrais contre les pales, de la forme des pales et de leur inclinaison. Plus le temps de transfert est long, plus la trajectoire d'épandage tend à s'orienter vers le côté de l'épandeur. La direction résultante, comme son nom l'indique, résulte des deux actions qui la génèrent (fig. 29, 30 et 31) : **force centrifuge** (orientation radiale) et **force tangentielle**.

Sans vouloir se livrer à une étude complexe qui dépasserait le cadre de cet ouvrage, il est intéressant d'observer l'influence des principaux paramètres mécaniques : **vitesse des disques, longueur des pales, inclinaison des pales, forme des pales et point de chute sur le disque**, en les traitant séparément par souci de clarté car, en réalité, ils se combinent souvent entre eux. En pratique, seuls les essais en laboratoires peuvent permettre de vérifier, d'apprécier et de quantifier l'influence de ces paramètres.

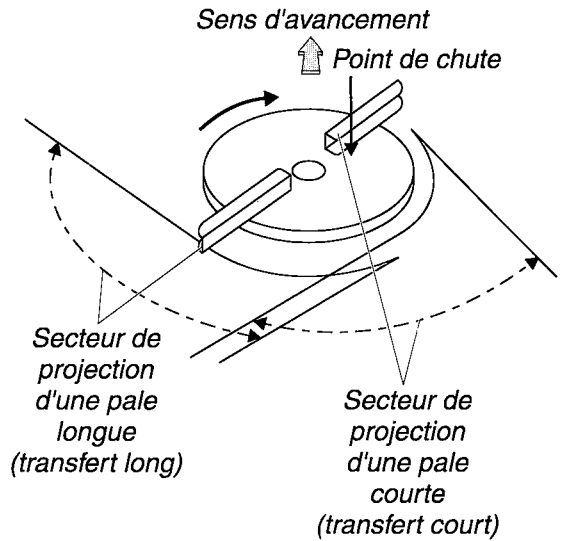


Fig. 31 - L'influence de la longueur des pales sur la direction de projection (disque côté gauche)

– **l'influence de la vitesse et du diamètre des disques :**

Dans les limites admises par le constructeur, la vitesse de rotation des disques influe directement sur l'énergie et donc la distance de projection (largeur d'épandage) : plus la vitesse de rotation des disques est élevée, plus l'énergie des particules est grande et plus la portée de projection est longue. L'influence du diamètre agit dans le même sens.

– **l'influence de la longueur des pales disque (fig. 31) :**

La longueur des pales peut influencer l'épandage en modifiant l'énergie et la direction de projection. A vitesse de rotation et point de chute constants, plus les pales sont longues, plus la vitesse circonférentielle augmente (énergie et distance de projection sont accrues), plus le temps de transfert est long (direction de projection s'orientant latéralement).

– **l'influence de l'inclinaison des pales :**

L'inclinaison des pales peut être observée dans le plan vertical et dans le plan horizontal. **L'inclinaison verticale** (fig. 32) est définie par la forme du disque qui peut être plat ou concave ; plus le disque est concave, plus l'inclinaison verticale des pales est accentuée et plus la nappe d'épandage est relevée sous l'effet d'une trajectoire initiale légèrement ascendante. Dans certains cas, les pales sont munies d'une aile supérieure inclinée vers le bas pour, au contraire, abaisser la nappe d'épandage pour épandre en bordure.

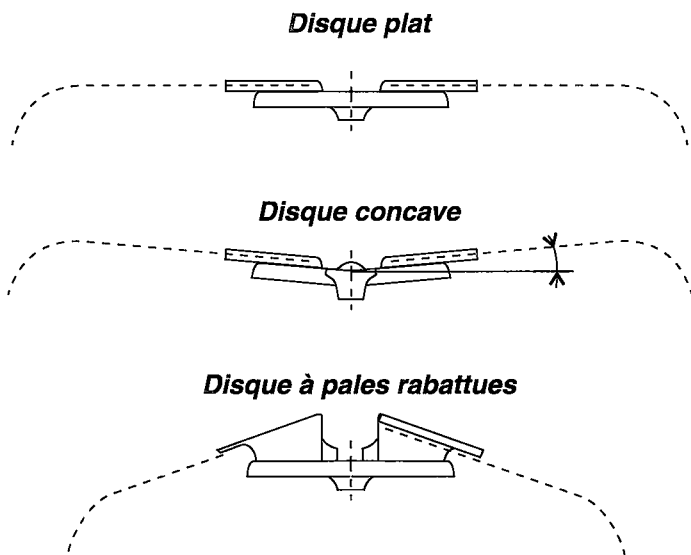


Fig. 32 - L'influence de l'inclinaison verticale des pales sur la largeur de projection

L'orientation horizontale des pales (fig. 33) a une influence sur la vitesse (et donc l'énergie de projection) ainsi que sur la direction de projection. Pour une configuration donnée, plus on incline les pales vers l'arrière du sens de rotation, plus on tend à modérer l'accélération des particules contre les pales (vitesse plus faible), plus le secteur d'épandage de chaque disque tend à se déplacer vers l'arrière et plus la largeur d'épandage tend à diminuer. Il convient toutefois de ne pas généraliser cette indication car, en réalité, les réglages de largeur résultent souvent d'actions mécaniques combinées.

– l'influence de la forme des pales :

D'une manière générale, la forme des pales a des répercussions complexes sur les paramètres d'épandage selon les caractéristiques des engrais et le débit. Pour simplifier, disons que la forme des pales a surtout une influence sur la direction de projection. Dans certains cas, la forme des pales peut être modifiée, c'est le cas de la figure 39 où les extrémités des pales radiales sont pourvues de terminaisons pivotantes qui permettent de relever le niveau de la nappe d'épandage, par exemple lors des apports d'azote à dose fractionnée sur blé à l'épiaison. C'est aussi le cas de la figure 42 qui montre un

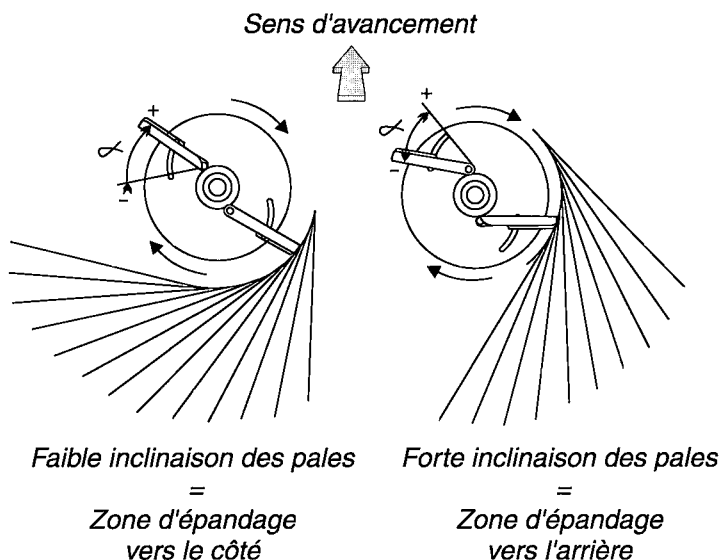


Fig. 33 - L'influence de l'inclinaison horizontale des pales sur la direction de projection (disque côté gauche)

profil de pale à aile supérieure inclinée vers le bas pour adapter la largeur d'épandage pour les bordures des parcelles.

– l'influence du débit :

Il s'agit d'un phénomène relativement complexe à décrire et surtout à quantifier : plus le débit d'épandage est élevé, plus la masse d'engrais prise par chaque pale est grande ; cette évidence conduit à admettre qu'une « première couche » d'engrais frotte directement contre les parois métalliques des pales tandis que d'autres couches frottent les unes sur les autres ; il s'ensuit un écoulement différencié de la masse d'engrais (par couches) et une répercussion sur la projection. En fonction de la mobilité des particules d'engrais, ce phénomène d'écoulement différencié peut se traduire par un temps de transfert plus long contre les pales, une augmentation de l'angle du secteur d'épandage et un accroissement de la largeur d'épandage d'autant plus élevés que le débit est grand (déplacement du secteur d'épandage vers le côté).

– l'influence du point de chute sur le disque :

La localisation du point de chute sur le disque ayant des conséquences importantes sur la nappe d'épandage, un certain nombre de constructeurs ont mis au point des dispositifs capables de modifier le point de chute sur le disque.

Il convient de distinguer la **localisation radiale** (fig. 34 et 36) qui s'effectue en différents points du rayon des disques et la **localisation angulaire** (fig. 35) qui s'opère en déplaçant le point de chute sur un même rayon du disque.

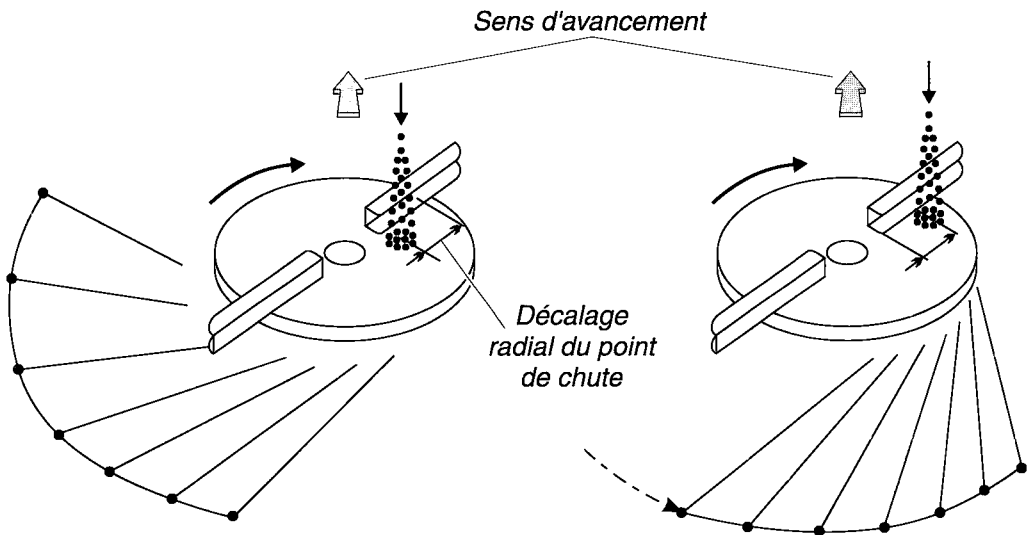


Fig. 34 - L'influence de la localisation radiale du point de chute sur la direction de projection (disque côté gauche)

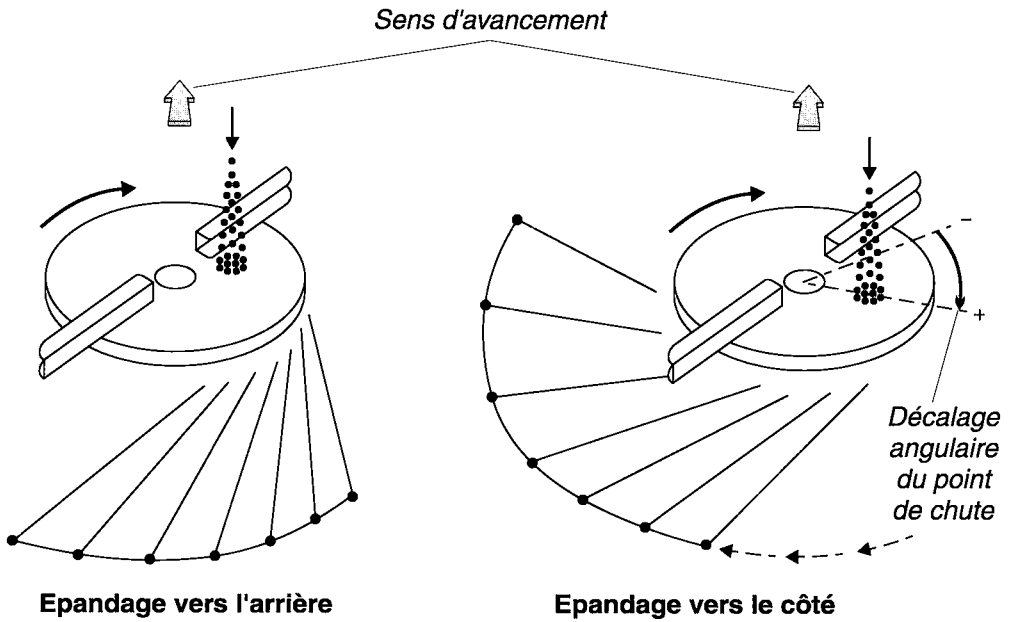


Fig. 35 - L'influence de la localisation angulaire du point de chute sur la direction de projection (disque côté gauche)

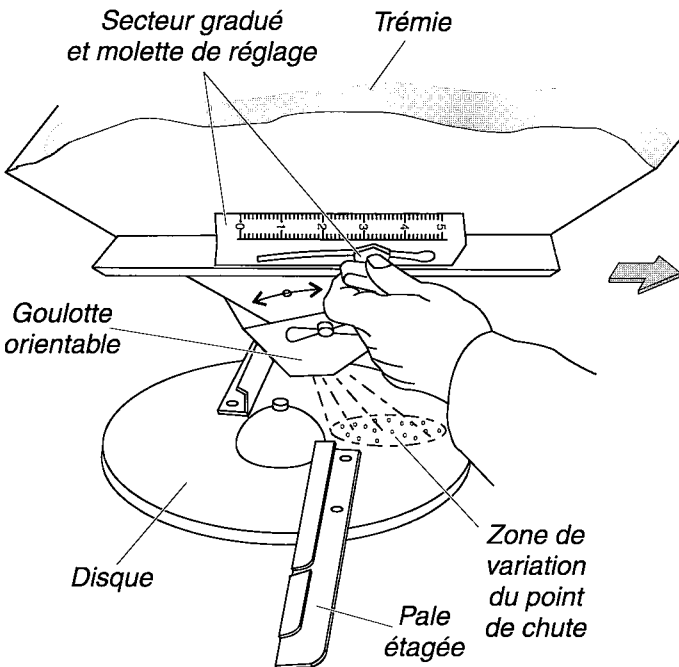


Fig. 36 - Système de réglage de la largeur de travail par variation du point de chute sur le disque (d'après document Sulky)

La localisation radiale agit sur le temps de transfert : plus la chute est proche du centre du disque, plus le temps de transfert est long et plus le secteur d'épandage tend à se déplacer latéralement en augmentant la largeur d'épandage.

La localisation angulaire agit sur le positionnement de la nappe de chaque disque par rapport à l'épandeur : plus le point de chute de l'engrais est avancé par rapport au sens de rotation des pales, plus le secteur d'épandage correspondant se décale latéralement, dans le sens de la rotation du disque, et plus la largeur d'épandage tend à croître.

• **Les réglages du débit et de la largeur d'épandage des appareils centrifuges à disques :**

Les nombreux paramètres dynamiques et mécaniques de l'épandage centrifuge et leurs influences propres ouvrent de nombreuses combinaisons aux constructeurs pour maîtriser les deux réglages de base : réglage du débit et largeur d'épandage.

– **le réglage du débit :**

Rappelons que le débit (**D**) est la grandeur de référence qui permet de respecter la dose (**Q**) à appliquer par hectare, selon la vitesse d'avancement (**V**) et la largeur d'épandage (**L**) de telle manière que $D = Q.L.V/600$. Le réglage du débit est assuré par des vannes ou des trappes dont la section est étudiée de manière à optimiser le point de chute de l'engrais sur le disque en fonction du débit d'écoulement. Sur les appareils bidisques, les commandes de débit sont soit couplées entre elles (synchronisation parfaite), soit à réglage individuel.

– **le réglage de la largeur d'épandage :**

Avec les appareils centrifuges, le réglage et le respect d'une largeur d'épandage (de 10 à 24 m, 28 m, voire jusqu'à 36 m) ont une importance très particulière en raison du principe même d'épandage et des actions très variées pouvant être mises en œuvre séparément ou en combinaisons :

- **réglage de la hauteur par rapport au sol,**
- **réglage de l'inclinaison avant/arrière des appareils portés,**
- **changement de disque,**
- **changement de pales,**
- **réglage du calage des pales,**
- **réglage de la longueur des pales,**
- **réglage du point de chute de l'engrais sur le disque,**
- **réglage de la vitesse de rotation des disques.**

Pour l'utilisateur, ces combinaisons permettent d'atteindre plus ou moins facilement trois objectifs :

- **épandre sur une largeur différente** un produit donné selon un plan de jalonnage imposé par la largeur d'un semoir ou par une distance de passage particulière imposée par la largeur entre-rangs d'une culture,
- **épandre sur une largeur constante** des produits ayant des caractéristiques physiques différentes,

– **épandre avec des débits différents**, sur une largeur constante, un produit ayant des caractéristiques connues.

Quel que soit le principe utilisé, la modification d'une valeur de réglage induit des variations sur un ou plusieurs autres paramètres, le résultat final réel ne peut être connu avec suffisamment de précision qu'en réalisant des **contrôles de débit et de largeur** (se reporter aussi au chapitre 4 « *les paramètres d'épandage, l'utilisation et les réglages des distributeurs d'engrais minéraux solides* ») ; en conséquence, **tout appareil d'épandage doit être accompagné d'une notice** précisant les réglages adaptés aux objectifs d'application et la méthodologie de contrôle du débit et de la largeur d'épandage.

Compte tenu de la multiplicité des points de réglage et de leurs interactions, il est difficile d'établir une classification claire et exhaustive des distributeurs centrifuges à disques. Cependant, pour concrétiser l'analyse des principales combinaisons proposées par les constructeurs, les paragraphes suivants décrivent cinq configurations apportant des solutions différentes pour la maîtrise de la largeur d'épandage : **les systèmes d'épandage à réglage du point de chute, les systèmes d'épandage à réglage des pales, les systèmes d'épandage à changement de pales, les systèmes d'épandage à boîte de vitesses et les systèmes d'épandage à vitesse de rotation variable.**

• LES SYSTÈMES D'ÉPANDAGE À RÉGLAGE DU POINT DE CHUTE

La figure 36 montre l'exemple du système Sulky qui repose principalement sur la possibilité de régler le point de chute de l'engrais, indépendamment de la position des trappes de réglage du débit et sans modifier la position des disques ou des pales à rotation divergente. L'écoulement d'engrais contrôlé par la trappe de débit est dirigé sur le disque par l'intermédiaire d'une **goulotte orientable** dont la position précise est repérée par un secteur gradué. Pour chaque modèle de distributeur, le constructeur a réalisé des essais pour l'étalonnage initial de la position de chaque goulotte pour les différentes largeurs de travail et en fonction du débit et de la nature de l'engrais utilisé. En se référant à la notice de l'appareil, l'utilisateur règle d'abord le débit, puis il recherche dans les **tables de références** la position des goulottes à adopter pour respecter la largeur de travail voulue. Prenons un exemple : pour épandre à 8 km/h un engrais complexe 17-17-17 de la marque X à 425 kg/ha, sur 24 mètres de large, les tables du constructeur indiquent un réglage du débit sur la graduation 3,8 et un réglage des goulottes sur la graduation 3,5 ; la notice indique ensuite la méthodologie de contrôle de ces réglages et du recouvrement obtenu.

Ce dispositif permet, pour les matériels équipés de commandes à distance, de commander la variation de largeur de travail en cours d'épandage et de manière continue.

Le côté arrière de chaque goulotte de réglage du point de chute est munie d'une languette mobile réglable qui permet, lorsqu'elle est abaissée, de réduire la largeur de projection de manière unilatérale (ou bilatérale lorsque les deux côtés sont sollicités) pour la fertilisation des bordures des parcelles.

Chaque disque dispose de deux pales échanquées asymétriques (une courte et une longue) étudiées pour permettre une émission « sectorielle » des projections, favorable à une répartition correcte.

Un autre exemple de modification du point de chute est utilisé dans le système « *Rotaflow RSL* » de Greenland qui utilise des disques d'épandage de grand diamètre à pales galbées interchangeables (fig. 37), selon le type d'engrais et la largeur d'épandage, les pales peuvent être à profil horizontal ou à profil incliné. Le système permet une gestion du débit et de la largeur d'épandage en combinant la **position angulaire du point de sortie** de l'engrais sur les disques, la **vitesse des disques** et le **type de pales**. La base de la trémie est constituée par une **goulotte coaxiale** munie d'un fond à trois orifices et pouvant pivoter au-dessus d'un plateau fixe. Le réglage du dosage est obtenu par la commande d'ouverture-fermeture de l'épandeur qui agit sur la position angulaire de la goulotte par rapport aux orifices du plateau fixe ; la consigne de débit est réglée par un manchon fileté gradué.

L'engrais dosé par les orifices tombe sur le centre du disque. Son écoulement vers les pales est contrôlé par une bague échancrée dont l'orientation angulaire, commandée par un levier et un secteur gradué, permet le réglage angulaire du point de prise de l'engrais par les pales.

La transmission mécanique des disques dispose d'une **boîte de vitesses** à trois jeux de pignons interchangeables.

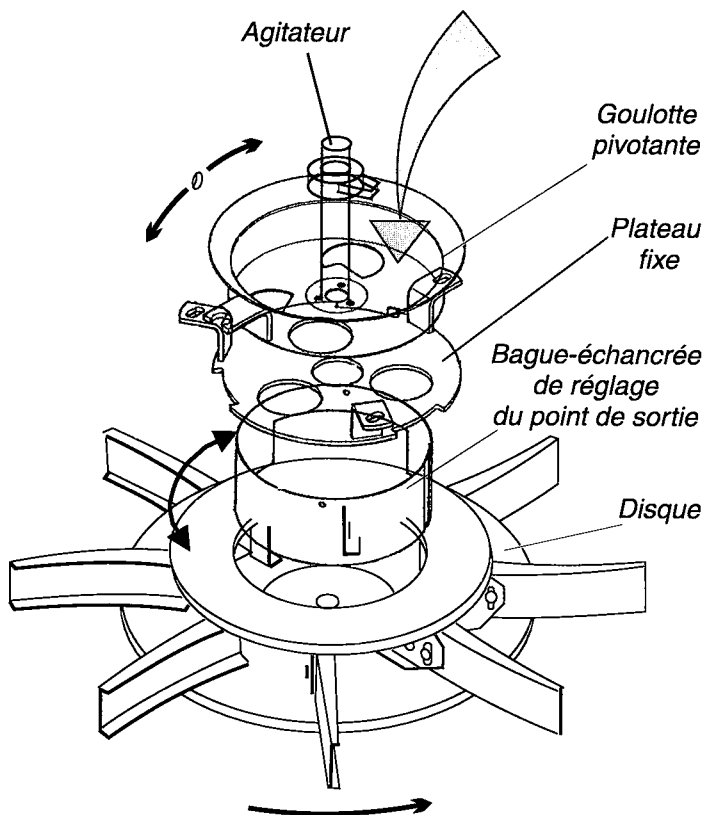


Fig. 37 - Principe du mécanisme de distribution Greenland Rotaflow
(d'après document Greenland Vicon)

Pour épandre tel type d'engrais de la marque x, sur une largeur de 18 mètres à raison de 421 kg/ha et à 8 km/h, les tableaux de réglage du constructeur indiquent, par exemple, une ouverture de débit à la graduation 54 (tige filetée graduée), un réglage du point de sortie de l'engrais à la position A et un régime de rotation des disques de 750 tr/min (pignons de 17 et de 19 dents), avec des pales à profil horizontal.

• LES SYSTÈMES D'ÉPANDAGE À RÉGLAGE DES PALES

Parmi les différents constructeurs qui proposent cette configuration, prenons l'exemple du système Kuhn « MDS » et du système Amazone « VarioDisc » :

Le système Kuhn « MDS » (fig. 38) est proposé sur des matériels portés de 12 à 28 mètres de largeur de travail. Il est constitué d'un fond de trémie à deux vanes de débit débouchant chacune dans un canal vertical qui guide l'écoulement d'engrais sur chacun des deux disques. Les disques concaves sont rapidement interchangeables et portent des **pales positionnables**, pas à pas, en longueur et en inclinaison horizontale grâce à un verrouillage rapide à glissière et à pions de centrage. Les ailes supérieures des pales sont dentelées pour faciliter la réception de l'engrais et réduire l'effet de cisaillement des bords métalliques sur les grains d'engrais. La section des orifices d'écoulement et les vanes de débit ont des formes particulières pour optimiser le point de chute de l'engrais sur les disques et corriger l'influence du débit sur la largeur de travail. Pour les différents produits et doses d'application, la notice d'instructions indique les réglages de débit, le type de disque et les réglages des pales en fonction de la largeur d'épandage souhaitée.

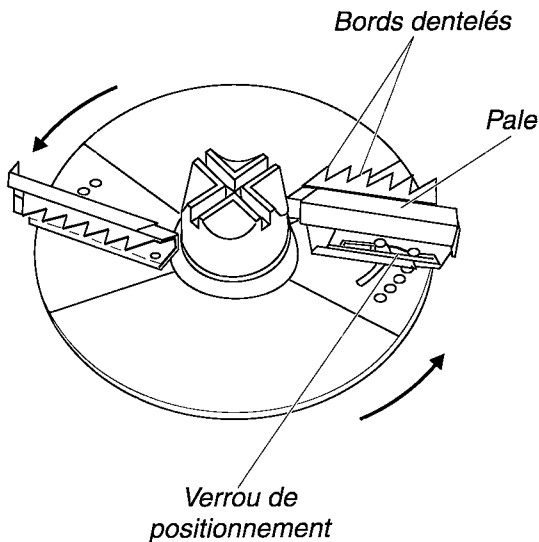


Fig. 38 - Disque à pales réglables Kuhn MDS

Le réglage rapide des pales permet une adaptation facile du mode d'épandage en fonction du type de travail : épandage à dose normale sur toute la largeur ou le long des bordures, épandage tardif d'une dose d'appoint sur toute la largeur et le long des bordures.

Le système d'épandage Amazone « VarioDisc » (fig. 39) permet de maîtriser la largeur d'épandage sans modifier la hauteur et l'assiette de l'appareil, sans modifier le point de chute sur les disques et sans modifier leur vitesse de rotation. Le réglage est obtenu en utilisant des jeux de disques différents pour chaque tranche de largeur de 8 mètres par exemple (de 10 à 18, de 20 à 28, de 30 à 36 mètres...) ; pour chaque tranche de largeur, il est possible, avant le travail, d'ajuster la largeur de projection selon les différents produits en faisant varier en continu **l'orientation angulaire des pales**. Les disques sont à rotation divergente.

Chaque disque dispose de deux **pales asymétriques** (une courte et une longue) à fonction « **sectorielle** » (fig . 39) : le rôle de la **pale courte** étant d'épandre dans le secteur arrière médian et celui de la **pale longue**, d'épandre dans le secteur latéral. Le montage des pales sur axe et secteur gradué permet de régler leur inclinaison selon une **table de réglage** fournie par le constructeur dans la notice d'utilisation. Prenons un exemple : avec des disques de la série 20-28 mètres, pour épandre de l'ammonitrate 33,5% granulé fabriqué par la société X, la notice indique qu'il faut caler la pale courte à 71° et la pale longue à 88° ; plus les pales sont inclinées vers l'avant (dans le sens de la rotation), plus l'accélération des particules contre les pales est grande, plus la direction résultante d'éjection est tangentielle au disque, plus le secteur d'épandage de chaque disque tend à se déplacer vers le côté et plus la largeur d'épandage tend à croître.

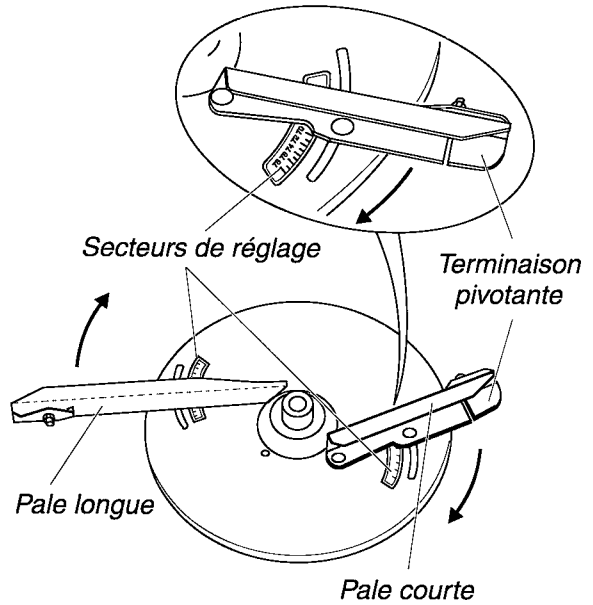


Fig. 39 - **Disque à pales inclinables et terminaisons réglables Amazone VarioDisc** (d'après document Amazone)

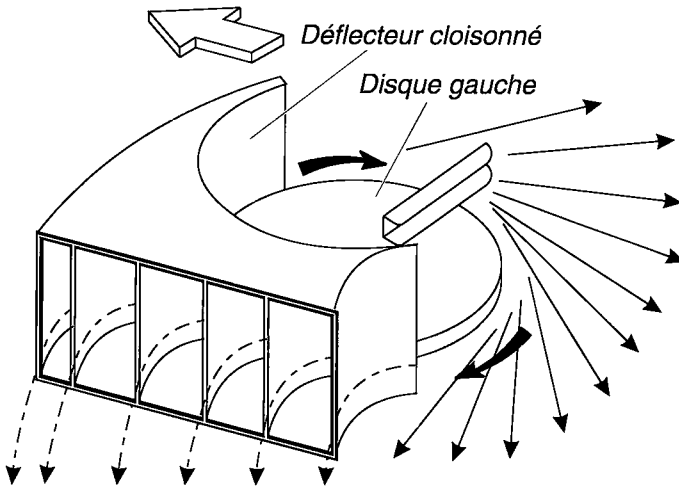


Fig. 40 - **Principe d'action d'un déflecteur latéral** (disque côté gauche)

Les extrémités des pales sont pourvues de **terminaisons pivotantes** qui permettent de relever le niveau de la nappe d'épandage, par exemple lors des apports d'azote à dose fractionnée à l'épiaison sur céréales.

Des **déflecteurs latéraux** (fig. 40) peuvent être placés de chaque côté de l'appareil pour obtenir une délimitation nette de la nappe d'épandage et éviter les trajectoires indésirables de granulés en dehors de la zone d'épandage ou sur le tracteur.

• LES SYSTÈMES D'ÉPANDAGE À CHANGEMENT DE PALES

Parmi les multiples réalisations adoptant le principe des pales interchangeables, examinons le concept appliqué par la société Bogballe. Les spécificités de ce concept sont : **rotation convergente pour les appareils bidisques, disques à pales interchangeables et réglage de l'inclinaison longitudinale du distributeur (porté) par rapport au tracteur, correction angulaire du point de chute en fonction du débit, sélecteur petit débit...**

La rotation convergente des disques présente la particularité d'un recouvrement et d'une superposition presque complets des deux secteurs d'épandage droit et gauche avec un diagramme de répartition transversale en forme de triangle.

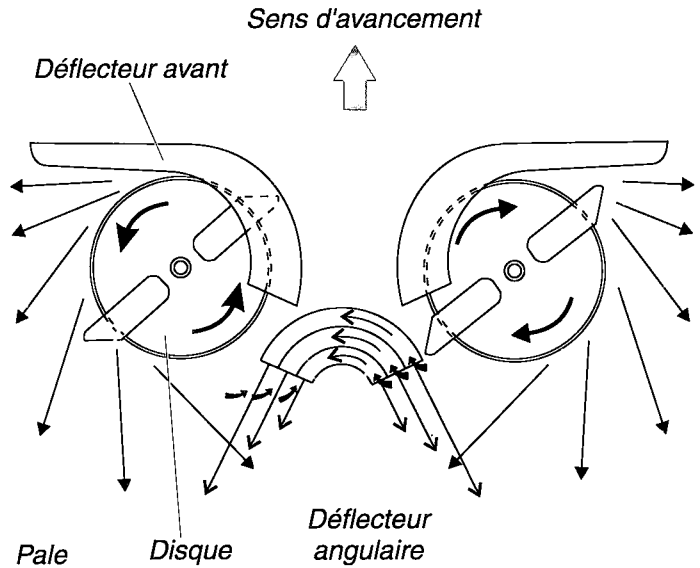


Fig. 41 - Déflecteur angulaire central d'un épandeur à deux disques à rotation convergente (d'après document Bogballe)

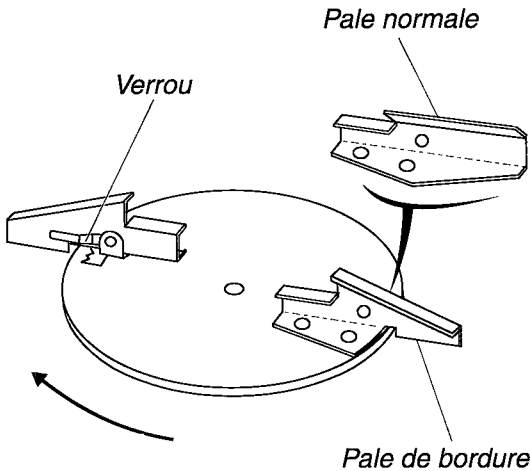


Fig. 42 - Disque à pales orientables interchangeables (d'après document Bogballe)

A l'intervalle des deux disques, un **déflecteur angulaire** (fig. 41) récupère le flux résiduel de grains d'engrais en fin de secteur d'épandage de chaque disque pour leur redonner une trajectoire correcte dans la nappe d'épandage.

Les disques à pales interchangeables (fig. 42) permettent la modification des largeurs d'épandage (12-18 m, 20-24 m, 28-36 m) en adoptant des jeux de pales de longueur et de forme différentes, grâce à un dispositif de verrouillage rapide à crans. Afin d'adapter précisément la largeur de travail à la nature des produits à épandre, les appareils sont équipés d'un **indicateur d'inclinaison** (fig. 43) pour régler l'assiette du distributeur par rapport au tracteur, selon les indications de la notice d'instructions du cons-

tracteur. Par exemple, avec un appareil donné, pour épandre de l'ammonitrate granulé 33,5 % de la marque X, sur une largeur de 24 mètres à raison de 200 kg/ha et à 8 km/h, les tableaux de réglage du constructeur indiquent une ouverture de débit à la graduation 3,5, l'utilisation du jeu de pales 20-24 mètres avec une inclinaison de l'appareil réglée à 3° vers l'avant, pour une hauteur de 73 cm par rapport au sol ou au-dessus du plan végétal.

La correction angulaire du point de chute en fonction du débit permet de compenser l'influence, décrite précédemment, du débit sur la largeur de travail. La correction est réalisée au niveau de la trappe de dosage par deux volets à ouverture différenciée (fig. 44) : lorsque l'on actionne le réglage du débit, le volet (b) s'ouvre deux fois plus vite que le volet (a), de telle manière que l'augmentation de la section de la lumière d'écoulement de l'engrais s'accompagne d'un décalage angulaire en avance du sens de rotation du disque correspondant.

Le sélecteur petit débit permet de conserver l'amplitude de réglage de la trappe d'écoulement lors des épandages à faible dose de produits particuliers : microgranulés, granulés anti-limaces, graines de semences... Situé entre le fond de trémie et les volets de réglages du débit (fig. 44), le sélecteur est constitué d'un plateau intermédiaire à trois positions : position fermée, position petit débit avec une lumière de largeur réduite et position normale avec une lumière de grande largeur.

• LES SYSTÈMES D'ÉPANDAGE À BOÎTE DE VITESSES

Parmi les différents matériels équipés de boîte de vitesses, examinons le système d'épandage Lely appelé « *Centerliner* » : il s'agit d'un matériel à **disques à rotation convergente** ; pour un appareil doubles disques, cette disposition produit un recouvrement et une superposition pratiquement totale des deux secteurs d'épandage droit et gauche. L'agitation est assurée par un fond de trémie tournant et le réglage du débit s'effectue par un système de trappe dont la position d'ouverture est limitée par un système de broche à logements multiples repérés (fig. 45). Les disques portent quatre pales de forme semi-ouverte, à fond arrondi et galbé. Après réglage du débit, la largeur de travail est réglée en modifiant la vitesse des disques à l'aide d'une **boîte de vitesses à pignons interchangeables** (fig. 46), selon les instructions de la notice d'utilisation. Pour les largeurs importantes, il est possible de modifier le niveau de l'appareil par rapport au tracteur (inclinaison vers l'avant) d'une valeur repérée par un indicateur d'inclinaison. Pour la **fertilisation des bordures** de parcelles, le constructeur a prévu un dispositif d'inclinaison droite ou gauche par un vérin hydraulique et une broche (fig. 47).

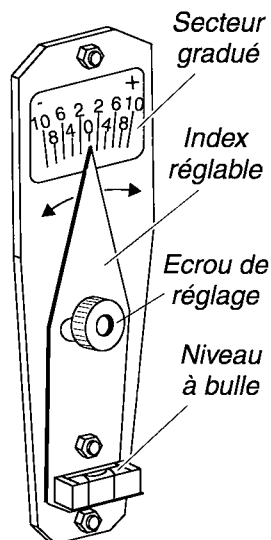


Fig. 43 - Indicateur d'inclinaison longitudinale et niveau à bulle (d'après document Bogballe)

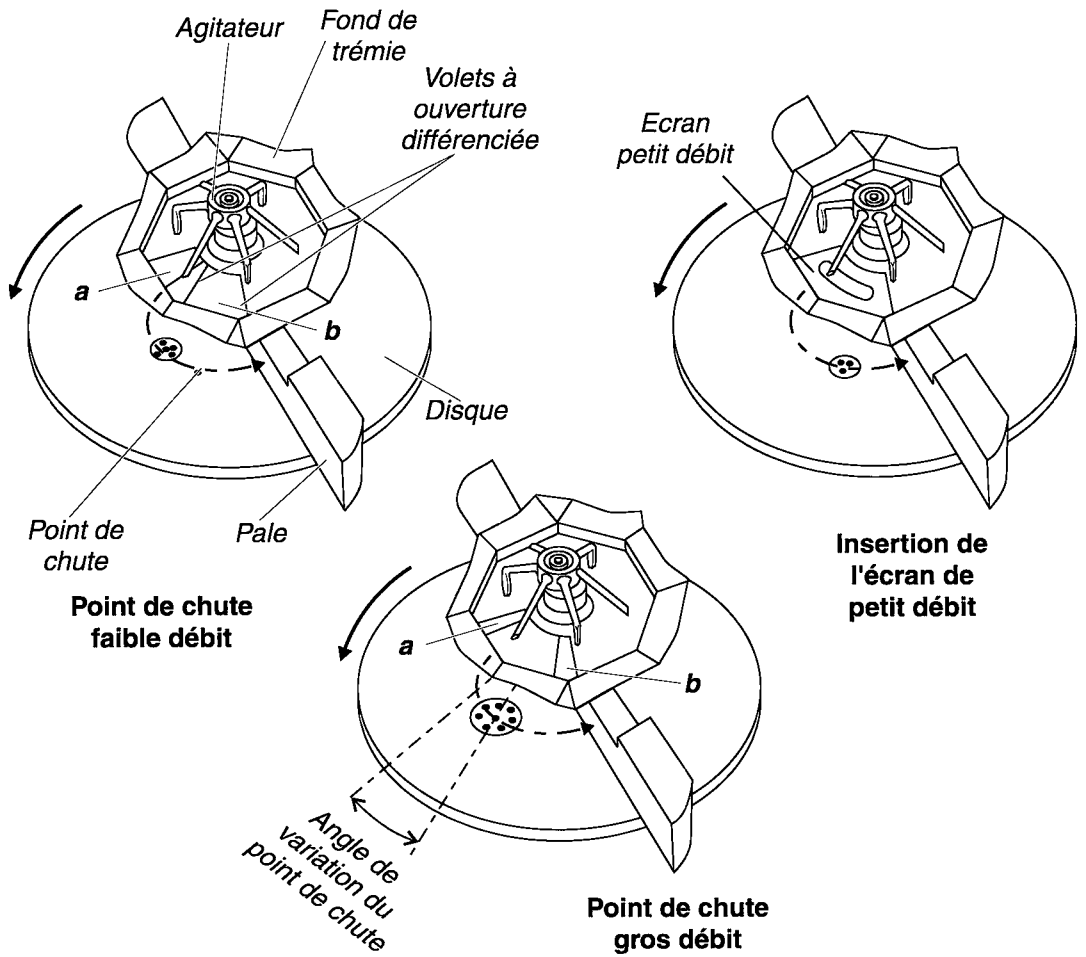


Fig. 44 - **Dispositif Bogballe de variation angulaire du point de chute en fonction du débit** (d'après document Bogballe)

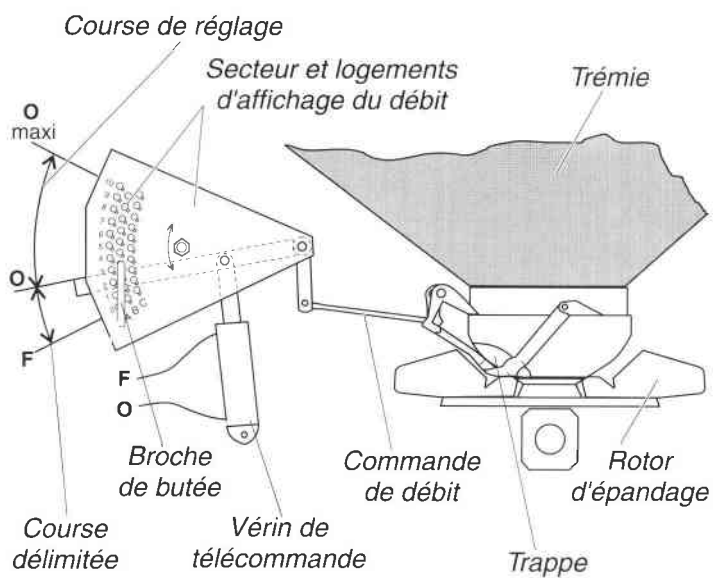


Fig. 45 - Réglage des trappes de débit par broches et logements multiples (d'après document Lely)

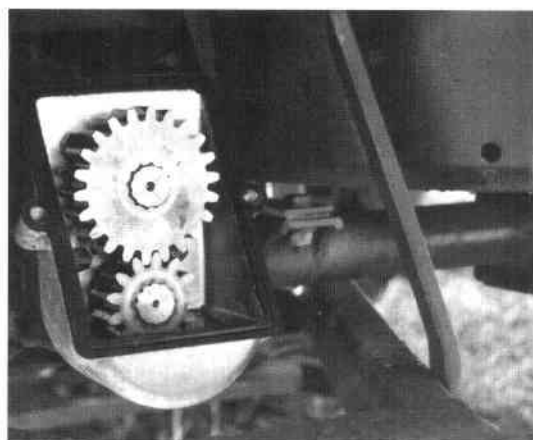


Fig. 46 - Pignons interchangeables pour le réglage de la vitesse des disques d'un distributeur centrifuge Lely (photo Cemagref)

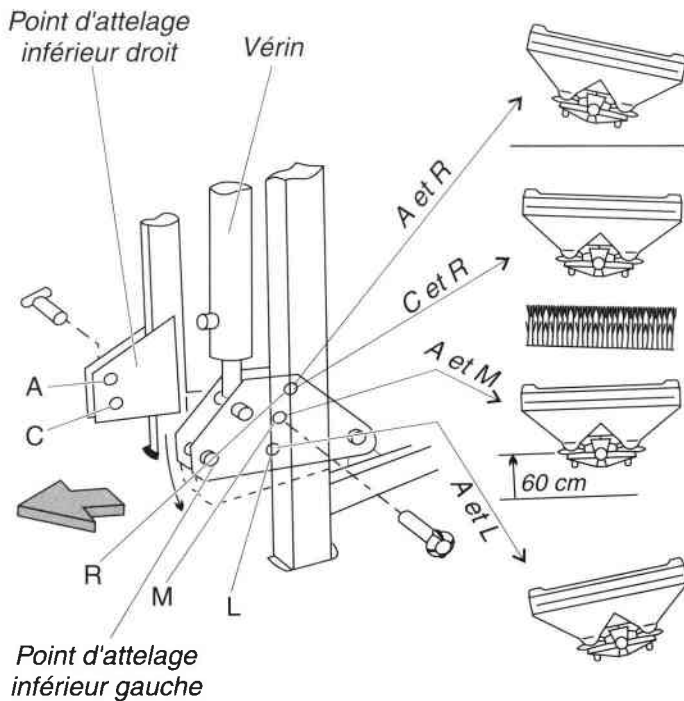


Fig. 47 - Réglage de la portée de projection par modification du niveau transversal, pour l'épandage des bordures (d'après document Lely)

• LES SYSTÈMES D'ÉPANDAGE À VITESSE DE ROTATION VARIABLE

Cette configuration fait appel à un **entraînement hydraulique** des disques par des **moteurs hydrauliques** (fig. 48) alimentés par le circuit hydraulique du tracteur, ou de la machine, s'il s'agit d'un épandeur automoteur. Les moteurs hydrauliques, outre leur aptitude à permettre des vitesses variables, autorisent un déplacement facile de la source de mouvement puisqu'ils peuvent être reliés par des conduites flexibles.

Le concept « **Précis-Kuhn 1500** », proposé sur des appareils portés de 12 à 36 mètres, est basé sur un entraînement de chaque disque par un moteur hydraulique. Les disques sont munis de **pales à deux étages** (fig. 49) ; le premier étage, qui aboutit au centre du disque, prend constamment de l'engrais et le second, plus éloigné du centre, prend d'autant plus d'engrais que le débit est grand. Cette disposition permet de limiter les effets d'écoulements différenciés (décrits précédemment) et leur conséquence sur la largeur de travail lorsque le débit augmente.

Les supports des moteurs hydrauliques, et donc des disques, disposent d'un système de glissières qui permettent de modifier la position des disques par rapport à la chute de l'engrais.

Cette possibilité permet de corriger la largeur de travail en fonction des caractéristiques physiques des produits à épandre ; la largeur de travail étant préréglée par la vitesse des moteurs hydrauliques.

Prenons un exemple : pour épandre de l'ammonitrate granulé 33,5 % fourni par la société X, sur une largeur de travail de 24 mètres, les tableaux de réglages de la notice d'instructions du constructeur indiquent qu'il convient d'utiliser des disques du type D1 à une vitesse de rotation de 900 tr/min et en positionnant le support de chaque disque sur le repère 4.

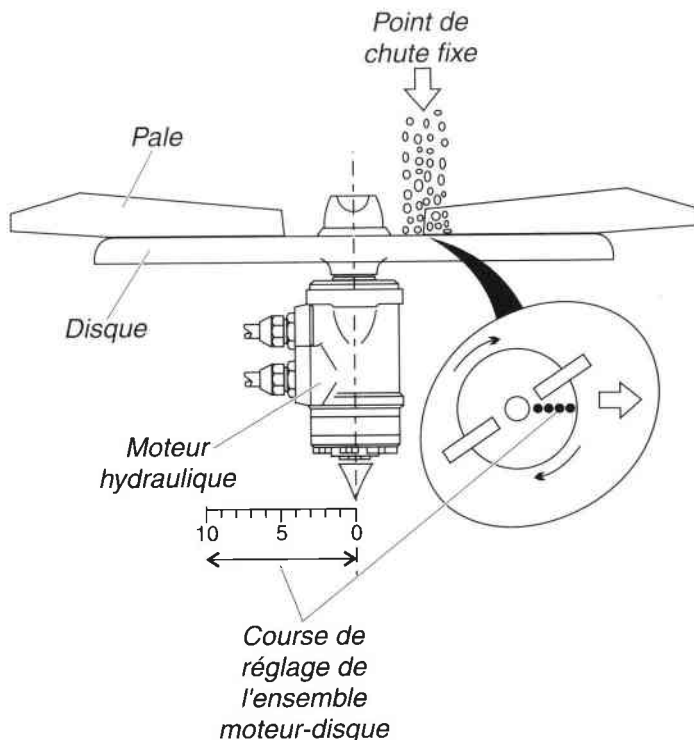
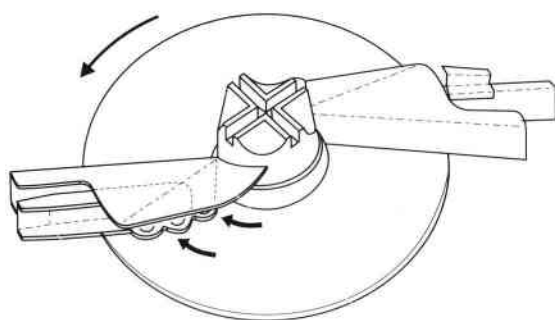


Fig. 48 - Principe du réglage du point de chute par déplacement de l'ensemble disque-moteur hydraulique



2ème pale complémentaire pour débit important

Fig. 49 - **Disque Kuhn à pales étagées** (d'après document Kuhn)

Si l'on souhaite épandre le même produit sur une largeur plus faible (18 mètres par exemple), la vitesse est réduite à 700 tr/min et le support de chaque disque est placé au repère 5 (avancement du point de chute par rapport à la rotation des disques). Si l'engrais était un produit anguleux du genre chlorure de potassium, l'utilisateur devrait utiliser des disques du type D2 (à pales plus longues), avec d'autres valeurs de vitesse et de position des disques. La vitesse des moteurs hydrauliques est régulée et réglée par un régulateur hydraulique de débit étalonné selon la cylindrée des moteurs utilisés de manière à corrélérer la position de la commande du régulateur avec une échelle graduée en tr/min.

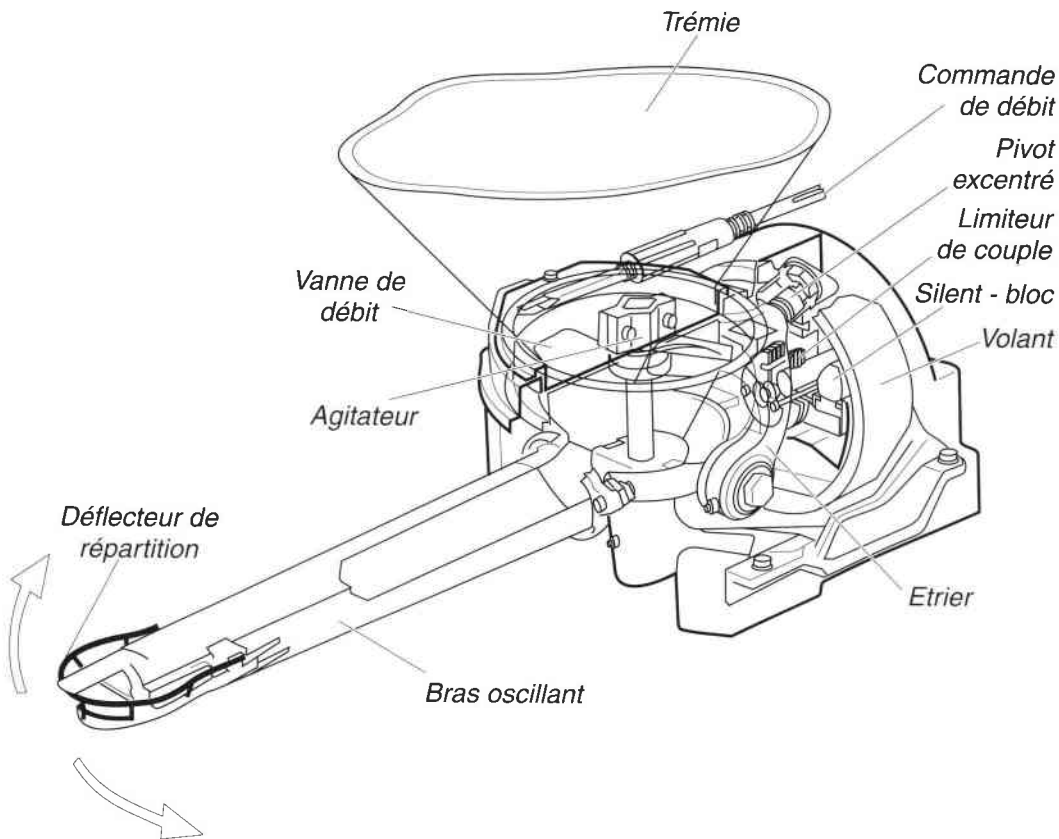


Fig. 50 - Mécanisme d'animation d'un épandeur à bras oscillant Vicon (d'après document Greenland Vicon)



Fig. 51 - Épandeur à bras oscillant au travail (photo Vicon)

LES DISTRIBUTEURS À BRAS OSCILLANT

L'épandage de l'engrais est assuré par un tube tronconique horizontal (fig. 50), dont les oscillations projettent l'engrais en zigzag à l'arrière, dans l'axe de l'avancement (fig. 51). Le principe de ce type d'appareil, appelé aussi **distributeur pendulaire** et largement diffusé par la société Vicon, découle directement du geste du semeur avec toutefois la remarque suivante : si le geste du semeur était unilatéral (prise en un point et épandage dans un sens opposé), l'action du bras oscillant est bilatérale (chargement en un point central et épandage des deux côtés).

Contenu dans une trémie conique en matière plastique moulée, l'engrais descend vers le tube oscillant par gravité. L'entraînement du tube oscillant s'effectue par la prise de force du tracteur grâce à un mécanisme à excentrique. En fond de trémie, un agitateur, entraîné par le mécanisme de distribution, assure l'écoulement régulier de l'engrais au travers d'orifices réglables qui permettent d'adapter le débit.

Ce réglage du débit est constitué par deux disques superposés, l'un fixe, l'autre mobile, qui comportent des ouvertures. La rotation du disque mobile, actionnée par un levier de commande, modifie les sections d'écoulement de l'engrais, et donc le débit.

Selon la largeur d'épandage, il est possible de monter des tubes de forme et de longueur différentes.

Sur les matériels traînés, l'alimentation du bras est assurée par un tapis.

Les distributeurs à tube oscillant permettent d'obtenir un épandage sur une largeur de 12 à 18 mètres avec une bonne symétrie de répartition. La courbe de répartition transversale étant plutôt de forme trapézoïdale, les zones latérales de recouvrement permettent une certaine variation dans les intervalles de passage.

Dans ce type de distributeur, il y a peu de risques de bris des granulés (ou des particules d'engrais), car le produit s'écoule de la trémie jusqu'au tube d'épandage sans chocs (très faible amplitude du mouvement au point de chute). L'épandage d'engrais pulvérulents est possible si l'on munit l'appareil d'une jupe pour éviter la dérive.

Respecter les indications de la notice du constructeur pour prévenir les anomalies de la nappe d'épandage, et notamment le surdosage central ou latéral.

Les principaux réglages de ce type d'appareil sont :

- **la position d'attelage** en hauteur et en inclinaison,
- **le débit** en agissant sur l'ouverture du (ou des) orifice (s) d'alimentation,
- **la largeur d'épandage** en choisissant une longueur de tube adaptée au produit et à la largeur de travail souhaitée. On peut ainsi épandre différents produits sur des largeurs plus ou moins importantes ou pour fertiliser les bordures de parcelles.

LES DISTRIBUTEURS À RAMPES

Sur le plan de l'utilisation, les distributeurs à rampes (fig. 52 et 55) se caractérisent, comme les pulvérisateurs pour cultures basses, par une largeur au travail pratiquement égale à leur largeur d'épandage. Leur largeur de travail est fixe avec, toutefois, la possibilité d'alimenter les rampes par tronçons.

Par rapport aux appareils centrifuges, on peut noter une plus grande facilité de réglage (largeur connue et visible), une bonne régularité transversale peu influencée par le vent, une plus faible sensibilité aux caractéristiques physiques des engrais, une bonne aptitude à un épandage précis au niveau des bordures, mais à un prix généralement nettement plus élevé, à performances comparables.

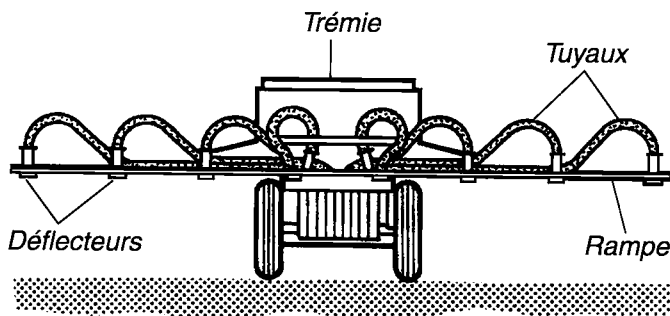


Fig. 52 - Vue d'un épandeur d'engrais pneumatique

• LES DISTRIBUTEURS PNEUMATIQUES (FIG. 52 ET 53)

L'engrais, extrait de la trémie, est entraîné dans des tuyauteries par un flux d'air produit par une turbine jusqu'à des buses de répartition ou diffuseurs disposés sur une rampe transversale (fig. 53). Un distributeur pneumatique comprend une **trémie**, des **doseurs latéraux**, une **soufflerie**, des **conduites de transfert** et des **diffuseurs**.

– **les doseurs** sont, le plus souvent, constitués de rouleaux à ergots ou à lamelles (fig. 54) disposés en autant de rangées que de conduits à alimenter. Le réglage du débit est obtenu manuellement ou automatiquement (débit proportionnel à l'avancement) en faisant varier la vitesse de rotation de ces rouleaux grâce à une boîte de vitesses ou à un variateur.

– **la soufflerie** est entraînée par la prise de force et crée un flux d'air qui entraîne l'engrais depuis les doseurs jusqu'aux diffuseurs.

– **les conduites de transfert** sont disposées parallèlement sur une rampe horizontale, elles sont constituées de tubes rigides ou souples en matière plastique. Elles sont de longueurs différentes, chacune aboutissant à un diffuseur. La longueur de la rampe varie de 9 à 24 mètres, selon les modèles. La rampe est repliable manuellement ou hydrauliquement par tronçons.

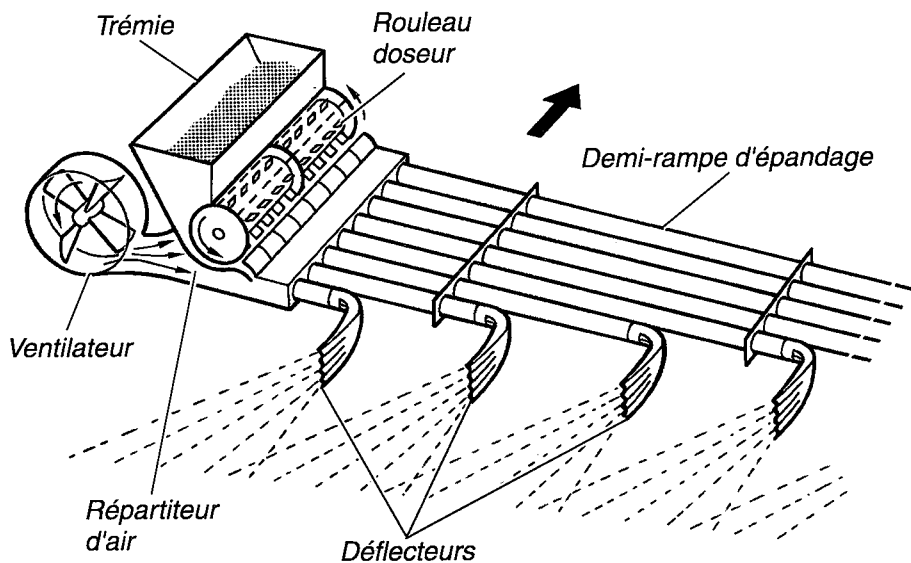


Fig. 53 - Vue partielle d'une rampe de distributeur d'engrais pneumatique

– **les diffuseurs** sont les organes de répartition. Régulièrement répartis sur la rampe, avec un espacement de 35 cm à 1,50 m selon les modèles, ils sont constitués d'une palette nervurée formant déflecteur. Leur rôle est de répartir l'engrais, avec un léger recouvrement sur le jet voisin, de façon à obtenir une **répartition transversale** la plus uniforme possible.

Les distributeurs d'engrais pneumatiques peuvent être utilisés en **fertilisation localisée** en adaptant aux diffuseurs des **manchettes de localisation** qui conduisent l'engrais au sol, à l'endroit souhaité.

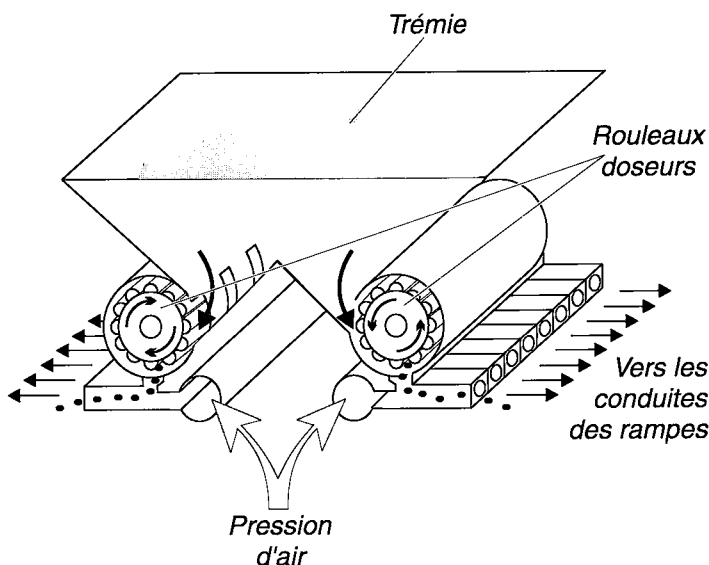


Fig. 54 - Principe de la distribution et des rouleaux doseurs d'un épandeur pneumatique

• LES DISTRIBUTEURS MÉCANIQUES À VIS (fig. 55)

Ces matériels de grande capacité sont souvent utilisés pour l'épandage des amendements calcaires. Ils sont généralement constitués d'un châssis semi-porté à un ou à deux essieux supportant une trémie. Au fond de la trémie, un convoyeur longitudinal (readler), métallique ou en caoutchouc, alimente deux vis sans fin perpendiculaires à l'avancement (fig. 55). Chaque vis est contenue dans une rampe tubulaire munie d'orifices à section réglable par glissières.

Ce mode d'épandage (fig. 56) est surtout apprécié pour son aptitude à épandre des produits pulvérulents ou concassés avec une faible sensibilité au vent, une bonne régularité longitudinale et transversale et un épandage précis le long des bordures.

Le réglage de débit s'effectue en agissant sur des trappes, sur la vitesse d'avancement du tapis de fond de trémie et en faisant varier la vitesse de rotation des vis. La régulation de débit en fonction de la vitesse d'avancement (DPA) peut être assurée par un entraînement de la distribution par une roue de mesure (sur les appareils portés) ou directement par l'une des roues porteuses de l'appareil (sur les appareils tractés).

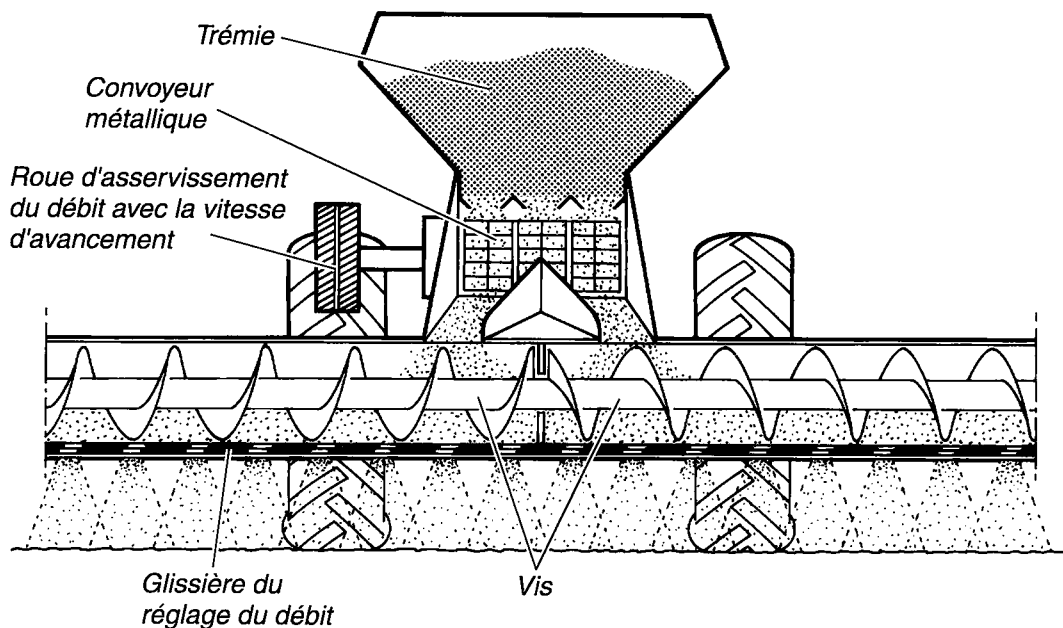


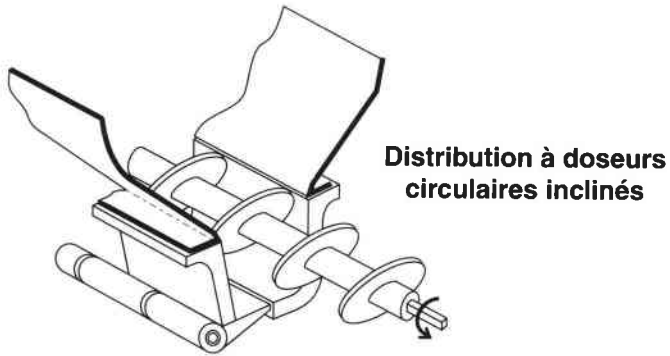
Fig. 55 - Vue arrière d'un distributeur traîné à vis
(pour plus de clarté, les vis ont été grossies)

Pour les produits pulvérulents, des jupes souples peuvent être adaptées à l'arrière des rampes pour éviter la dérive des poussières.

Ce type d'épandeur peut être utilisé en fertilisation localisée en adaptant des manchettes souples ou des goulottes qui déposent l'engrais au sol, à l'endroit souhaité. Dans certains cas, afin d'augmenter la polyvalence des épandeurs, l'équipement d'épandage par vis peut, le cas échéant, être déposé et remplacé par un système d'épandage centrifuge.



Fig. 56 - Vue d'un épandeur d'engrais à vis au travail (photo Sulky)



**Distribution
en nappe par
tapis à barrettes**

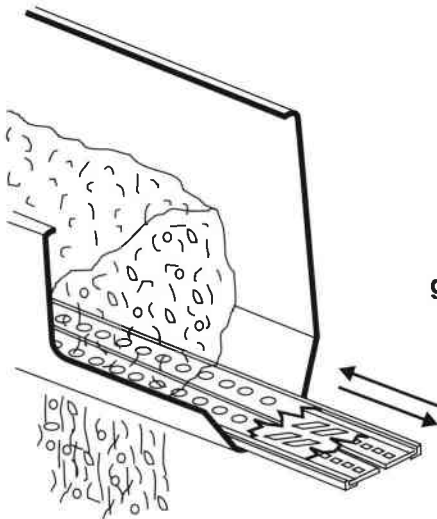
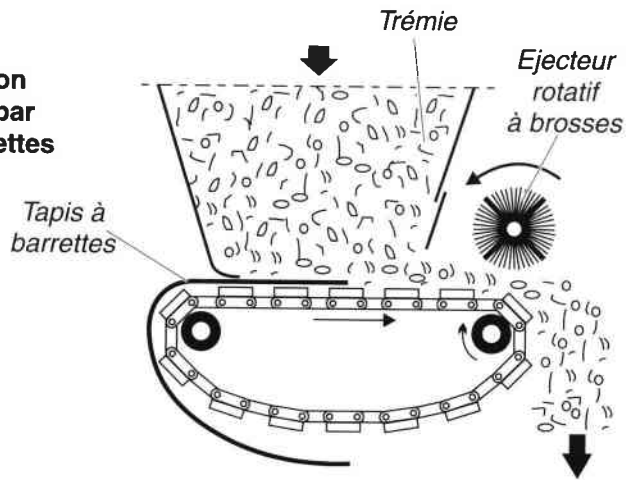


Fig. 57 - Différents systèmes de distribution en nappe

LES ÉPANDEURS EN NAPPE À TRÉMIE TRANSVERSALE

Ces matériels de moins en moins utilisés sont dérivés des anciens épandeurs d'engrais à traction animale. Ils sont constitués d'une trémie ou caisse transversale dont la largeur est égale à la largeur d'épandage (3, 4 ou parfois 6 mètres). La caisse repose sur un châssis traîné reposant sur des roues latérales munies de pneumatiques étroits de grand diamètre. Le mécanisme de distribution est situé sur toute la largeur du fond de caisse. Parmi les systèmes utilisés, citons (fig. 57) les distributeurs à agitateurs circulaires inclinés, les distributeurs à tapis et les distributeurs à grilles alternatives.

L'entraînement du mécanisme de distribution est assuré de manière proportionnelle à l'avancement par les roues porteuses de l'appareil.

Le réglage du débit s'effectue en modifiant le rapport de transmission du distributeur par une boîte de vitesses ou un variateur.

Bien que ce principe d'épandage présente une largeur de travail limitée, il demeure apprécié pour sa régularité, surtout pour les produits pulvérulents ou hétérogènes (scories, amendements...).

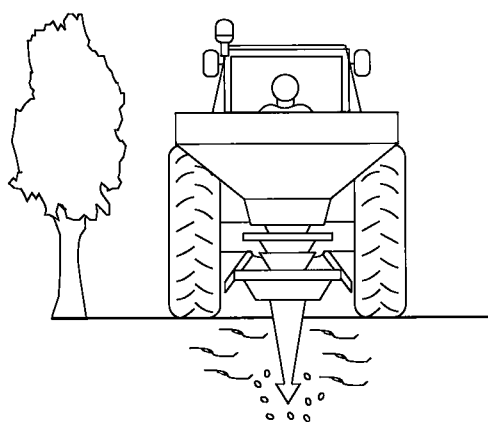
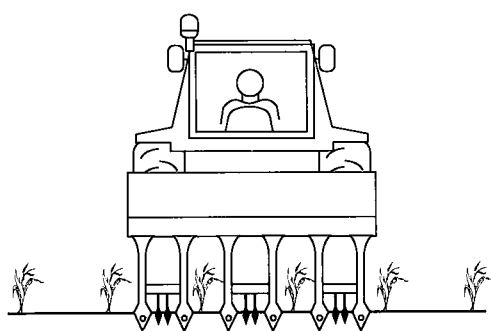
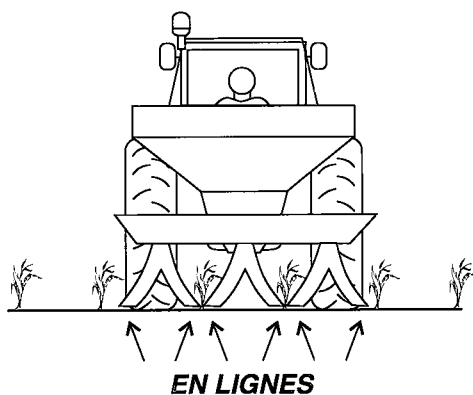
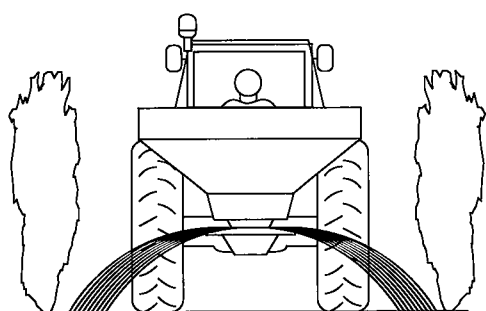
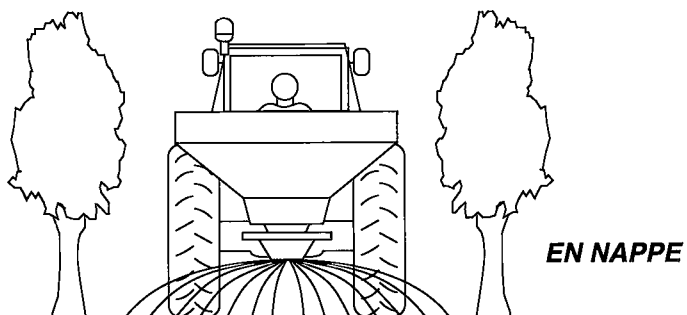


Fig. 58 - Techniques de fertilisation localisée des cultures

LES ÉQUIPEMENTS POUR LA FERTILISATION LOCALISÉE

L'application localisée des engrais peut être pratiquée pour satisfaire un ou plusieurs des objectifs suivants :

- n'apporter aux cultures annuelles et pérennes que la quantité d'engrais dont elles ont besoin, à l'endroit le plus favorable pour qu'elle puisse être assimilée avec le moins de reliquat possible par le système racinaire ;
- localiser une dose limitée d'engrais (azote et acide phosphorique par exemple) près des lignes de végétation des espèces à cycle végétal court (maïs, tournesol, pomme de terre...) afin de stimuler leur croissance (effet starter) ;
- localiser à l'endroit opportun un engrais coûteux à mode d'action spécifique (pouvant contenir par exemple des oligo-éléments ou une matière active insecticide) sur des cultures pérennes (vignes, vergers...).

D'une manière générale, la localisation peut permettre un accroissement du rendement pour une même dose d'engrais ou l'obtention d'un rendement équivalent pour une dose d'engrais réduite.

Les engrais utilisés peuvent être de formulation particulière, sous une forme rapidement soluble et pouvant contenir des matières insecticides, voire des herbicides sélectifs.

Parmi les différents équipements utilisés, citons **les systèmes de localisation en nappe** (fig. 68), **les systèmes d'épandage en bandes** (fig. 58) généralement adaptés aux distributeurs centrifuges à disques, les systèmes de localisation en **lignes** adaptés aux distributeurs conventionnels, **les enfouisseurs d'engrais** (fig. 58) et **les fertilisateurs associés aux semoirs** (fig. 64).

Dans tous les cas et afin de valoriser au mieux la technique de localisation, il convient de respecter strictement la dose et les conditions d'épandage préconisées. Des essais de débit des appareils doivent être systématiquement réalisés, quel que soit le système de localisation utilisé. Selon les cas, ces essais de débit seront établis sur une valeur corrigée **de débit par mètre linéaire.**

• **Les systèmes de localisation en nappe de faible largeur (fig. 58) :**

L'épandage en nappe de faible largeur est utilisé pour les cultures arboricoles ou viticoles. Il peut être pratiqué avec un distributeur à bras oscillant (fig. 69) en l'équipant d'un bras court ou avec un distributeur centrifuge à disques muni de pales courtes ou en réduisant la vitesse des disques.

• **Les systèmes d'épandage en bandes :**

L'épandage en bandes (fig. 58), sur la surface du sol, sans projection sur la végétation, est principalement appliqué aux cultures arboricoles ou viticoles. Il peut être pratiqué avec un distributeur à bras oscillant (fig. 59) en enlevant le diffuseur terminal, ou avec un distributeur

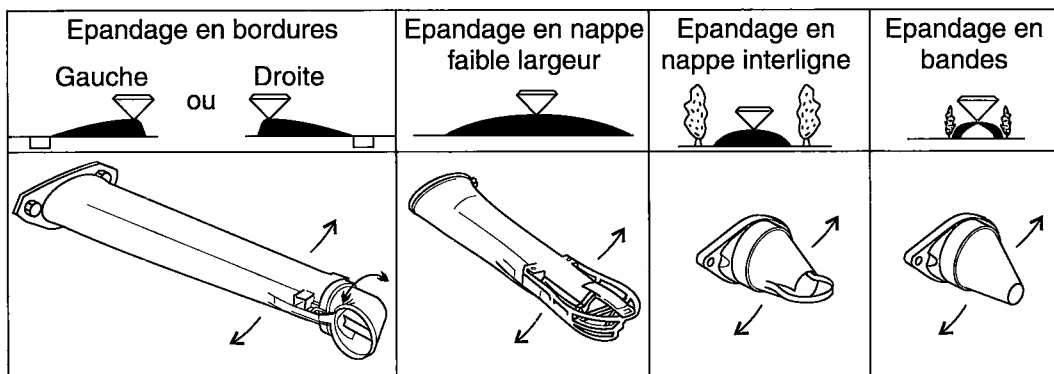


Fig. 59 - Quelques exemples de diffuseurs oscillants adaptés à différentes configurations d'épandage (d'après document Vicon)

centrifuge à disques muni de déflecteurs latéraux qui canalisent l'engrais et le projettent sur des bandes de 40 à 60 cm de largeur, espacées de 1,5 m à 6 m selon l'espace entre-rangs.

• **Les systèmes de localisation en lignes :**

Les épandeurs en lignes étroites sont en fait des appareils classiques équipés d'accessoires et réglés spécialement pour déposer la fumure juste au niveau du sol, en lignes régulières parallèles en fonction de l'entre-rangs de la culture.

Les figures 60 et 61 montrent différentes réalisations adaptées à des distributeurs centrifuges à bras oscillants et à disques.

Le dispositif localisateur est constitué d'un boîtier de répartition avec des tuyaux pendants. Selon les cas, le boîtier de répartition peut être conçu soit pour

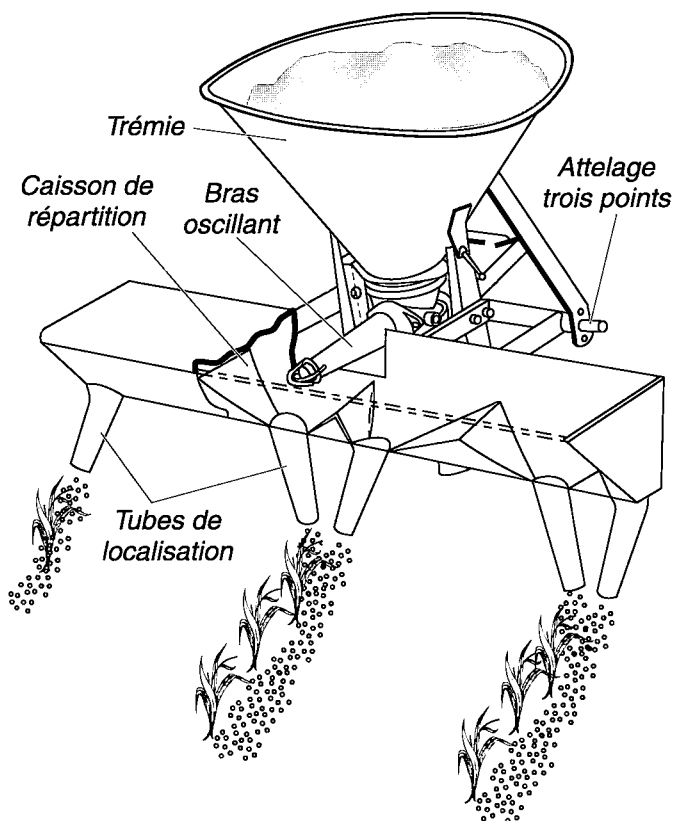


Fig. 60 - Vue d'un localisateur d'engrais en lignes adapté à un épandeur à bras oscillant (d'après document Vicon)

être monté sous le système de dosage du fond de trémie, les disques étant démontés, soit pour collecter l'engrais à la sortie du bras oscillant ou des disques.

Des conduites ou manchettes de localisation peuvent être adaptées à un distributeur pneumatique à rampes ; les manchettes recueillent l'engrais à l'embouchure des diffuseurs et le conduisent en lignes sur le sol.

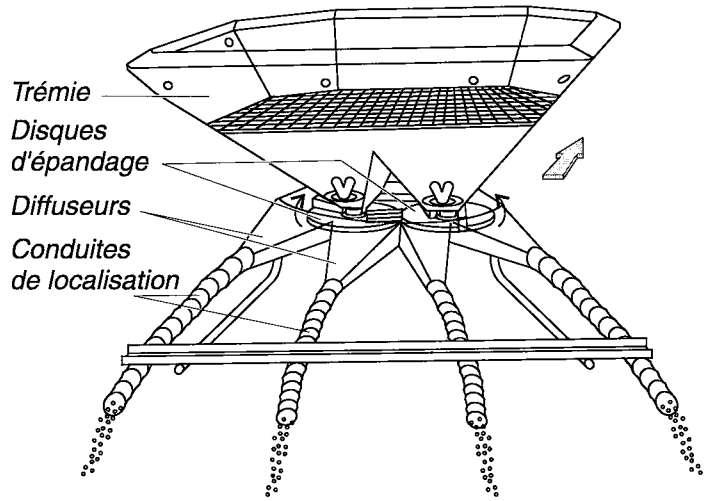


Fig. 61 - Distributeur centrifuge doubles-disques équipé d'un localisateur d'engrais en lignes

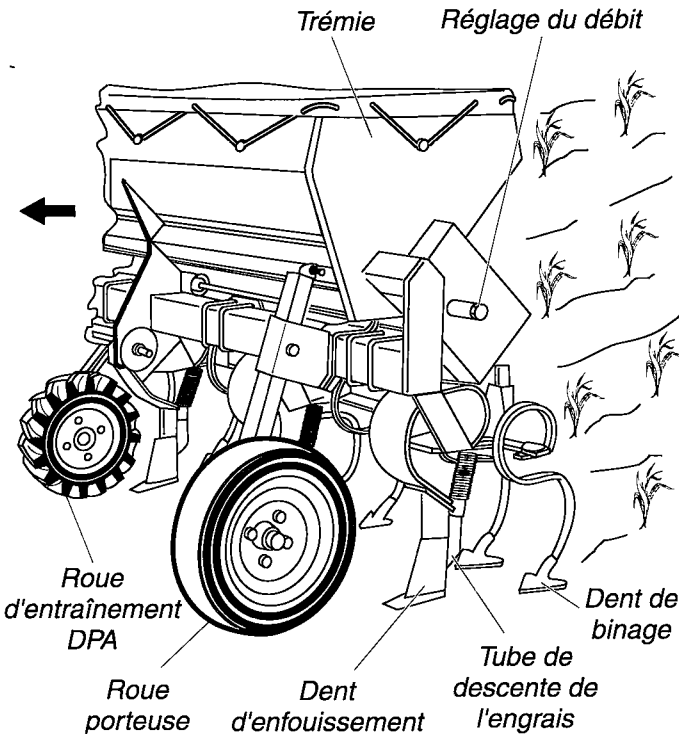


Fig. 62 - Vue partielle d'un enfouisseur superficiel d'engrais (d'après document Carré)

• Les enfouisseurs d'engrais (fig. 62 et 63) :

On distingue les **enfouisseurs superficiels** (fig. 62) utilisés sur des cultures annuelles (maïs, tabac...) et les **enfouisseurs profonds** (fig. 63) essentiellement utilisés en viticulture et en arboriculture.

Les enfouisseurs superficiels sont en fait des bineuses ou des cultivateurs à dents munis de dents de localisation. La figure 62 montre un enfouisseur de ce type muni d'une trémie transversale, de distributeurs à cannelures et de tuyaux souples qui conduisent l'engrais derrière des dents d'enfouissement, elles-mêmes suivies de dents de recouvrement.

Dans ce cas, ce type d'apport d'engrais s'accompagne d'un ameublissement de l'entre-rangs.

Les enfouisseurs profonds sont généralement constitués d'un distributeur placé au-dessus d'un bâti de sous-soleuse (fig. 63). Chaque dent d'enfouissement porte dans sa partie dorsale (partie arrière) un canal de localisation qui reçoit l'engrais distribué par un équipement comparable à un système de localisation en lignes.

La profondeur de localisation et le débit doivent être réglés judicieusement en fonction de la culture ; en principe, la profondeur maximale d'enfouissement ne dépasse pas 40 cm.

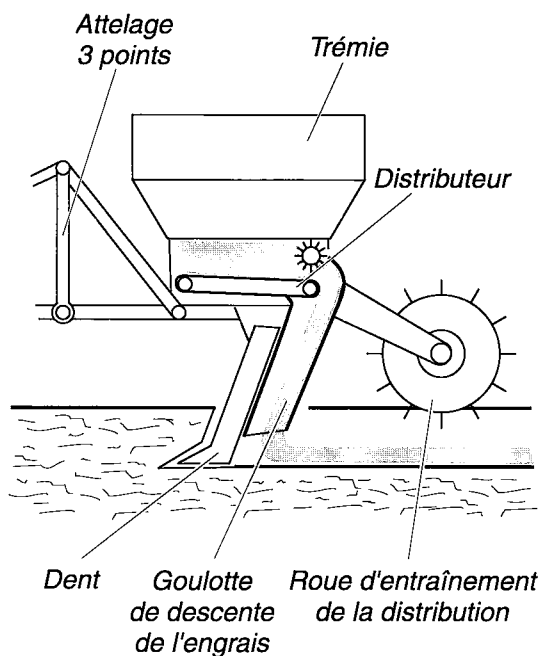


Fig. 63 - Principe d'un enfouisseur d'engrais profond

• Les fertiliseurs associés aux semoirs :

Les semoirs monograins peuvent être équipés en option de localisateurs d'engrais (fig. 64) qui déposent les granulés fertilisants sur des lignes parallèles aux lignes de semis, mais distantes de 5 à 10 cm, afin de contrôler le temps de diffusion du produit et d'éviter que les éléments chimiques contenus dans l'engrais ne « brûlent » les graines et surtout les jeunes plantules.

Ce choix de fertilisation, associée au semis, présente l'avantage d'éviter un passage (avant ou après le semis) et d'apporter une fertilisation (essentiellement azotée) favorable à un développement rapide des cultures de printemps, afin qu'elles atteignent un niveau de croissance suffisant à l'entrée de l'été. Pour ce type d'application, il est aussi possible d'utiliser des produits composites qui sont constitués d'un mélange d'engrais et de produits de protection (herbicides sélectifs, insecticides...).

Surtout utilisé lors des semis de maïs, l'équipement comprend une ou plusieurs trémies munies de distributeurs mécaniques multiples à vis (fig. 64) ou à cannelures, qui dosent l'engrais à l'entrée des conduites de localisation. L'entraînement des distributeurs est réalisé par la distribution du semoir ou par une roue spécifique. La distribution doit être proportionnelle à l'avancement et réglable par changement de pignons.

A la sortie des distributeurs, les granulés sont transportés par gravité ou pneumatiquement par un flux d'air dérivé de la soufflerie du semoir (cas des semoirs pneumatiques). Selon les cas, la localisation est réalisée en surface ou légèrement enterrée par des éléments à soc (ou botte) ou à disques.

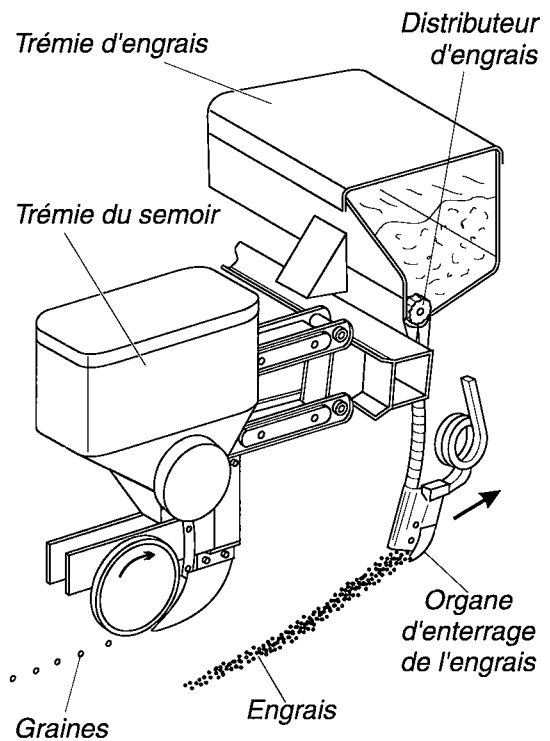


Fig. 64 - Vue d'un élément de semoir monograin associé à un fertiliseur

LES DISPOSITIFS DE RÉGULATION ET D'AIDE À L'ÉPANDAGE

Les descriptions présentées dans ce chapitre et dans le chapitre suivant (chapitre 4 : « *Les paramètres d'épandage, l'utilisation et les réglages des distributeurs d'engrais minéraux solides* ») montrent à l'évidence que la maîtrise des opérations de fertilisation est d'autant plus délicate que l'on cherche à atteindre un niveau de précision et de qualité d'épandage en adéquation avec les objectifs de gestion des exploitations et de respect de l'environnement. Les progrès de la recherche et le développement de l'informatique embarquée permettent aux constructeurs de proposer des équipements d'aide à l'utilisation et des systèmes de régulation de plus en plus utiles aux agriculteurs. Ces systèmes utilisent différents modèles de capteurs (vitesse, avancement, pesage, angle d'épandage...).

Parmi les systèmes rencontrés, citons **les consoles d'indication et de commande, les systèmes de régulation du débit, les systèmes intégrés d'étalonnage et de gestion de la fertilisation et les systèmes de gestion intraparcellaires.**

• LES CONSOLES D'INDICATION ET DE COMMANDE

Dans le cas le plus simple, ce type de console dispose d'une calculatrice et d'un sélecteur d'affichage indiquant, par exemple, le régime de prise de force ou des disques. La calculatrice indique le débit à obtenir lors du test de débit en fonction de la dose/ha souhaitée et de la largeur d'épandage. Selon les cas, le système peut indiquer les réglages appropriés et permettre la télécommande d'ouverture et de fermeture simultanée ou unilatérale (1/2 largeur) des trappes de débit. Notons que les indications de base : surface travaillée, temps/ha... peuvent aussi être indiquées par l'ordinateur de bord du tracteur, si l'opérateur entre au moment opportun les données nécessaires.

• LES SYSTÈMES DE RÉGULATION DU DÉBIT (FIG. 65)

Pour une largeur de travail donnée, le respect d'une dose/ha dépend de la maîtrise de la vitesse d'entraînement du matériel (régime réel de la prise de force) et de la vitesse réelle d'avancement. Or, ces deux valeurs peuvent varier de manière significative en cours de travail à cause des variations de régime du moteur et du patinage, elles-mêmes dues à des causes variées : surfaces plus ou moins adhérentes, bosses, montées, descentes, enfoncement des roues dans le sol, variation de la charge dans les trémies... Ces variations étant une cause d'imprécision des épandages, les constructeurs proposent, en option ou en série, des dispositifs de régulation DPA.

Le rôle de la régulation DPA (Débit Proportionnel à l'Avancement) est de maintenir constante la dose distribuée à l'hectare, malgré les variations de vitesse d'avancement dues aux variations de régime moteur ou aux écarts de patinage entre les montées et les descentes, et en cas de modification du rapport de boîte de vitesses du tracteur en cours de travail. Pour une valeur de consigne de débit donnée, le principe du système repose sur le positionnement

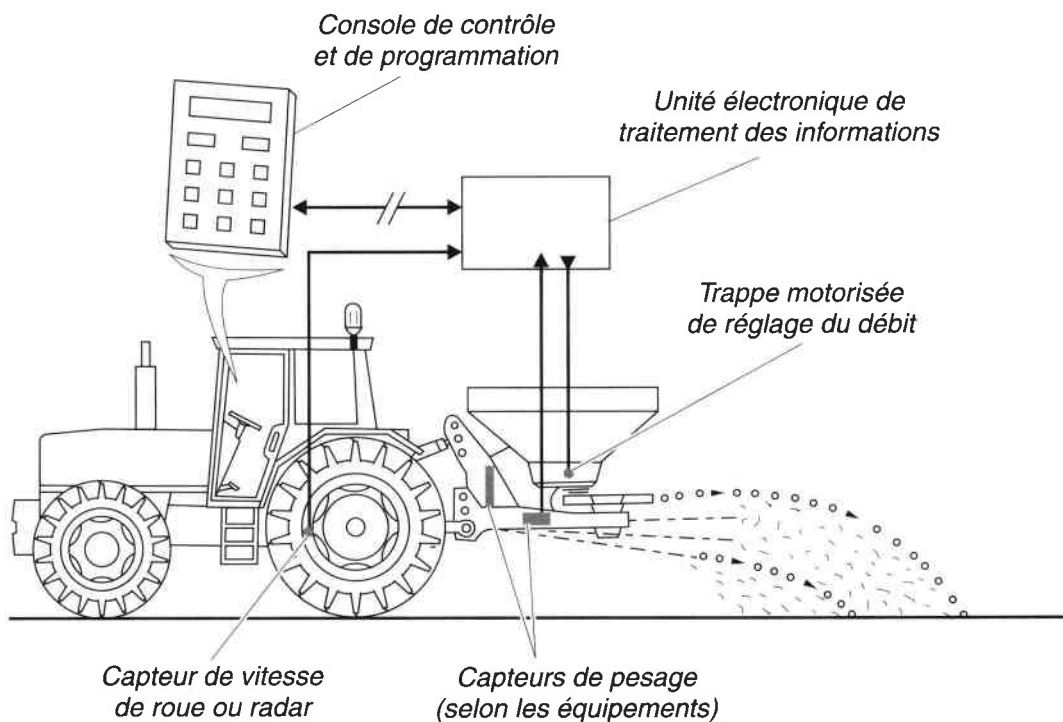


Fig. 65 - Principe de la régulation de débit proportionnelle à la vitesse d'avancement (système DPA)

automatique des trappes de débit en fonction des variations de vitesse d'avancement mesurées par un capteur de roue (fig. 65) ou un radar (fig. 66). A partir des consignes de base entrées par l'utilisateur dans la console et des informations transmises par le ou les capteurs, le système commande un actionneur (vérin) électrique ou hydraulique qui ajuste l'ouverture des trappes de débit, presque en temps réel (au temps de réaction près des organes).

En matière de régulation, s'il est relativement facile de mesurer des vitesses de rotation ou d'avancement avec des capteurs, il est beaucoup plus difficile de mesurer le débit massique d'un engrais. Pour cette raison, la régulation de débit s'effectue **en boucle dite**



Fig. 66 - Radar pour la mesure de la vitesse réelle d'avancement (photo Cemagref)

ouverte, car il n'existe pas de moyens connus pour mesurer en continu le débit massique de l'engrais à la sortie des trappes et valider la pertinence de leur réglage d'ouverture. La **loi de régulation** introduite par les constructeurs est en principe établie à partir de la **courbe d'écoulement-type** des différentes familles d'engrais ; c'est ensuite à l'utilisateur d'actualiser cette loi, en fonction de la nature des produits à épandre, en réalisant des mesures de débit selon une procédure simple indiquée dans la notice d'instructions. Dans certains cas, les constructeurs de distributeurs proposent aux agriculteurs un service d'assistance à qui il suffit d'adresser un échantillon d'engrais pour obtenir les réglages initiaux de l'appareil en fonction de la dose à appliquer.

Dans le cas le plus simple, l'essai de débit est réalisé comme pour un matériel sans régulation : il suffit de faire débiter l'appareil à poste fixe avec une position bien précise des vannes de débit et pendant un temps donné. L'engrais recueilli est pesé et cette valeur sert de base d'étalonnage du système de régulation. Au terme de cet étalonnage, la courbe de débit de l'appareil (courbe du débit réel par rapport au degré d'ouverture des trappes) ne peut être exacte que si elle correspond à la courbe de référence introduite par le constructeur du système, pour le type d'engrais à épandre. Pour le vérifier, il suffit de procéder à un autre essai de débit, à une autre valeur d'ouverture des trappes. L'acquisition des deux références de débit permet, le cas échéant, d'adapter la courbe d'écoulement au produit à épandre et d'obtenir ainsi une loi de régulation plus juste. La méthodologie d'étalonnage et de mesure est indiquée dans la notice d'instructions ainsi que les accessoires à utiliser pour recueillir l'engrais. A chaque changement de produit, il convient de vérifier si l'étalonnage de l'appareil est correct et, si nécessaire, de procéder à un nouvel étalonnage !

Rappelons toutefois que, si la vitesse d'avancement diminue sous l'effet d'une diminution du régime moteur, les disques des appareils centrifuges tournent aussi moins vite et la largeur d'épandage diminue (cas des entraînements mécaniques par prise de force). Ce constat nous conduit à rappeler **qu'il est très important de prendre toutes les dispositions nécessaires pour limiter les variations de régime du moteur**, surtout avec les distributeurs centrifuges. Seule l'animation des disques par une transmission mécanique à variateur ou une transmission hydrostatique à débit régulé, piloté par le système DPA, peut résoudre cette difficulté.

Outre la régulation du débit, les systèmes DPA sont accompagnés de fonctions multiples d'affichage, de calcul, de mémorisation, voire de transfert de données :

- vitesse d'avancement,
- surface travaillée,
- distance parcourue,
- régime de la prise de force ou des disques et possibilité d'alarme en cas d'anomalie,
- augmentation ou réduction momentanée de dose pour certaines parties de la parcelle,
- mémorisation des doses et (ou) des réglages propres à chaque parcelle,
- mémorisation des tonnages épandus...
- transfert de données vers le poste informatique de l'exploitation,
- diagnostic de fonctionnement et, le cas échéant, rappel des échéances de maintenance.

• LES SYSTÈMES INTÉGRÉS D'ÉTALONNAGE DE DÉBIT ET DE LARGEUR

Cette technologie plus élaborée complète les dispositifs précédents en faisant appel à des capteurs et à des systèmes de traitement des signaux capables de détecter des anomalies d'application et **d'actualiser les valeurs des paramètres d'étalonnage en cours de travail**. Prenons deux exemples : celui de l'**étalonnage intégré du débit** et celui de l'**étalonnage intégré de la largeur de travail**:

– l'**étalonnage intégré du débit** est obtenu grâce à un dispositif de **pesée** à partir de capteurs de pesage (fig 67). Pendant l'épandage ou en phase de test, l'unité électronique du système mémorise le poids P1 à l'instant T1 puis le poids P2 à l'instant T2, puis calcule la différence et traduit ce poids en débit par unité de temps écoulé (débit massique), compte tenu des valeurs de largeur et de vitesse d'avancement selon la relation $D = Q.L.V / 600$:

– si la valeur de débit ainsi mesurée est identique au débit de consigne, la régulation n'intervient pas,

– si le débit mesuré est supérieur au débit de consigne, la régulation intervient pour réduire l'ouverture des vannes de débit,

– si le débit mesuré est inférieur au débit de consigne, la régulation intervient pour augmenter l'ouverture des vannes de débit.

Parmi les réalisations existantes, citons le système *Calibrator* de Bogballe et le système *Centermatic* de Lely dont les capteurs sont placés entre la potence d'attelage trois points et le bâti du distributeur.

Prenons l'exemple de l'utilisation du système Bogballe (fig. 68) ; l'utilisateur programme sur la console la distance de passage et la quantité/ha souhaitée. Le système de calcul de l'unité électronique prend en compte le poids d'engrais contenu dans la trémie et procède à un pré-calibrage de l'ouverture des trappes. Dès le début de la distribution d'engrais, l'unité de calcul procède à des pesées comparatives et vérifie la cohérence entre le débit massique mesuré et l'objectif de fertilisation. Si le pré-calibrage n'est pas correct, le système procède automatiquement aux corrections nécessaires et vérifie en permanence les résultats (par action itérative). A partir de l'information fournie par le capteur de vitesse d'avancement, le système corrige le



Fig. 67 - Vue du capteur de pesage intégré d'un distributeur Bogballe (photo Cemagref)



Fig. 68 - Console de commande Bogballe (photo Agram Bogballe)

quences d'impacts des grains d'engrais contre leur partie sensible. Pendant la phase d'étalonnage en début de chantier, les capteurs détectent la position de la nappe d'épandage et transmettent leurs informations à un indicateur à diodes lumineuses placé dans le poste de conduite du tracteur. En cas d'écart latéral anormal, dans un sens ou dans l'autre, de la nappe d'épandage par rapport à la valeur de consigne, le conducteur peut agir sur la commande de localisation du point de chute de l'engrais sur les disques pour rétablir la bonne largeur de projection. Au terme de cette phase préliminaire d'étalonnage au travail, les capteurs sont relevés afin d'éviter leur exposition constante aux projections. Ce type d'aide à l'utilisation est surtout utile lorsque les largeurs d'épandage sont différentes d'une parcelle à une autre et lorsque les changements de nature des produits à épandre sont fréquents, cas des exploitations de polyculture-élevage, des utilisations collectives (voisinage, cercles de machines, Cuma) et des entreprises de travaux agricoles.

débit de manière proportionnelle à la vitesse d'avancement (régulation DPA). A tout moment, l'utilisateur peut connaître le poids d'engrais restant dans l'appareil.

La potence d'attelage peut être conçue de manière amovible (cas du système Lely) afin de pouvoir l'utiliser comme interface de pesage pour d'autres machines portées (désileuse, distributrice...).

– **l'étalonnage intégré de la largeur de travail** est utilisé sur les appareils à épandage centrifuge à disques. Prenons l'exemple du système Justax® développé par Sulky Burel : **la position du secteur d'épandage** du disque gauche est mesurée par deux **capteurs acoustiques** montés sur un support orientable (fig. 69) selon la largeur de travail souhaitée ; ces deux capteurs informent le système sur la position du secteur d'épandage par comparaison des fré-



Fig. 69 - Vue des capteurs de mesure de l'angle d'épandage du système Justax® de Sulky (photo Cemagref)

• LA GESTION INTRAPARCELLAIRE

La gestion intraparcellaire (fig. 70) est un concept en phase de recherche et d'essais. Elle consiste à établir une véritable **cartographie de la fertilité** des différentes zones d'une parcelle grâce à l'acquisition de données pédologiques et agronomiques et à la mesure en temps réel des quantités récoltées. Lorsque cette « carte » est acquise, il est alors possible de raisonner les pratiques culturales et d'apporter « où il faut, juste ce qu'il faut » les produits fertilisants et phytosanitaires.

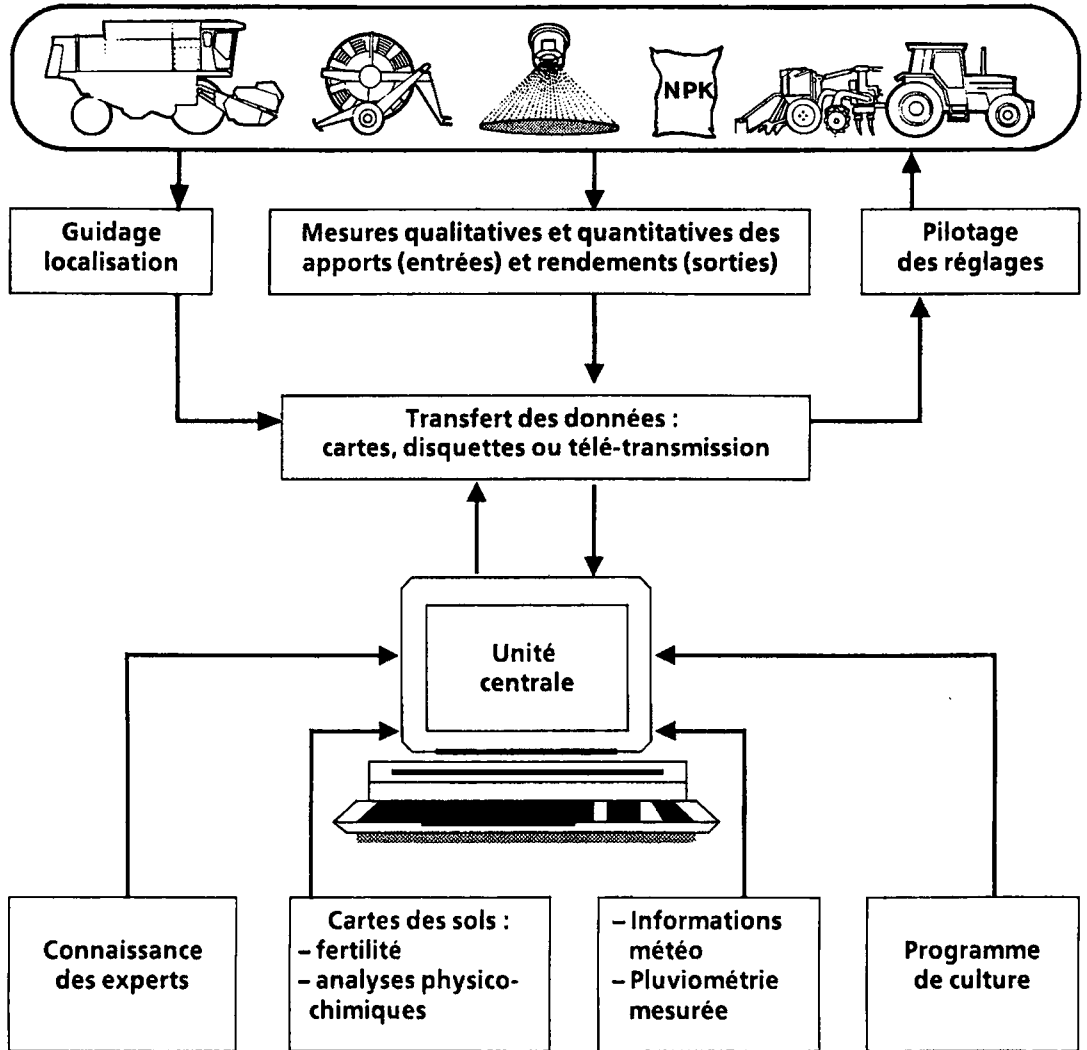


Fig. 70 - Principe de la gestion intraparcellaire

Ce concept nécessite de maîtriser la **localisation** des matériels sur les parcelles. Le terme localisation désigne l'ensemble des procédés qui permettent de mesurer et d'indiquer la position d'une machine dans une parcelle. Selon l'objectif recherché, la localisation peut être globale (à 10 mètres près) ou très précise (à 10 cm près). Selon les cas, la localisation utilise les techniques de **radio-positionnement terrestre** (balises émettrices au sol et récepteur sur la machine, ou radar embarqué et balises passives disposées au sol), des systèmes à base de laser, ou le **positionnement par satellite**, tels que le système GPS (Global Positioning System) qui fonctionne à partir d'un réseau de satellites placés en orbite par le Département américain de la Défense.

Bien qu'encore au stade de la recherche, la gestion intraparcellaire peut conduire au scénario suivant : le tracteur est équipé d'un dispositif de télélocalisation du type GPS et d'un système informatique qui détient en mémoire la carte de fertilité de la parcelle et qui est capable de communiquer avec le distributeur d'engrais attelé au tracteur par l'intermédiaire d'un réseau normalisé de transmission de données, tel le Bus CAN (Control Area Network) développé pour l'automobile. En arrivant sur une parcelle pour épandre de l'engrais, l'opérateur entre dans l'unité centrale le nom ou la référence de la parcelle, puis la séquence de fertilisation qu'il souhaite réaliser. L'ordinateur procède alors au calcul des coordonnées géographiques de la position de départ du tracteur, puis établit l'initialisation des réglages du distributeur selon les paramètres d'application souhaités et le plan cultural adopté. Au terme de cette première phase, l'épandage peut s'effectuer sous le contrôle permanent du système qui, mètre par mètre, dose l'apport d'engrais en fonction des besoins spécifiques de la zone traversée. L'identification de chaque parcelle et sa typologie peuvent être mémorisées par une « carte à puce ». Le distributeur peut être doté d'un système de reconnaissance dès sa connexion à l'unité centrale du tracteur. L'évolution de la fertilité de chaque parcelle peut être suivie à chaque intervention et au moment de la récolte afin d'actualiser sa cartographie et (ou) de disposer d'informations susceptibles d'adapter la stratégie de culture en fonction de paramètres économiques ou climatiques particuliers.

Parmi les autres scénarios, citons le Bulk Blending sur parcelle, expérimenté aux États-Unis ; ce concept est fondé sur un apport différencié des éléments nutritifs selon le potentiel de fertilité des différentes zones des parcelles. Les matériels d'épandage disposent de plusieurs trémies et d'un mélangeur piloté par le système de localisation de l'engin sur la parcelle. En fonction des informations délivrées par la cartographie, le système mélange les différents éléments NPK en respectant un dosage propre aux besoins de chaque surface à fertiliser.

LES PARAMÈTRES D'ÉPANDAGE, L'UTILISATION ET LES RÉGLAGES DES DISTRIBUTEURS D'ENGRAIS MINÉRAUX SOLIDES

4

La régularité d'épandage et le recouvrement	105
– La répartition transversale	105
– Le recouvrement avec les appareils par projection	105
– Le recouvrement avec les appareils à rampes	109
Les essais de distributeurs d'engrais minéraux	111
– Les essais en laboratoire	111
– Le principe des essais au champ	111
L'utilisation et les réglages des distributeurs par projection	116
– La distance de passage et le jalonnement des parcelles	116
– La notice d'instructions du constructeur	118
– L'attelage des appareils et la hauteur de travail	119
– Le contrôle du régime d'entraînement	120
– La largeur de travail	121
– La vérification de la largeur et du recouvrement	123
– Comment corriger les anomalies de symétrie d'épandage	125
– La vitesse d'avancement	125
– Le calcul et le contrôle du débit	126
– L'épandage en bordure de parcelle	128
L'influence de la pente des parcelles sur la qualité d'épandage	130
Douze règles pour réussir l'épandage des engrais minéraux solides ..	131

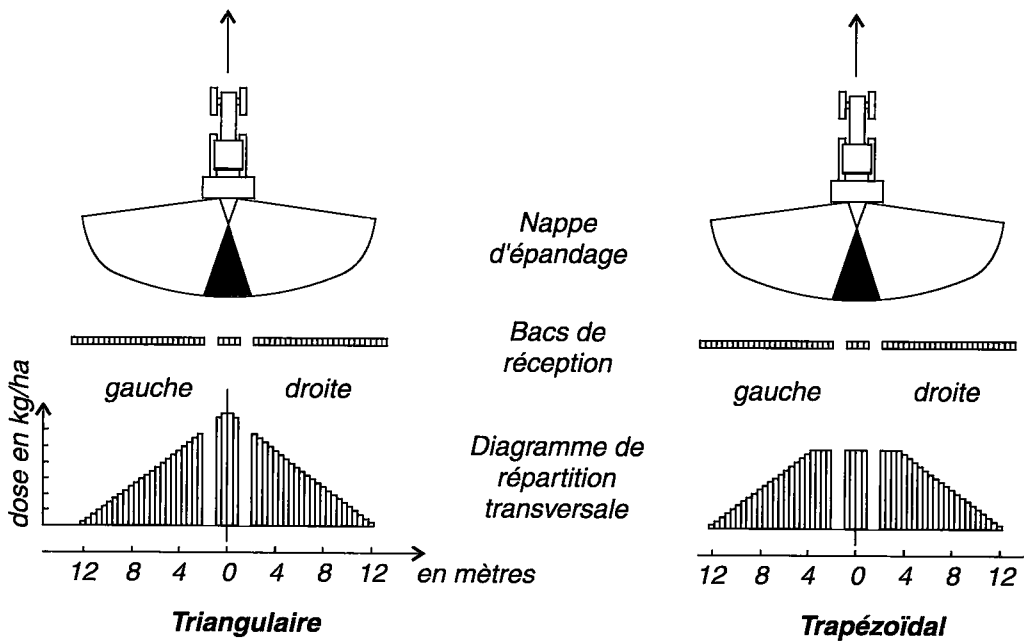


Fig. 71 - Diagrammes de répartition transversale triangulaire et trapézoïdale

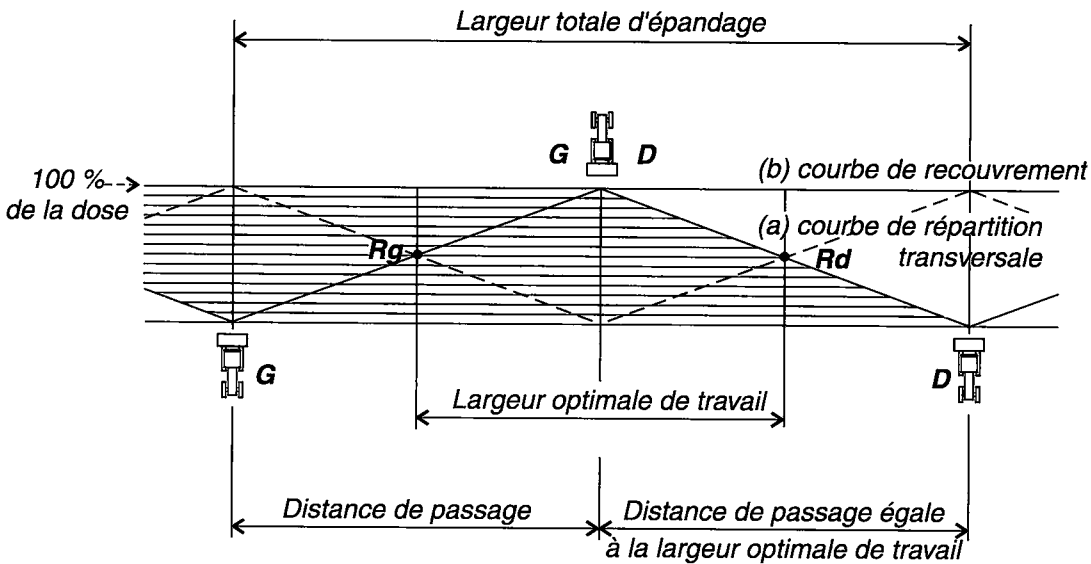


Fig. 72 - Courbe théorique de recouvrement d'un épandage à profil transversal triangulaire

LA RÉGULARITÉ D'ÉPANDAGE ET LE RECOUVREMENT

La régularité d'un épandage d'engrais se traduit par un apport constant de la dose déterminée en tout point de la parcelle supposée homogène en fertilité. Dans le sens longitudinal (selon l'axe d'avancement du tracteur), la variation de la quantité apportée est faible : elle ne dépend que de la variation de régime moteur et de la vitesse d'avancement du tracteur. Pour les appareils dont le débit est proportionnel à l'avancement (DPA), la variation longitudinale est pratiquement nulle.

Dans le sens transversal, par contre, la variabilité de la quantité distribuée peut être beaucoup plus importante. Elle dépend du mode d'épandage utilisé, de la **répartition transversale** et du **recouvrement** des passages aller-retour.

• LA RÉPARTITION TRANVERSALE

Lors de l'épandage, le ou les organes distributeurs des distributeurs d'engrais produisent une **nappe d'épandage** plus ou moins régulière. L'appréciation de cette régularité est indispensable pour juger la qualité de l'épandage et déterminer la **valeur optimale de recouvrement**. La mesure de la régularité transversale est réalisée en laboratoire (lors des mises au point initiales) ou sur une parcelle (par l'agriculteur) en recueillant l'engrais distribué par le matériel dans des bacs de récolte contigus et placés sur une ligne perpendiculaire à l'axe d'avancement. En procédant au pesage du contenu de chaque bac, il est possible de tracer un diagramme de distribution transversale. La figure 71 montre le diagramme de répartition d'un épandage par projection ; la ligne qui joint les points représentatifs des pesées forme la **courbe de répartition transversale**.

• LE RECOUVREMENT AVEC LES APPAREILS PAR PROJECTION

Selon le type d'appareil utilisé, la quantité d'engrais distribuée lors d'un passage aller peut diminuer régulièrement du centre de l'appareil vers les extrémités (courbe triangulaire de la figure 71) ou bien décroître seulement sur les extrémités (courbe trapézoïdale de la figure 71). Pour distribuer la même quantité d'engrais en tout point de la parcelle, il convient donc d'apporter au retour la dose complémentaire en recouvrant partiellement le passage aller sur une largeur plus ou moins grande. Le principe de recouvrement de l'épandage centrifuge ou pendulaire est illustré par les diagrammes de la figure 72 et de la figure 73 (appareil à courbe de répartition trapézoïdale).

Ces diagrammes montrent un **profil de répartition transversale** idéal obtenu lors d'un passage aller et la quantité d'engrais finalement épandue, compte tenu des recouvrements effectués avec les passages droit et gauche. Observons ces cas théoriques :

- **les points de recouplement gauche (Rg) et droit (Rd)** correspondent à la moitié de la dose et ils déterminent généralement la largeur optimale de travail,

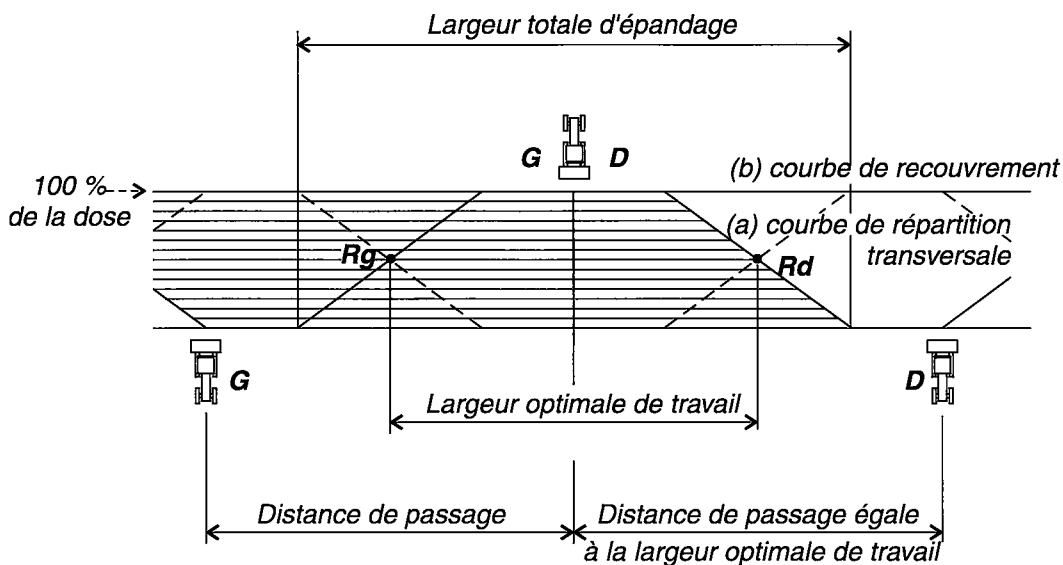


Fig. 73 - Courbe théorique de recouvrement d'un épandage à profil transversal trapézoïdal d'un distributeur par projection

- la **courbe de recouvrement** (b) est une droite horizontale qui correspond au cumul des quantités résultantes des passages aller-retour et de leur recouvrement,
- la **dose recherchée** correspond à la valeur 100 % ,
- la **largeur totale d'épandage** est égale à la distance délimitée par la portée des grains d'engrais projetés de part et d'autre par l'appareil. C'est la distance maximale qui sépare les points extrêmes de la nappe d'épandage dans le sens perpendiculaire à l'axe d'avancement,
- la **largeur optimale de travail** est la distance qui sépare les points de recouvrement gauche (Rg) et droit (Rd) situés sur une droite au niveau de la demi-dose (fig. 72 et 73). La largeur optimale de travail correspond donc à la largeur sur laquelle la quantité d'engrais répartie uniformément correspond à la dose/ha.
- la **largeur de travail** est théoriquement égale à la largeur optimale de travail (fig. 72 et 73) et correspond aussi à la distance de passage.
- la **distance de passage** (Lp) est la distance qui sépare les axes de passage aller-retour du tracteur lors de l'épandage. Elle est égale à la largeur optimale de travail.

La courbe (a) peut avoir différentes formes triangulaire (fig. 72), trapézoïdale (fig. 73), rectangulaire... La réussite des épandages d'engrais dépend de la courbe réelle de recouvrement qui doit se rapprocher le plus possible des profils théoriques. Cette courbe peut être calculée et tracée à partir des valeurs de **répartition transversale** ; elle peut aussi être mesurée en

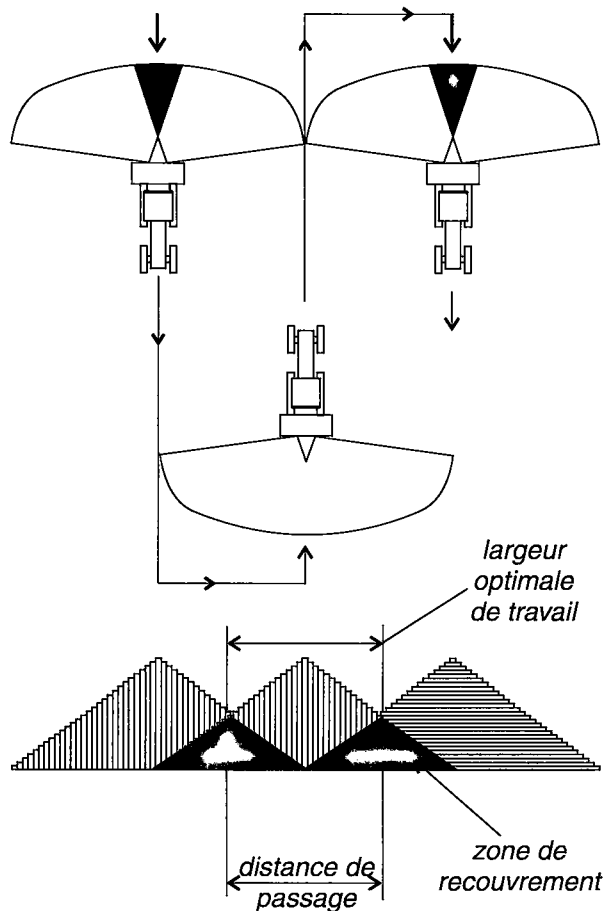
récoltant l'engrais épandu dans des bacs contigus placés sur une ligne perpendiculaire à l'axe d'avancement sur toute la largeur (se reporter, dans ce chapitre, à la partie « *les essais de distributeurs d'engrais minéraux solides* »). Le cumul des poids obtenus entre un passage aller et un passage retour donne le **diagramme de recouvrement** à partir duquel on peut tracer la **courbe de recouvrement**.

En pratique, la bonne répartition de l'engrais sur le terrain dépend de la bonne **symétrie droite-gauche** de la nappe d'épandage, du bon **parallélisme des passages** et de la régularité des trajectoires des grains d'engrais afin d'obtenir au travail une courbe de recouvrement quasiment horizontale.

– un **recouvrement correct** (distance de passage égale à la largeur optimale de travail) se traduit par une courbe de recouvrement linéaire (fig. 72 et 74) et une dose également répartie avec une valeur du coefficient de variation (CV) la plus faible possible,

– un **recouvrement excessif** (distance de passage inférieure à la largeur optimale de travail) se traduit par une courbe de recouvrement non linéaire (fig. 75) et un **sur-dosage** dans les zones de recouvrement,

– un **recouvrement insuffisant** (distance de passage supérieure à la largeur optimale de travail) se traduit par une courbe de recouvrement non linéaire (fig. 76) et un **sous-dosage** dans les zones de recouvrement.



Le coefficient de variation de la courbe de recouvrement (CV) permet d'apprécier l'incidence d'un recouvrement imparfait : plus le recouvrement est excessif ou insuffisant (surdosage ou sous-dosage entre les passages), plus le coefficient (CV) est élevé. Il s'exprime en pourcentage par l'équation :

$$CV = (\sigma / x) \times 100$$

Fig. 74 - Profil de recouvrement triangulaire correspondant à une distance de passage correcte

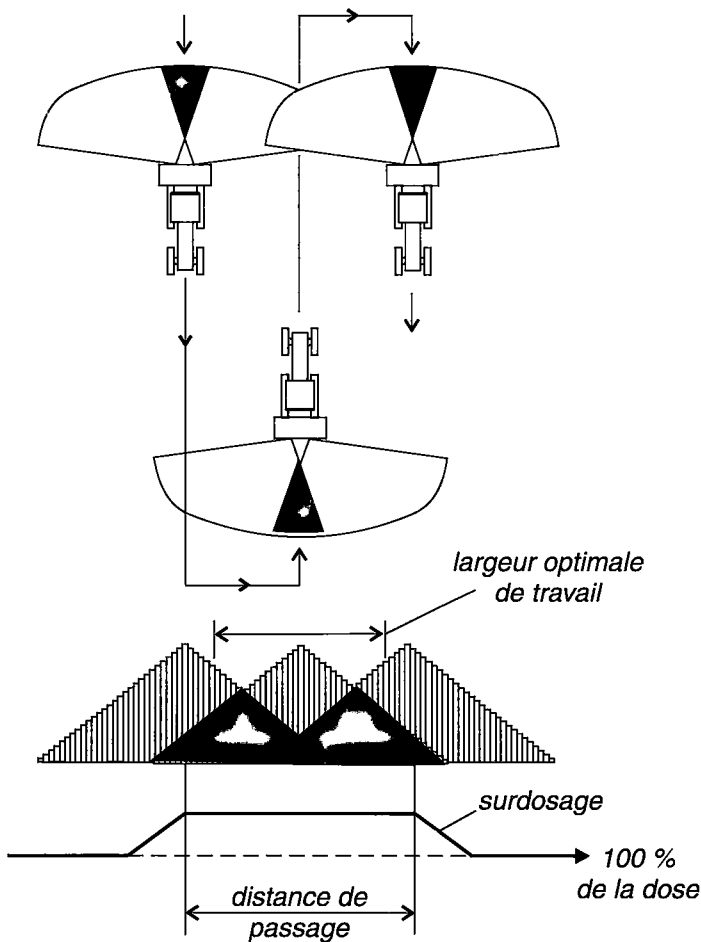


Fig. 75 - Profil de recouvrement triangulaire correspondant à une distance de passage insuffisante

essais sur culture avec des appareils connus ont montré des coefficients de variation plus élevés qu'en laboratoire. Ces études permettent d'établir le barème d'efficacité suivant :

- un CV compris entre 0 et 15 % correspond à une qualité d'épandage très bonne à bonne,
- un CV compris entre 15 et 25 % correspond à une qualité d'épandage satisfaisante à moyenne,
- un CV supérieur à 25 % correspond à une mauvaise qualité d'épandage, à éviter.

Lorsque le coefficient de variation (CV) atteint ou dépasse 20 à 25 % sur parcelle, l'épandage présente des risques pour l'environnement (pollution des eaux) et induit des pertes économiques (rendement, verse et engrais gaspillé).

σ = écart-type donné par l'équation :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

dans laquelle :

- n est le nombre de bacs sur la largeur de travail ;
- x_i est la quantité recueillie dans chaque bac après recouvrement ;
- \bar{x} est la moyenne absolue des quantités recueillies $\bar{x} = (1/n) \sum x_i$.

Au banc d'essais, un CV compris entre 0 et 10 % correspond à une qualité d'épandage de très bonne à bonne, un CV compris entre 10 et 15 % correspond à une qualité d'épandage de satisfaisante à moyenne, un CV compris entre 15 et 20 % correspond à une mauvaise qualité d'épandage à éviter et un CV supérieur à 20 % est à proscrire.

A partir de nombreux essais réalisés par le Cemagref au banc du laboratoire de Montoldre (Allier) et d'une expérimentation menée en 1990 sur la verse des céréales, **les**

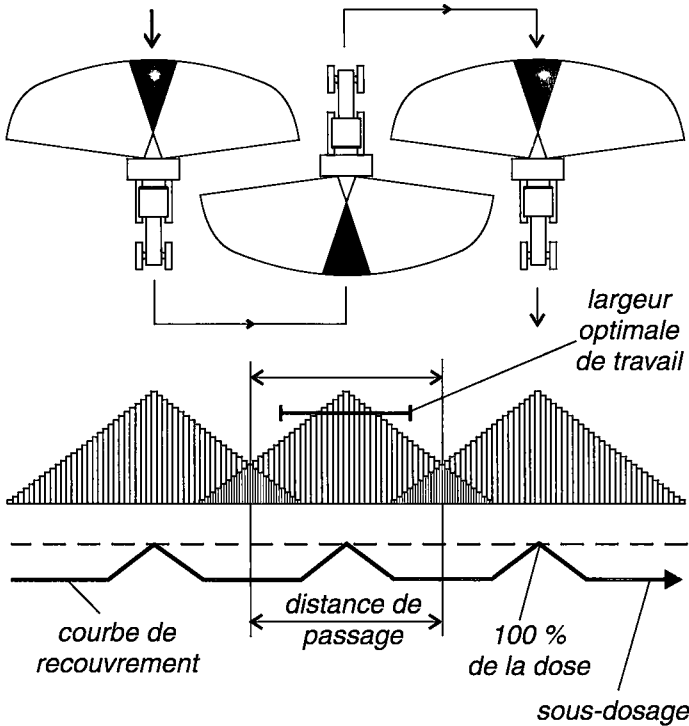


Fig. 76 - Profil de recouvrement triangulaire correspondant à une distance de passage trop grande

Pour un même réglage, chaque variation de la distance de passage correspond à un coefficient de variation différent. La figure 77 montre la courbe de variation d'un appareil capable d'épandre sur une largeur de 32 mètres, mais dont la largeur optimale est de 24 mètres. Le diagramme montre, dans ce cas, que la largeur optimale de travail correspond à une distance de passage présentant un faible coefficient de variation, pratiquement constant, dans ce cas, entre 23 et 26 mètres. Le diagramme permet également d'apprécier la sensibilité de l'appareil aux erreurs de réglages ou de jalonnement. Si la largeur de travail de l'appareil est réglable, on peut adapter la largeur optimale de travail à la distance de passage.

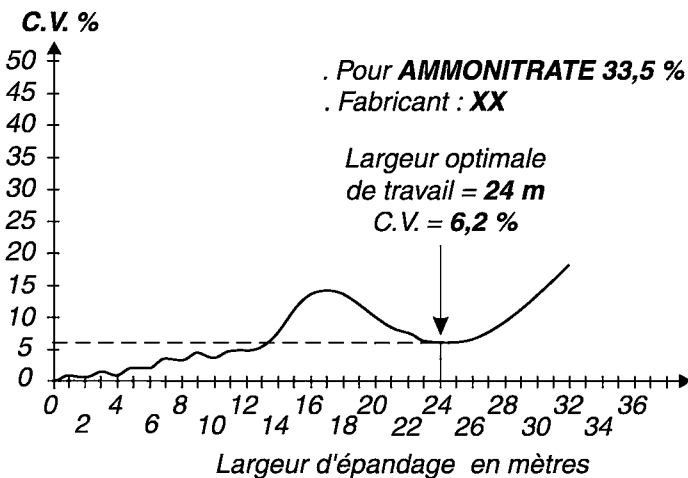


Fig. 77 - Détermination de la largeur optimale de travail d'après la courbe du coefficient de variation, pour un engrais donné

• LE RECOUVREMENT AVEC LES APPAREILS À RAMPES

Les distributeur d'engrais à rampes épandent, en un seul passage, sur une largeur totale d'épandage très proche de la largeur optimale de travail. La quantité d'engrais distribuée lors d'un passage aller est homogène et uniforme sur la majeure partie de la rampe et décroît rapidement aux deux extrémités de celle-ci.

Pour distribuer la même quantité d'engrais en tout point de la parcelle, il est nécessaire de

respecter rigoureusement une distance de passage égale à la largeur de travail. Pour les appareils pneumatiques, il se produit un léger recouvrement uniquement aux extrémités des nappes d'épandage qui compense la décroissance d'apport en bout de rampe .

Sur le diagramme de répartition transversale d'un distributeur pneumatique (fig. 78), la courbe (a) représente la quantité d'engrais obtenue à l'épandage après un passage aller ; tandis que la courbe (b) montre la quantité cumulée (en % de la dose recherchée) obtenue après le passage retour, compte tenu des recouvrements effectués sur les côtés droit et gauche.

La régularité de la distribution transversale se juge par la forme plus ou moins régulière de la courbe cumulée, que l'on traduit mathématiquement par le coefficient de variation (CV); plus la courbe se rapproche d'une droite horizontale, plus faible est la valeur du coefficient de variation et meilleure est la régularité de la répartition.

Avec les appareils à rampes, la dose étant apportée en un seul passage, les conséquences d'une largeur de passage incorrecte sont très importantes :

- si la distance de passage est inférieure à la largeur de travail, on observe une valeur élevée du coefficient de variation et un **surdosage pouvant atteindre 200 %** dans la zone de recouvrement (fig. 78). **Ceci montre à l'évidence l'importance d'un jalonnement précis !**
- si la distance de passage est supérieure à la largeur de travail, on observe un **sous-dosage** important (voire un apport pratiquement nul) dans la zone non recouverte.

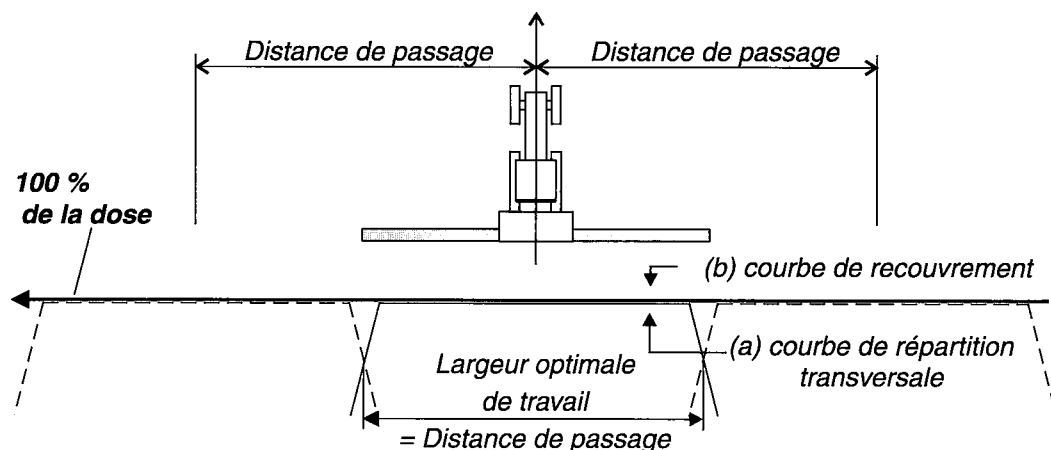


Fig. 78 - Courbe théorique de recouvrement d'un distributeur à rampes à profil transversal trapézoïdal

LES ESSAIS DE DISTRIBUTEURS D'ENGRAIS MINÉRAUX

Les essais de distributeurs d'engrais sont réalisés en laboratoire pour la mise au point des appareils et la définition de leurs réglages selon la nature des produits, et sur le terrain pour les matériels en service.

• LES ESSAIS EN LABORATOIRE

Les essais des distributeurs sont indispensables aux constructeurs pour évaluer l'efficacité des matériels et recueillir les données nécessaires à la définition des réglages selon les produits à épandre. Ces **essais de qualification et de réglages des modèles de série** se pratiquent en appliquant des protocoles assez lourds (banc d'essais couverts, appareils de mesures, logiciels spécialisés, respect de normes d'essais...) mis en œuvre par des instituts de recherche comme le Cemagref (fig. 79) ou par les laboratoires des constructeurs ; les mesures effectuées doivent être précises et reproductibles.



Fig. 79 - Laboratoire du Cemagref pour les essais de distributeurs d'engrais (photo Cemagref)

• LE PRINCIPE DES ESSAIS AU CHAMP

Pour les matériels en service, il est possible de réaliser des **essais sur le terrain** (fig. 80) en pratiquant soit la méthode de collecte d'engrais sur toute la largeur de travail des distributeurs (méthode utilisée pour les recherches *in situ*, les démonstrations et les essais réalisés par les structures de conseils...), soit en appliquant une méthode simplifiée à trois ou quatre bacs, plus à la portée des agriculteurs pour procéder aux contrôles de leur matériel (se reporter dans ce chapitre à la partie « *la vérification de la largeur effective de travail* »).

Ces méthodes de contrôle au champ n'ont pas pour but de vérifier les résultats acquis au banc d'essai. Elles apportent la possibi-



Fig. 80 - Essai au champ d'un distributeur d'engrais, en premier plan la ligne des bacs récepteurs d'engrais (photo Cemagref)

lité d'ajuster, en fonction de la nature de l'engrais, la largeur optimale de travail par rapport à la distance de passage souhaitée et de vérifier que l'appareil ne comporte pas de défauts liés à l'usure, à une pièce défectueuse ou faussée.

La réalisation de ces essais nécessite les conditions suivantes :

- choisir un terrain plat, uniforme (les bacs doivent être posés à plat) et souple pour éviter les rebonds de l'engrais du sol vers les bacs,
- étant donné que l'engrais ne peut être récupéré, il convient de choisir une parcelle dont l'exploitation permet d'absorber le type d'engrais apporté par l'essai et de changer de surface d'essai pour éviter toute pollution,
- opérer par temps sec en l'absence de vent,
- utiliser des bacs identiques (fig. 81) acquis auprès des constructeurs ou des fabricants d'engrais. En général, les bacs sont en plastique, empilables et de dimensions 50 cm x 50 cm x 10 à 15 cm de hauteur. Ils possèdent des croisillons pour limiter les rebonds des grains d'engrais (norme NFU 23-11 1),

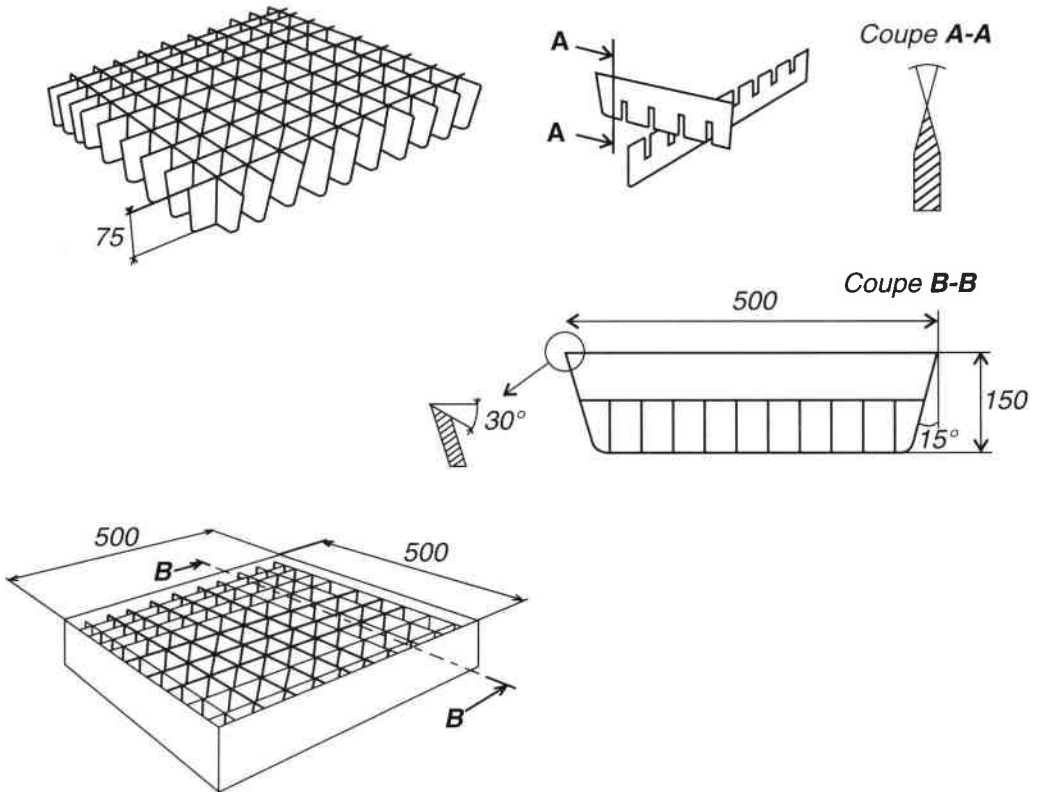


Fig. 81 - Schéma d'un bac de réception pour les essais de distributeurs d'engrais

- vérifier le fonctionnement des trappes de dosage du distributeur (ouverture, fermeture, synchronisation),
- vérifier la vitesse de rotation de la prise de force,
- vérifier la vitesse d'avancement sur le champ avec l'appareil rempli à moitié (pour tenir compte du patinage et de l'écrasement des pneumatiques),
- lors du test, avant le passage au-dessus des bacs, ouvrir le débit suffisamment tôt et le refermer suffisamment tard afin d'être sûr que toute la nappe d'épandage a bien couvert l'aire mesurée,
- faire plusieurs passages si la dose est très faible afin d'obtenir une précision suffisante des pesées,
- si l'essai se fait avec des passages aller-retour, passer à la même vitesse au retour qu'à l'aller,

La répartition transversale est analysée en disposant au sol une ligne continue de bacs perpendiculaire à l'axe d'avancement du tracteur en aménageant de chaque côté de l'axe d'avancement un passage pour les roues du tracteur.

Les bacs doivent être identiques et placés au sol de façon contiguë, sur une largeur au moins égale à 1,5 à 2 fois la largeur de travail de l'appareil à étudier. Pour compenser l'absence de bacs au niveau des passages de roues, des valeurs intermédiaires sont prises entre les bacs G1 et G4 ; la figure 82 montre deux modes de disposition des bacs au sol.

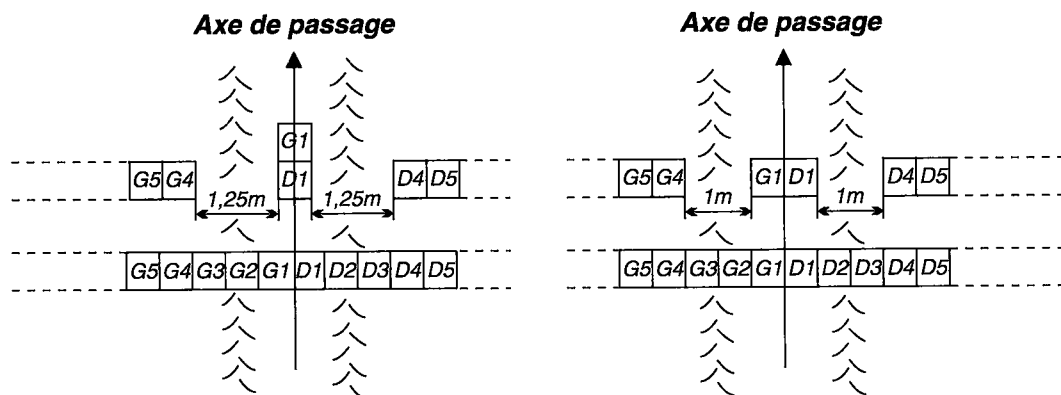


Fig. 82 - Deux exemples de répartition au sol des bacs de réception dans la zone des passages de roues

Après un passage au-dessus des bacs en épandant, le contenu de chaque bac est versé dans un gobelet numéroté de manière distinctive pour le côté gauche, comme pour le côté droit (autant de gobelets que de bacs). Les gobelets doivent être identiques pour avoir le même poids unitaire (tare).

L'engrais contenu dans chaque gobelet est pesé à l'aide d'une balance de précision, car les quantités d'engrais contenues dans chaque bac de réception sont faibles, surtout dans les bacs les plus éloignés de l'axe de passage.

Les différents poids d'engrais recueillis permettent de tracer le diagramme de distribution. La ligne qui joint les points représentatifs des poids d'engrais est la courbe de répartition transversale avec laquelle il est facile d'obtenir la courbe de recouvrement (voir fig. 83 et 84).

Attention, le poids d'engrais recueilli sur la surface continue des bacs ne peut pas être valablement exploité pour le calcul de la dose/ha, car une partie des grains d'engrais rebondit vers l'extérieur des bacs de réception (parfois jusqu'à 20 à 30 %) et échappe ainsi à la pesée. Cela dit, l'expérience de nombreux essais montre que ces rebondissements affectent très peu les courbes de répartition transversale et de recouvrement.

Les essais permettent essentiellement de connaître la **répartition transversale**, le **recouvrement** et le **calcul du coefficient de variation**.

La figure 84 montre que le diagramme théorique de répartition « retour » (a') présente une géométrie strictement complémentaire (forme identique géométriquement inversée) à celle du diagramme « aller » (a). Les points de la courbe de recouvrement correspondent aux sommes des pesées $a_1 + a'_{14}$, $a_2 + a'_{13}$, $a_3 + a'_{12}$, $a_4 + a'_{11}$... Selon le même principe, la figure 85 montre l'incidence d'un jalonnement trop espacé avec les conséquences du recouvrement insuffisant sur la courbe de recouvrement.

Pour la vérification de la largeur d'épandage et du recouvrement, il est possible d'utiliser une méthode simplifiée et rapide nécessitant seulement trois ou quatre bacs (se reporter dans ce chapitre à la partie consacrée à « la vérification de la largeur de travail et du recouvrement »).

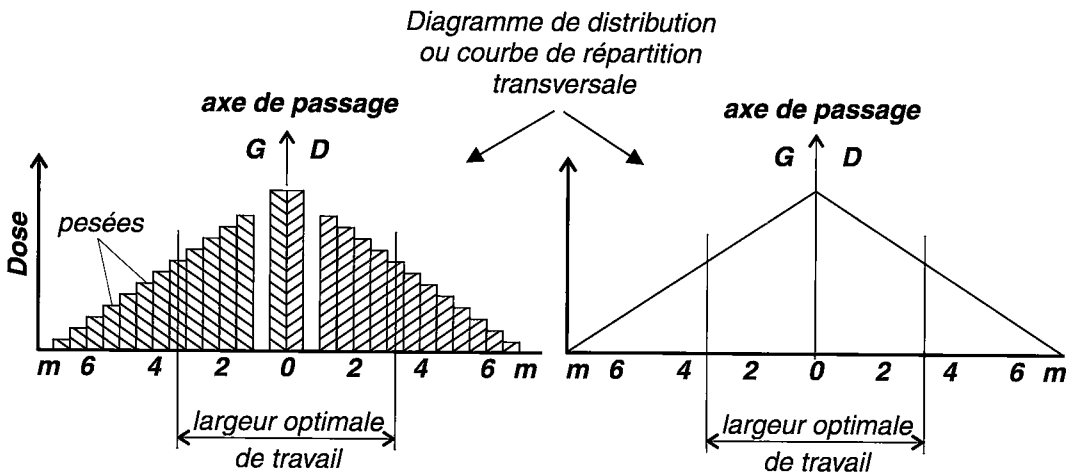


Fig. 83 - Exemple d'un diagramme de répartition transversale avec les passages de roues

Fig. 84 - Courbe d'un recouvrement correct et représentation des pesées aller-retour pour le côté gauche de l'aire d'épandage

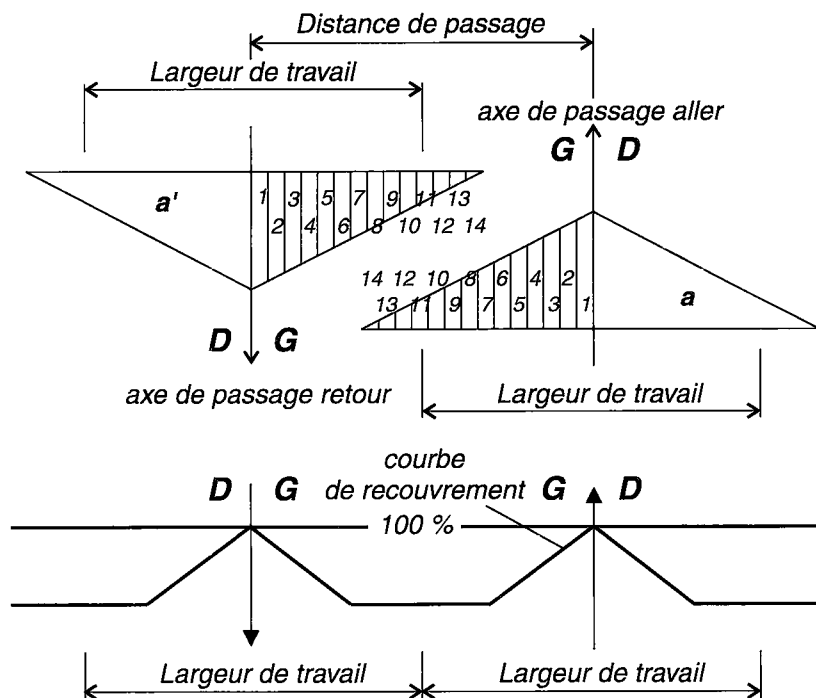
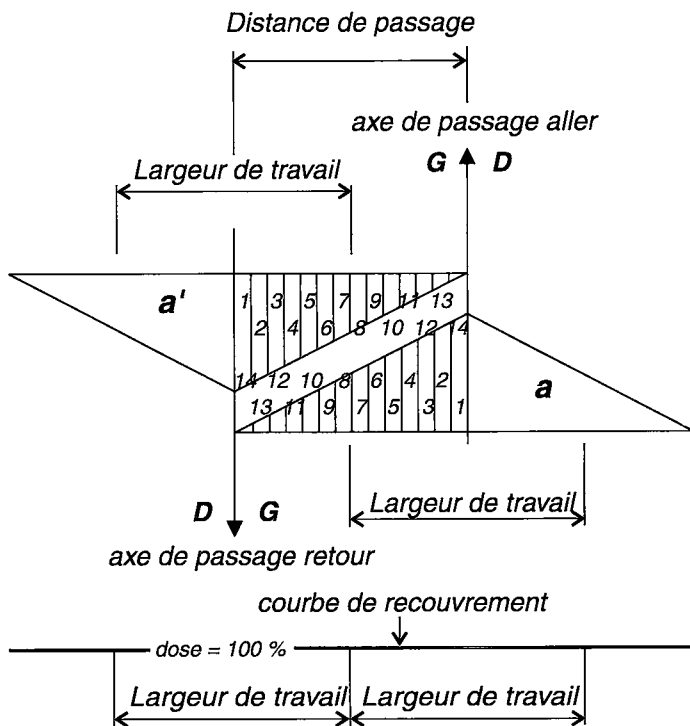


Fig. 85 - Courbe d'un recouvrement insuffisant et représentation des pesées aller-retour pour le côté gauche de l'aire d'épandage

L'UTILISATION ET LES RÉGLAGES DES DISTRIBUTEURS PAR PROJECTION

• LA DISTANCE DE PASSAGE ET LE JALONNEMENT DES PARCELLES

La distance de passage est en pratique la distance qui sépare deux passages aller-retour. Cette distance de passage doit être égale à la largeur optimale de travail pour avoir un bon recouvrement et un épandage régulier (fig. 72, 73 et 74). Seul un **jalonnement exact** permet de conserver la bonne distance de passage établie selon la largeur optimale de travail et les réglages indiqués par la notice d'instructions du constructeur de l'appareil ; si la distance de passage est inférieure à la largeur optimale de travail, la dose augmente ; si la distance de passage est supérieure à la largeur optimale de travail, la dose diminue dans la zone de recouvrement.

L'erreur de jalonnement est grave ; elle modifie la largeur de passage et peut donc être à l'origine de surdosage ou de sous-dosage (fig. 75 et 76). Rappelons que le surdosage est dommageable, car il peut entraîner un risque de verse et de pollution et que le sous-dosage est une cause de baisse de rendement.

L'épandage sans jalonnement doit être proscrit et le jalonnement au pas est la source de nombreuses erreurs.

Des essais réalisés par le Cemagref (Analyse des pratiques d'épandage, départements de l'Allier et du Puy-de-Dôme, se reporter à l'annexe documentaire : LE DU J.) ont permis de mesurer l'incidence des méthodes de jalonnement sur la précision des passages :

- sans jalonnement (10 % des cas analysés), l'erreur moyenne dans le champ est de 1 m,
- avec jalonnement au pas (29 % des cas analysés), l'erreur moyenne est de 0,68 m,
- avec jalonnement au pentadécamètre (50 m) (20 % des cas analysés), l'erreur moyenne est de 0,37 m,
- avec jalonnement combiné au semoir (41 % des cas analysés), l'erreur moyenne est de 0,27 m.

Les méthodes de jalonnement les plus utilisées sont les suivantes :

- **sur terrain nu ou prairie**, on pratique le jalonnement en arpentant la parcelle avec un pentadécamètre (50 mètres), et trois lignes de jalons ou plus selon le relief du terrain.
- **lors d'un semis** avec un semoir en lignes, on peut procéder à un **jalonnement de pré-levée** ou à un **jalonnement de post-levée** :

– le **jalonnement de prélevée** est réalisé avec des semoirs munis de traceurs (à disques le plus souvent) qui sont abaissés régulièrement (manuellement ou automatiquement) pour tracer sur le sol des petits sillons visibles après le semis jusqu'à la couverture du sol par les plantes. Ces sillons sont espacés de la largeur de la voie du tracteur et tracés selon une cadence et un intervalle correspondant à la largeur de travail des matériels d'épandage et de traitement (fig. 86). Après la levée de la culture, le jalonnement peut être mémorisé par les traces de roues ou, si l'on a eu soin de repérer ces traces, avec des jalons. Le mieux, pour les céréales, est de compléter le jalonnement de prélevée par un jalonnement de post-levée.

– le **jalonnement de postlevée** peut être réalisé seul ou en complément du jalonnement de prélevée en laissant périodiquement (fig. 87) des intervalles non semés ; ces intervalles se situent aux mêmes endroits que les traces des jalonneurs de prélevée et consti-

<i>Largeur du semoir</i>	<i>Largeur de passage des matériels de fertilisation et de traitement</i>	<i>Cadence de jalonnement (n passages)</i>
<i>3 mètres</i>	9	3
	12	4
	18	6
	24	8
<i>4 mètres</i>	12	3
	16	4
	20	5
	24	6
	32	8
<i>6 mètres</i>	12	2
	18	3
	24	4
	30	5

Fig. 86 - Cadences de jalonnement en fonction de la largeur des semoirs et de la largeur de passage des appareils de fertilisation et de traitement

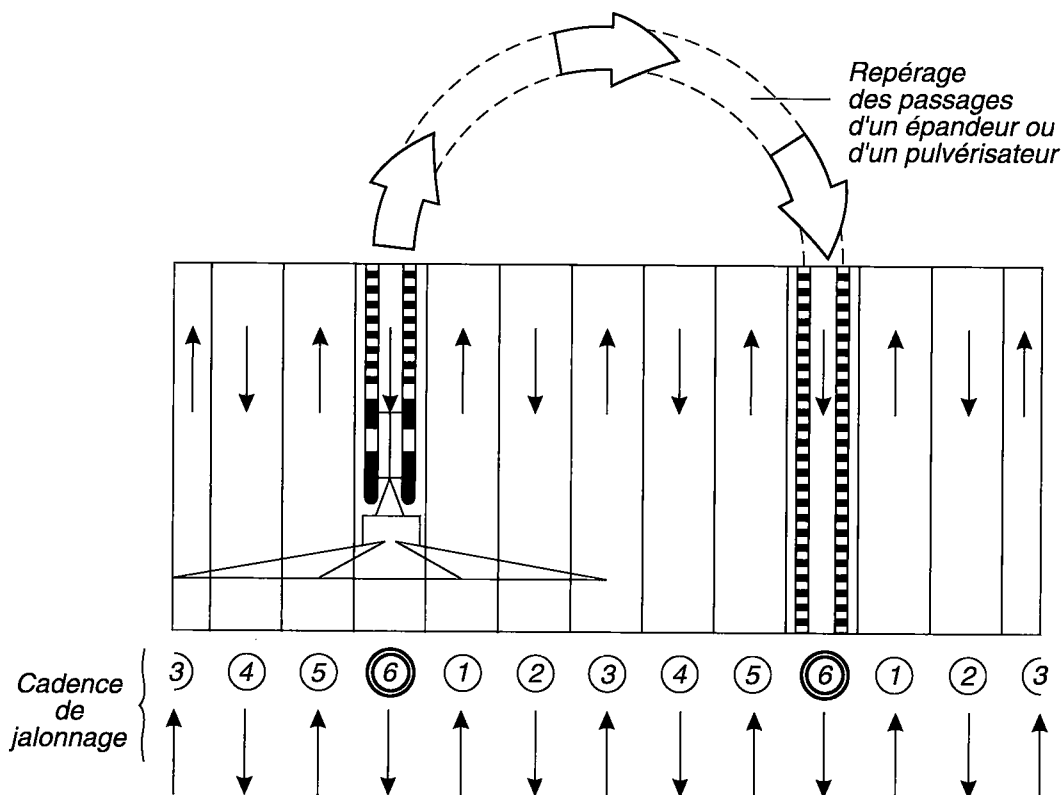


Fig. 87 - Exemple de jalonnage de prélevée et de postlevée avec un semoir de 4 mètres et un distributeur de 24 mètres (cadence de jalonnement)

tuent des marques visibles pendant toute la croissance de la végétation. Dans le cas le plus simple, on opère manuellement en fermant tous les « n » passages l'alimentation d'un ou de deux distributeurs de graines par trace de roue. Les semoirs peuvent aussi être équipés de distributeurs de graines à débrayage commandé manuellement ou automatiquement depuis le poste de conduite. Ces rangs non semés ne constituent pas une perte significative de rendement des parcelles puisque, de toute façon, les passages de roues des engins ne permettraient pas à la végétation de se développer normalement à cet endroit.

• LA NOTICE D'INSTRUCTIONS DU CONSTRUCTEUR

La notice d'instructions est le document de référence pour les utilisateurs de distributeurs d'engrais ; en plus de sa fourniture obligatoire, conformément aux dispositions réglementaires d'hygiène et de sécurité (code du travail) et aux mesures de protection de l'environnement, cette notice indique à l'utilisateur les informations nécessaires pour :

- adopter les réglages les plus pertinents selon la nature de l'engrais à appliquer,
- conserver les caractéristiques initiales de l'appareil,
- maintenir le matériel en parfait état de marche,
- prévenir les anomalies d'application et les surdosages.

Si l'utilisateur ne dispose pas de la notice d'instructions, il doit la demander au concessionnaire ou au constructeur. En cas de manque d'informations ou de doute sur la qualité de l'épandage, ne pas hésiter à procéder aux réglages de base : **attelage, régime de prise de force, largeur réelle de travail, vitesse d'avancement, débit...**

• L'ATTELAGE DES APPAREILS ET LA HAUTEUR DU TRAVAIL

D'une manière générale, les règles d'attelage consistent à assurer le positionnement par rapport au tracteur et la hauteur des organes d'épandage par rapport au sol, tout particulièrement pour les matériels portés.

Les principales règles pour l'attelage des appareils portés peuvent être résumées de la manière suivante :

- régler les chandelles de l'attelage trois points pour obtenir une bonne horizontalité (par rapport au sol) dans le sens transversal (gauche-droite) ;
- régler la hauteur du distributeur par rapport au sol (fig. 88) ou, selon les cas, au-dessus de la végétation (de 0,70 m à 0,80 m environ) en tenant compte de l'enfoncement des pneumatiques dans le sol ;

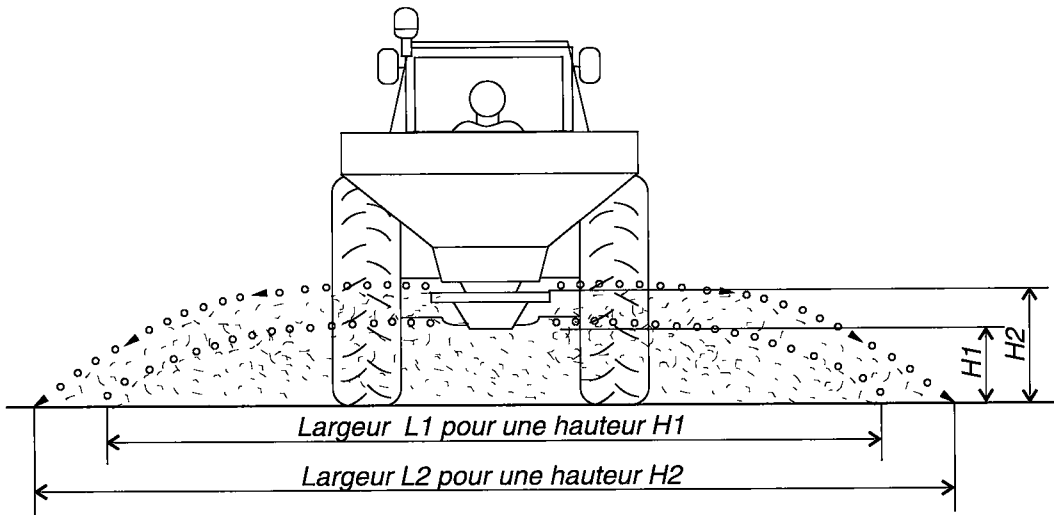


Fig. 88 - Influence de la hauteur d'attelage sur la largeur d'épandage

– régler le troisième point de l'attelage afin que l'appareil, une fois chargé, soit horizontal (par rapport au sol) ou à l'inclinaison préconisée dans le sens avant-arrière (fig. 89). **Attention, la position des appareils attelés influe sur la largeur d'épandage et la symétrie de la répartition. Respecter la valeur de hauteur spécifiée par le constructeur, ainsi que l'inclinaison longitudinale pour les matériels qui le nécessitent.**

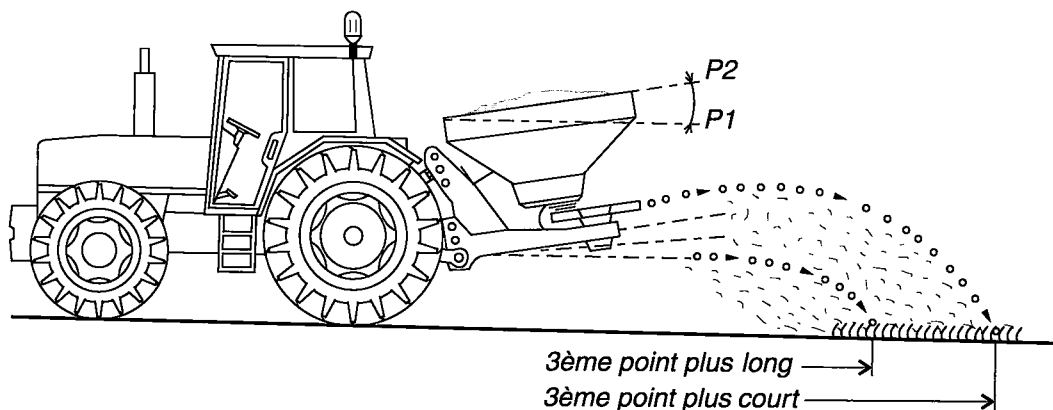


Fig. 89 - Influence de l'inclinaison longitudinale d'un distributeur centrifuge sur la portée et la largeur de la nappe d'épandage

• LE CONTRÔLE DU RÉGIME D'ENTRAÎNEMENT

Le régime de prise de force indiqué par le constructeur du distributeur d'engrais doit être scrupuleusement respecté. Si l'appareil ne dispose pas d'un indicateur de régime des disques, il convient de vérifier les indications du compte-tours du tableau de bord du tracteur en comparant son affichage avec un tachymètre mesurant directement le régime de la prise de force. En cas d'écart significatif, noter les valeurs de correspondance ou, si possible, faire régler (ou remplacer) le compte-tours du tracteur.

Pour les systèmes distributeurs d'engrais dont les organes de distribution sont animés par des moteurs hydrauliques :

- respecter les préconisations du constructeur à propos du raccordement des conduites hydrauliques au tracteur et du réglage du **régulateur de débit**. Faire contrôler périodiquement le régime de rotation du ou des moteurs hydrauliques d'épandage,
- s'assurer, surtout avant une première utilisation tracteur-outil, que la pression et le débit d'huile fournis par le système hydraulique du tracteur soient suffisants (contrôle avec un manomètre et un débitmètre).

• LA LARGEUR DE TRAVAIL

Il existe des appareils à **largeur de travail fixe** et des appareils à **largeur de travail réglable** :

– les appareils à largeur de travail fixe :

Par construction, ces matériels ne présentent pas de réglage particulier de leur largeur de travail ; cette disposition n'est pas sans conséquences pour l'épandage de produits ayant des caractéristiques physiques variées. Par exemple, un distributeur donné pour une largeur de travail de 9 mètres pour l'épandage d'urée 46 % perlée, peut travailler dans les mêmes conditions avec une largeur de 12 mètres avec de l'ammonitrate 33,5 % granulé !

L'utilisation des appareils à largeur de travail fixe (sans réglage) nécessite donc de connaître la largeur optimale de travail à observer pour chaque type d'engrais à épandre et d'adapter la largeur de passage en conséquence. Le risque de surdosage est important si la largeur de passage est prédéfinie par le jalonnement. Etant donné que l'on ne peut pas changer constamment la distance de passage, ni même la faire varier de 1 ou 2 m, on ne peut finalement agir que sur le positionnement du distributeur (hauteur et inclinaison) en prenant soin de respecter la notice d'utilisation et de procéder à un contrôle du résultat (se reporter au paragraphe suivant : « *la vérification de la largeur et du recouvrement* »).

Les appareils centrifuges à largeur de travail fixe sont sensibles au phénomène appelé « **effet dose** », qui se traduit par une largeur de travail qui tend à varier lorsque le débit augmente.

– les appareils à largeur de travail réglable :

Ces matériels présentent des systèmes de modification de la largeur d'épandage (pales interchangeables, pales réglables, vitesse variable, modification du point de chute...) qui autorisent de multiples combinaisons :

- appliquer un engrais de caractéristiques physiques déterminées à une valeur donnée de largeur de travail optimale,
- modifier la largeur de travail optimale pour un engrais donné,
- adapter la largeur de travail optimale à différents engrais de caractéristiques physiques différentes.

Afin de tirer avantage de ce réglage de largeur, il est indispensable de connaître, pour chaque matériel et pour chaque catégorie d'engrais, la largeur de passage souhaitée et les réglages à réaliser en se reportant à la notice d'instructions et en procédant à des vérifications de largeur au champ.

L'influence de la position des distributeurs portés sur la largeur de travail peut être résumée de la manière suivante :

- **si l'on modifie l'inclinaison avant/arrière de l'appareil**, on change la largeur de travail et la forme de la courbe de répartition sans toutefois changer la largeur totale de projection (fig. 89),

- **si l'on augmente ou diminue la hauteur par rapport au sol** (fig. 88) avec un appareil dont la courbe est régulière, on augmente ou on diminue la largeur de travail,
- **si l'on réduit le régime de rotation des disques** soit par un sélecteur de vitesse (si l'appareil en dispose), soit en faisant varier le régime de rotation de la prise de force (dans les limites permises par le constructeur), on peut réduire la largeur de travail des appareils qui ont une courbe régulière. Précisons que (sauf indication contraire du constructeur), on ne peut faire l'inverse, c'est-à-dire augmenter la vitesse sans risque de dégradation des organes de transmission de l'appareil et des caractéristiques physiques de l'engrais. L'incidence du régime de rotation des disques sur la largeur de travail étant importante, il convient de veiller à maintenir cette vitesse la plus constante possible, notamment dans les parcelles en pentes, afin de prévenir les variations de largeur et de dose entre les montées et descentes.

L'explication des autres facteurs (point de chute, forme des pales...) pouvant influencer sur la largeur de travail est donnée au chapitre 3 : « *les distributeurs d'engrais minéraux solides* » voir partie consacrée aux « *paramètres dynamiques et mécaniques de l'épandage centrifuge* ».

Attention ! pour respecter la dose/ha souhaitée, il ne faut pas oublier que toute modification de la largeur de travail implique un ajustement du débit pour conserver la relation $D = Q.L.V / 600$.

D'une manière générale, les difficultés tendent à augmenter si on utilise :

- **des engrais peu denses** avec lesquels on veut épandre sur une largeur trop importante (l'énergie des grains n'est pas suffisante pour atteindre cette largeur), c'est le cas avec l'urée perlée par exemple ;
- **des engrais compactés**, dont l'aspect physique et la mauvaise pénétration dans l'air sont défavorables,
- **des engrais assez denses et rugueux** avec lesquels on épand pas assez large (avec certains engrais binaires et complexes par exemple),
- **des appareils anciens** dont les livrets d'entretien et d'utilisation ne sont pas à jour du fait de l'évolution des technologies de fabrication des engrais. Dans ce cas, l'utilisation d'un granulomètre de poche peut aider à juger de la qualité physique d'un engrais et à ajuster le réglage du distributeur (se reporter au chapitre 2 : la distribution granulométrique).

Dans certains cas, pour un appareil et une distance de passage donnés, la nature de l'engrais ne permet pas un épandage convenable... ; seul un changement de technique peut permettre de résoudre le problème ! Prenons un exemple : si le distributeur ne permet pas d'épandre de l'urée correctement avec un intervalle de passage de 28 mètres, on peut choisir une largeur sous-multiple de 28 : soit 14 mètres par exemple (si l'appareil permet ce réglage),

- **pour les appareils à tube oscillant**, la largeur de travail souhaitée est obtenue en adoptant un tube d'épandage de longueur appropriée et en réglant le débattement du tube oscillant

avec une clé spéciale. En augmentant la hauteur par rapport au sol ou en augmentant le régime de la prise de force, on augmente la largeur de travail et inversement. Tout changement des paramètres de fonctionnement doit s'effectuer dans les limites permises par le constructeur et s'accompagner d'un contrôle.

• LA VÉRIFICATION DE LA LARGEUR ET DU RECOUVREMENT

La vérification de la largeur effective d'épandage doit être pratiquée pour affiner les indications des tableaux de réglage fournis par les constructeurs. Elle doit être répétée à chaque changement de nature d'engrais et à chaque modification de réglage de l'appareil.

Cette vérification consiste à réaliser au champ un test d'épandage sur des bacs de réception (trois, quatre ou plus selon la largeur). On utilise des bacs cloisonnés (fig. 81) et des éprouvettes graduées (ces matériels de test peuvent être fournis en kit par les constructeurs, les sociétés de distribution ou les services de développement). Le but du test consiste, d'une part, à vérifier pour chaque type de produit que les réglages utilisés correspondent effectivement à la largeur de passage pratiquée et, d'autre part, que la symétrie d'épandage (droite-gauche par rapport à l'avancement) est correcte.

Parmi les différentes séquences de contrôle qui peuvent être appliquées, citons **le test de recouvrement sur une demi-largeur latérale** et **le test de recouvrement et de symétrie sur la largeur de travail**.

– **le test de recouvrement sur une demi-largeur latérale** (cas 1 et 2 de la fig. 90) :

Les bacs sont répartis au sol à intervalles réguliers sur une demi-largeur latérale de travail. L'essai consiste à effectuer un trajet aller en épandant au-dessus des bacs sur une demi-largeur d'épandage, puis un trajet retour à la distance de passage souhaitée pour effectuer le recouvrement.

Le contenu de chaque bac est alors versé dans une éprouvette graduée afin de comparer la hauteur de l'engrais et d'apprécier l'homogénéité de la répartition. La hauteur de produit dans les éprouvettes doit être égale sur toute la largeur, sinon le recouvrement est mauvais et il est nécessaire de corriger les réglages de l'appareil.

– **le test de recouvrement et de symétrie sur la largeur de travail** (cas 3 de la fig. 90) :

Ce test consiste à vérifier la position de trois points caractéristiques de la courbe de répartition transversale (cas des courbes de répartition triangulaires). On dispose, par exemple, trois bacs de réception cloisonnés : un bac sur la limite droite de la largeur de travail, un bac au centre dans l'axe du passage et un bac sur la limite gauche de la largeur de travail. Au terme d'un seul passage, sans recouvrement, les contenus des bacs sont transférés dans des éprouvettes transparentes. L'analyse du contenu des éprouvettes peut conduire aux constats suivants :

– si la dose recueillie dans le bac de droite (Qd) et la dose recueillie dans le bac de gauche (Qg) sont chacune égales à la moitié de celle qui est recueillie au centre (Qc), soit $Qd = Qg$

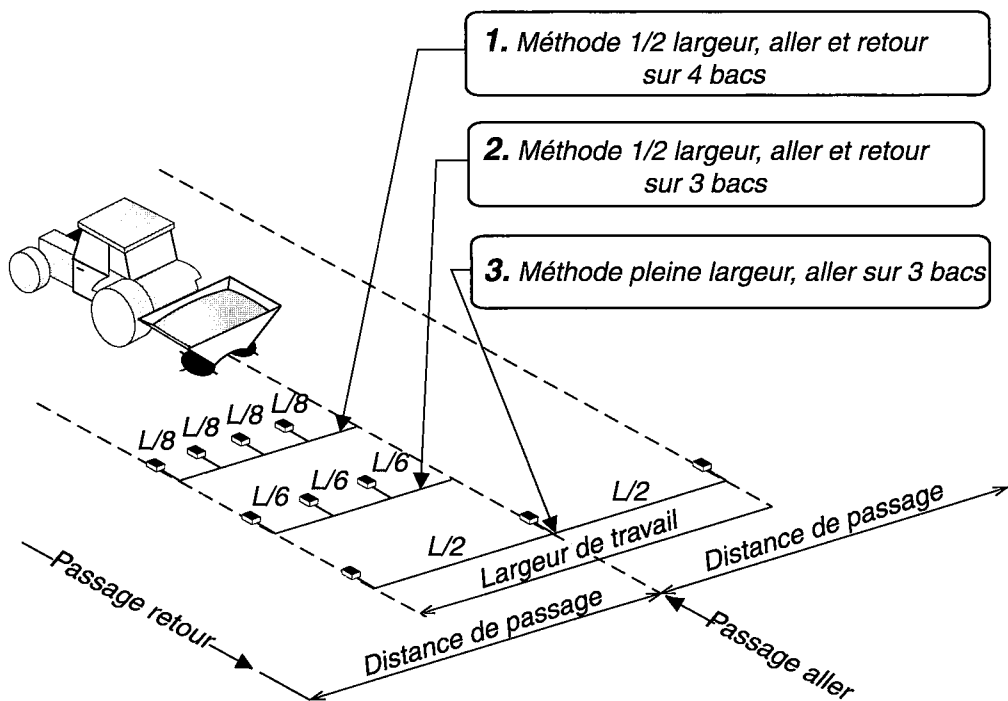


Fig. 90 - Méthodes de contrôles au champ du recouvrement et de la largeur d'épandage

et $Q_d + Q_g = Q_c$, le **recouvrement et la symétrie sont corrects** ;

– si la dose (Q_g) recueillie à gauche représente la moitié de la dose (Q_c) recueillie au centre mais n'est pas égale à la dose (Q_d) recueillie à droite, l'**épandage n'est pas symétrique**. Il convient alors de vérifier l'attelage (niveau transversal) et (ou) de corriger les réglages de l'appareil : symétrie des disques et réglages de débit pour les appareils à doubles disques, réglage du centrage de la zone de projection pour les distributeurs à disque unique.

– si les doses recueillies à droite (Q_d) et à gauche (Q_g) sont identiques mais supérieures à la moitié de la dose centale (Q_c), le **distributeur épand trop large** (surdosage au recouvrement).

– si Q_d et Q_g sont égales, mais chacune inférieure ou supérieure à $Q_c/2$, le **distributeur n'épand pas assez ou épand trop large** (sous-dosage ou surdosage au recouvrement).

Ces tests importants de symétrie et de recouvrement peuvent être facilités si l'appareil utilisé dispose d'un système intégré d'étalonnage et de symétrie de la largeur d'épandage (se reporter au chapitre 3, à la partie consacrée aux dispositifs de régulation et d'aide à l'épandage).

• COMMENT CORRIGER LES ANOMALIES DE SYMÉTRIE D'ÉPANDAGE

Dans bien des cas, pour les appareils portés, les anomalies de symétrie et de recouvrement sont tout simplement dues au **non-respect des règles d'attelage** (niveau transversal, positionnement longitudinal et hauteur). Par ailleurs, rappelons que l'uniformité de distribution des engrais minéraux est étroitement liée aux dimensions des granulés et à leurs formes, les grains sphériques et lisses ont tendance à s'éloigner uniformément du disque distributeur, tandis que les grains de forme irrégulière ont tendance à être expulsés de manière aléatoire ; leur plus grand coefficient de frottement défavorise leur répartition sur les disques, contre les pales et dans l'air.

En pratique, les courbes de répartition transversale présentent fréquemment des formes dissymétriques qui peuvent être corrigées par des moyens différents selon que l'on est en présence d'un distributeur à disque unique, à doubles disques ou à tube oscillant.

– **pour les matériels à disque unique**, selon leur conception, la correction de la répartition transversale peut être réalisée soit en modifiant l'inclinaison transversale de l'appareil, soit en réglant l'orientation des pales, soit en faisant varier la vitesse de rotation du disque, soit en modifiant la localisation du point de chute de l'engrais sur le disque.

– **pour les matériels à doubles disques**, on rencontre soit un réglage spécifique de la répartition transversale qui agit sur la localisation du point de chute de l'engrais sur le disque, soit la possibilité de corriger le positionnement du distributeur par rapport au tracteur (réglage de l'attelage trois points).

• LA VITESSE D'AVANCEMENT

Elle est définie, selon l'état (portance du sol) et le relief de la parcelle, par le rapport de boîte de vitesses qui permet d'assurer l'épandage avec le moins possible de fluctuations de régime moteur pour limiter les variations de vitesse d'avancement et de régime de prise de force. En pratique, sauf pour les parcelles à relief ou à pente prononcés, il est préférable de ne retenir qu'un, voire deux rapports de vitesse, afin de limiter les réglages, sachant que vitesse d'avancement, débit, dose et largeur de passage sont étroitement liés par la relation :

$$V = D \times 600 / Q \times L$$

V = vitesse en km/h

D = débit en kg/min

Q = dose en kg/ha de matière fertilisante

L = largeur de passage en mètres

En général, les indicateurs des tableaux de bord de tracteur n'ont pas une précision suffisante de mesure de la vitesse et il est nécessaire de procéder à une mesure réelle de la vitesse d'avancement en chronométrant le temps de parcours d'une distance de 100 mètres par exemple.

$$\text{On a alors, } V \text{ km/h} = \frac{100 \text{ mètres}}{t \text{ (secondes)}} \times 3,6$$

Il faut réaliser la mesure sur terrain agricole plat, avec le distributeur à mi-charge et dans les conditions d'application (régime moteur correspondant au régime de prise de force prescrit, pont avant enclenché ou non...). Mais attention, la vitesse réelle d'avancement peut être modifiée en fonction :

- de la nature et des dimensions des pneumatiques,
- de l'état d'usure des pneumatiques,
- de l'enfoncement plus ou moins important des roues dans le sol.

• LE CALCUL ET LE CONTRÔLE DU DÉBIT

La connaissance du débit d'un distributeur d'engrais est incontournable pour maîtriser les apports d'engrais. Sa valeur, en cohérence avec les autres paramètres d'épandage, est donnée par la relation :

$$D = Q.L.V / 600$$

D = débit en kg/min

Q = dose en kg/ha de matière fertilisante

L = largeur en m de la distance de passage

V = vitesse constante d'avancement en km/h

600 = constante d'homogénéisation des unités (h-min/m-km...)

Pour une vitesse d'avancement (**V**) du distributeur, le respect de la quantité à épandre à l'hectare (**Q**) (appelée aussi dose d'épandage) dépend de deux paramètres essentiels : le débit d'engrais (**D**) du distributeur et la largeur de passage (**L**).

Les valeurs de débit et le réglage correspondant sont indiqués par des tableaux situés dans la notice d'instructions de chaque appareil.

Prenons deux exemples :

– si l'on veut appliquer 67 unités d'azote à l'hectare avec de l'ammonitrate 33,5 %, la dose d'engrais à épandre est égale à $67 / 33,5 \times 100 = 200$ kg/ha ; si la vitesse d'avancement (V) est de 8 km/h et si la largeur optimale de travail (L) est de 12 mètres, le débit (D) de l'appareil est égal à $200 \times 12 \times 8 / 600 = 32$ kg/min. Si l'appareil est à disque unique, cette valeur correspond au débit projeté par le disque, si l'appareil est à doubles disques, le débit de chaque disque est égal à la moitié, soit 16 kg/min.

– si l'on veut appliquer la même dose/ha (Q = 200 kg/ha) à la même vitesse d'avancement (V = 8 km/h), mais avec une largeur optimale de travail (L) de 24 mètres, le débit (D) de

l'appareil devient $200 \text{ kg/ha} \times 24 \times 8/600 = 64 \text{ kg/min}$ (32 kg/min par disque pour un matériel bidisque).

Le réglage du débit s'effectue en positionnant le mécanisme de dosage (trappe, volet, disque doseur...) à la position indiquée par le tableau de réglage ou la réglette de calcul fournie par le constructeur en fonction de la nature de l'engrais et des paramètres d'épandages retenus : dose, largeur et vitesse d'avancement. Ce réglage de base correspond seulement aux situations prises en compte par le fabricant de l'appareil. En réalité, « la coulabilité » des engrais étant très variable selon les produits et leur état au moment de l'épandage, **il est impératif de contrôler le débit réel** soit pour vérifier la précision du réglage initial, soit pour rechercher le bon réglage pour un produit mal identifié ou ayant subi des modifications physiques. Le réglage très important du débit et les corrections nécessaires peuvent être facilités par la présence d'un dispositif intégré d'étalonnage du débit (se reporter au chapitre 3 à la partie consacrée aux *dispositifs de régulation et d'aide à l'épandage*).

Parmi les différentes méthodes d'**essai de débit**, parfois appelé aussi **tarage**, proposées par les constructeurs, la plus courante est la pesée de la quantité débitée (fig. 91) pendant un temps donné. Le principe est le suivant :

- atteler l'appareil correctement (se reporter au paragraphe consacré à l'attelage des matériels) en respectant sa position par rapport au tracteur,
- verser l'engrais dans la trémie du distributeur en quantité suffisante,
- régler la commande de débit sur la position indiquée par le constructeur (en fonction du type d'engrais, de la dose à épandre et de la vitesse d'avancement),
- escamoter ou (selon les cas) déposer le disque d'épandage,
- placer un récipient de collecte sous la trappe de dosage (fig 91). Souvent, le constructeur propose un kit de réception (goulotte, bac, réglette de calcul) permettant de réaliser l'essai efficacement et dans les meilleures conditions de sécurité,
- mettre l'appareil en marche et faire débiter l'appareil pendant une minute par exemple,
- arrêter tout mouvement, puis peser la quantité recueillie,
- si le débit est trop faible ou trop élevé, modifier le réglage du doseur et recommencer l'opération jusqu'à obtenir le débit souhaité.

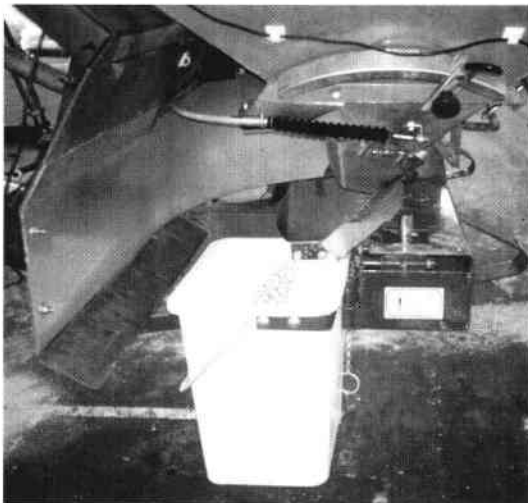


Fig. 91 - Test de débit d'un distributeur centrifuge d'engrais (photo Cemagref)

Certains constructeurs intègrent une bascule de pesée sur le côté ou à l'arrière du distributeur de manière à y accrocher directement le récipient de collecte de l'engrais. D'autres proposent des appareils munis d'un système de pesée électronique intégrée (se reporter au chapitre 3, à la partie « *les dispositifs de régulation et d'aide à l'épandage* »).

Le contrôle du débit doit aussi être réalisé pour les appareils munis de systèmes DPA (Débit Proportionnel à l'Avancement) afin d'acquérir les valeurs de référence nécessaires à l'étalonnage du dispositif de régulation (se reporter au chapitre 3, au paragraphe « *les systèmes de régulation de débit* »).

Dans tous les cas, se reporter strictement à la procédure indiquée par le constructeur, utiliser les outils et accessoires prévus et respecter les consignes de sécurité, car l'animation partielle de l'appareil pendant l'essai peut présenter des risques pour l'opérateur.

• L'ÉPANDAGE EN BORDURE DE PARCELLE

L'épandage en bordure peut se faire indifféremment avant ou après l'épandage en plein champ. D'une façon générale, il convient de suivre les préconisations du constructeur ; en l'absence de règles précises, il est plutôt recommandé de commencer par les bordures et les fourrières, puis de fertiliser le reste du champ, sans oublier de fermer la distribution, en limite des zones de bordure, avant de réaliser les demi-tours. Précisons que l'épandage des bordures prend une dimension d'autant plus grande que la largeur d'épandage est importante ; pour une parcelle de 10 ha (500 m x 200 m), la surface de bordure, pour une largeur de 24 mètres, est de 3,36 ha (33,6 %) !

Avec les distributeurs pneumatiques, il est parfois possible de fractionner les largeurs de rampe et le nombre élevé de diffuseurs permet d'assurer une couverture satisfaisante des parcelles.

Avec les appareils à projection (centrifuges et pendulaires), si l'on ne dispose pas d'équipement spécifique, les appareils d'épandage par projection se prêtent mal à l'épandage en bordure de parcelle :

- soit la bordure est sous-dosée, si l'on ne veut pas projeter d'engrais à l'extérieur de la limite de la parcelle,
- soit la bordure est surdosée avec risque de pollution et perte d'engrais si la largeur de la bordure est inférieure à la demi-largeur de projection.

Il est donc fortement conseillé d'utiliser un appareil équipé d'un **dispositif d'épandage de bordure** et, pour gagner du temps quand le dispositif est installé, il est possible de fertiliser successivement les bordures de plusieurs parcelles.

Lorsque l'on réalise l'épandage de bordure, on doit réduire le débit du côté de la bordure proportionnellement à la largeur fertilisée.

Il existe deux techniques d'épandage de bordure (se référer aux préconisations du constructeur) :

- soit en épandant des deux côtés en utilisant le dispositif de bordure sur un côté (droit ou gauche) : la largeur entre l'axe de passage et la limite de la parcelle doit être alors égale à la demi-largeur de travail (fig. 92) ;
- soit en épandant sur un seul côté avec un dispositif réduisant la largeur de la nappe d'épandage (voir fig. 92).

Pour les appareils ne possédant pas de dispositifs d'épandage de bordure, il est fortement recommandé d'effectuer un passage de bordure à une distance de la limite de parcelle égale à la demi-largeur totale d'épandage. Cette précaution conduit à ne pas projeter d'engrais à l'extérieur de la limite du champ. Le sous-dosage périphérique dû au manque de recouvrement évite le risque de pollution.

Les distributeurs centrifuges projettent l'engrais vers l'arrière sur une distance qui correspond généralement à une demi-largeur de travail. Il convient d'en tenir compte au moment de l'ouverture et de la fermeture du débit en bout de chaque passage pour éviter de surdoser les bordures ou les projections d'engrais en dehors de la parcelle (fig. 10b et 1 lb).

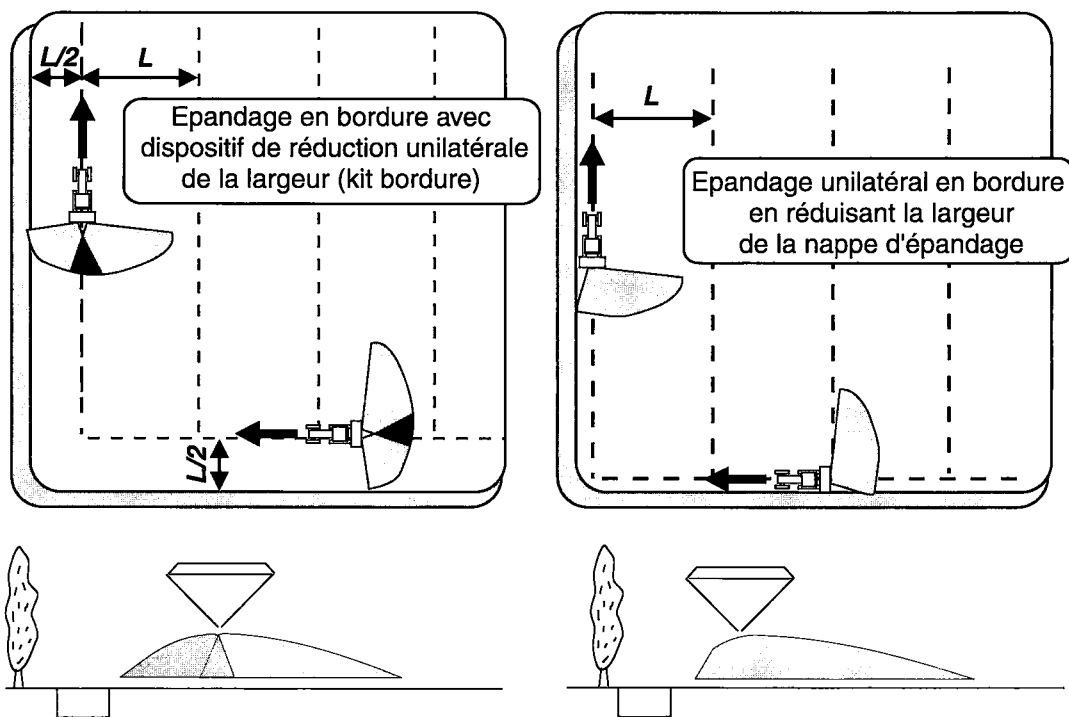


Fig. 92 - Deux exemples d'épandage en bordure avec un distributeur centrifuge

L'INFLUENCE DE LA PENTE DES PARCELLES SUR LA QUALITÉ D'ÉPANDAGE

Lorsque l'on doit épandre sur les terrains en pente, il faut tout de même procéder aux réglages préliminaires de l'appareil sur un terrain plat. Au cours du travail, il faut veiller autant que possible à maintenir les vitesses d'avancement et de prise de force à leur valeur initiale à l'aller comme au retour en agissant en conséquence sur la position du levier de l'accélérateur ou, mieux, en utilisant un distributeur à débit proportionnel à l'avancement (DPA).

Rappelons que, pour un débit donné fixe (sans DPA), la dose appliquée est inversement proportionnelle à la vitesse d'avancement et que la largeur d'épandage est dépendante de la vitesse de rotation des disques, et donc du régime de la prise de force (et donc du régime moteur).

Les difficultés d'épandage sur les terrains en pente deviennent significatives, surtout lorsque la pente dépasse 10 %. Ces difficultés résident dans le fait que, si l'on épand **dans le sens de la pente** (sans dévers), il est très difficile de maintenir la symétrie des réglages aller/retour (à cause du glissement et des variations de régime moteur), et si l'on épand **en suivant les lignes de niveau** (avec dévers), la courbe de répartition transversale subit une déviation latérale vers le bas. Si le relief général de la parcelle le permet, il est possible de travailler en suivant **une ligne dite intermédiaire** comprise entre la ligne de plus grande pente et la ligne de courbe de niveau.

Quand l'épandage d'engrais est réalisé suivant une courbe de niveau ou une ligne intermédiaire, la nappe d'épandage est dirigée vers le bas de la pente. De plus, le travail en dévers entraîne, par rippage, un angle entre l'axe du tracteur et l'axe de passage, aussi bien à l'aller qu'au retour ; ce qui a pour effet de déporter aussi la nappe d'épandage vers le bas. La dissymétrie droite gauche sur un passage est compensée au retour lors du passage suivant.

Pour des raisons de sécurité, l'utilisation d'un tracteur à quatre roues motrices est fortement recommandée surtout sur prairie (sol glissant). L'utilisation d'un tracteur à quatre roues motrices permet aussi de réduire l'angle de rippage dû au dévers (meilleure tenue de cap) et de limiter les écarts de glissement entre les montées et les descentes. Le travail en montant-descendant ou, à la rigueur, en ligne intermédiaire, est moins dangereux que celui en dévers.

Pour le contrôle de l'épandage, il convient de procéder en deux opérations : un premier passage en montant avec pesée de l'engrais recueilli, puis un deuxième passage en descendant, suivi d'une seconde pesée.

D'autres facteurs peuvent interférer et modifier la courbe de répartition transversale, par exemple : le vent qui est plus fréquent et plus fort sur les pentes qu'en plaine, les irrégularités du sol surtout sur les prairies naturelles.

Au-delà de 25 %, le parcours sur pente devient trop dangereux à cause des risques importants de renversement du tracteur.

DOUZE RÈGLES POUR RÉUSSIR L'ÉPANDAGE DES ENGRAIS MINÉRAUX SOLIDES

Ces douze règles résument les propos qui ont été développés dans ce chapitre « *les paramètres d'épandage, l'utilisation et les réglages des distributeurs d'engrais minéraux* », elles ne constituent pas une liste exhaustive, mais elles représentent les éléments principaux de l'utilisation des équipements de fertilisation :

1. Choisir un distributeur d'engrais performant apte à :

- distribuer des doses d'engrais de façon homogène et régulière sur toute la surface du champ,
- s'adapter aux différentes doses et types d'engrais utilisés et disposer pour cela de réglages de débit et de largeur,
- réaliser l'épandage en bordure en évitant les projections à l'extérieur du champ ;

2. Suivre les instructions de la notice du constructeur pour effectuer l'entretien, l'attelage et les réglages de l'appareil selon les engrais utilisés et les conditions d'utilisation ;

3. Utiliser des engrais d'origine connue présentant des caractéristiques physiques favorables et une bonne qualité balistique. Proscrire les engrais contenant des poussières ; par temps humide, un engrais poussiéreux peut colmater partiellement le système doseur et, de ce fait, affecter la quantité d'engrais épandue ;

4. Utiliser une méthode de jalonnement la plus précise possible ;

5. Bien connaître la vitesse d'avancement du tracteur et prendre l'habitude de la contrôler sur le terrain ;

6. Prendre en compte les facteurs climatiques (vent, humidité de l'air, etc.) lors de l'épandage. L'épandage centrifuge ou pendulaire est soumis à la résistance de l'air. La répartition et le recouvrement sont d'autant plus affectés par le vent que la largeur d'épandage est importante. Le seuil de sensibilité se situe à une vitesse de vent de 2 m/s (7,2 km/h), ce qui correspond à peu près à un vent qui commence à agiter les branches périphériques des arbres. En aucun cas, on ne doit faire des contrôles, et donc des épandages, lorsque la vitesse du vent dépasse 25,2 km/h (7 m/s - Norme NFU 23- 111) ;

7. Prendre en compte l'influence de l'état du sol et de la pente. Le passage sur une bosse, ou dans un creux, modifie les trajectoires des grains d'engrais. Si nécessaire, régler l'appareil pour une vitesse d'avancement réduite ;

8. Respecter les règles d'attelage préconisées par le constructeur ;

9. Prendre l'habitude de vérifier les paramètres d'application, se méfier de la routine en faisant des mesures de vitesse d'avancement et des essais de débit et de largeur. Prendre conscience que les systèmes électroniques d'aide à la conduite et les automatismes ne peuvent être efficaces et fiables que si les valeurs qui y ont été entrées sont valides ;

10. Procéder à l'entretien recommandé par le constructeur et s'assurer de l'absence de traces de chocs pouvant nuire à la fonction des organes de dosage et de projection ;

11. Vérifier régulièrement l'état et le fonctionnement des commandes et liaisons (corrosion, poussières...) : la dissymétrie d'ouverture des trappes en fond de trémie des appareils doubles-disques est, par exemple, souvent à l'origine d'une dissymétrie droite-gauche de la répartition transversale ;

12. Prévenir les effets de l'usure et de la corrosion : l'abrasion mécanique et la corrosion des métaux soumis à l'action des engrais peuvent être importantes et altérer la qualité de la répartition. Surveiller tout particulièrement l'usure des éléments de projection qui est fonction du tonnage de produits épandus – ce phénomène est normal – le jeu des pièces mobiles s'accroît avec l'âge et les pièces d'usure doivent être remplacées régulièrement.

Lors d'un achat, il faut être conscient que l'investissement consacré à un appareil performant est relativement faible eu égard à la valeur des produits épandus et à la quantité d'engrais à appliquer au cours des années d'utilisation ; sans compter les gains obtenus en efficacité de fertilisation et en économie de produit !

Généralités à propos des fertilisants organiques	136
Caractéristiques et valeur agronomique des fumiers	137
Caractéristiques et obtention des fumiers compostés	139
– Le principe du compostage des fumiers	139
– Caractéristiques et propriétés des fumiers compostés	139
– Les matériels pour réaliser le compostage des fumiers	140
Caractéristiques et valeur agronomique des lisiers	142
– La matière sèche	143
– La teneur en azote ammoniacal	144
– La gestion de l'épandage des lisiers	146
– La gestion des éléments grossiers indésirables	146
– Le problème des odeurs	147

L'ÉPANDAGE DES FUMIERS

Les épandeurs de fumier	149
– Le châssis	152
– La caisse à fond mouvant	153
– Les organes d'épandage arrière à axes horizontaux	157
– Les organes d'épandage arrière à axes verticaux	158
– Les épandeurs à turbine	158
Les épandeurs de matières fertilisantes non pombables	161
– Les équipements adaptables sur les épandeurs classiques de fumier	161
– Les épandeurs latéraux à vis et turbine avant	162
– Les épandeurs à vis et plateaux centrifuges arrière	162
– Les épandeurs latéraux à fléaux	162
La maîtrise de la dose de fumier à épandre	166
– Le débit d'épandage	166
– La répartition longitudinale	167
– La largeur de travail et la répartition transversale	168

L'ÉPANDAGE DES LISIERS

Les équipements pour l'homogénéisation des lisiers en fosse	170
– Les malaxeurs de lisiers	170
– Les pompes à lisier	171
Les épandeurs de lisier	172
– Le châssis	172
– La citerne	173
– Le compresseur et les circuits pneumatiques	174
– Les organes de remplissage	176
– Les organes d'épandage par projection ou aspersion	178
Les rampes d'épandage de lisier	179
– Les différents modes de distribution des rampes d'épandage	180
– Les différents modes de diffusion avec les rampes d'épandage	181
Les enfouisseurs de lisier	184
– Les enfouisseurs spécialisés pour l'épandage sur prairies	184
– Les enfouisseurs pour les sols travaillés	185
– Les enfouisseurs polyvalents	187
La maîtrise de la dose de lisier à épandre	188
– Le réglage du débit	188
– Les dispositifs DPA (débit proportionnel à la vitesse d'avancement)	189
– La largeur d'épandage et la répartition transversale	191

• GÉNÉRALITÉS À PROPOS DES FERTILISANTS ORGANIQUES

Les fertilisants organiques sont des sous-produits incontournables des activités d'élevage (fumiers, lisiers ... appelés engrais de ferme), des activités agro-industrielles (boues résiduaires des industries agro-alimentaires, des papeteries...) et des stations d'épuration des eaux. L'épandage de ces produits sur les surfaces agricoles est pratiquement la seule voie de valorisation, à condition toutefois de maîtriser les pratiques agricoles et de ne pas entraîner de conséquences négatives sur l'environnement. Contrairement aux engrais minéraux commerciaux dont on connaît bien les caractéristiques chimiques et physiques, les fertilisants organiques sont extrêmement variés tant du point de vue de leurs caractéristiques physiques, que celui de leur potentiel fertilisant (ou de leur charge polluante).

• L'épandage des fertilisants organiques nécessite la prise en compte de trois grandes préoccupations :

- la **caractérisation des produits** : essentiellement leurs caractéristiques physiques et chimiques, leur pouvoir fertilisant et leur assimilation par le milieu,
- l'adoption d'un **raisonnement agronomique** adéquat, capable de valoriser au mieux les propriétés fertilisantes des produits sans risques pour l'environnement ; c'est ce que l'on appelle la **fertilisation raisonnée**, dans le cadre du plan de fumure de chaque parcelle,
- l'utilisation d'**équipements adaptés** capables d'épandre ces produits en respectant une dose définie et homogène sur les surfaces réceptrices, avec le minimum de nuisances (odeurs) et de pollution pour l'air (volatilisation minimale de NH_3).

Pour ce qui concerne les fumiers et lisiers, leur « valeur fertilisante » est loin d'être négligeable et leur retour dans les sols agricoles paraît tout à fait logique à condition de « réguler » les apports en terme de quantité, de temps et d'espace. Les trois grandes règles à respecter sont les suivantes :

- **apporter** seulement les unités fertilisantes (dose/ha) correspondant aux besoins réels définis par un bilan le plus précis possible et en tenant compte de coefficients d'équivalence engrais vérifiés selon les produits à épandre,
- **respecter** l'adéquation entre les quantités réellement épandues et la dose/ha optimale souhaitée en maîtrisant le débit d'épandage et l'homogénéité de couverture,
- **organiser** les épandages de manière à prévenir les fuites directes par percolation, ruissellement et volatilisation dans l'atmosphère et à limiter les dégradations des sols et les nuisances (mauvaises odeurs...).

Rappelons que les risques pour l'environnement proviennent particulièrement des fuites de nitrates vers les eaux superficielles et souterraines et de l'entraînement du phosphore par ruissellement. Les nitrates ne sont pas contenues dans les fertilisants organiques, ils sont le résultat de la transformation de l'azote ammoniacal par l'activité des micro-organismes du sol. Les informations contenues dans ce chapitre peuvent être utilement complétées en consultant les documents du CORPEN et notamment : « *bien choisir et mieux utiliser son matériel d'épandage* ».

• CARACTÉRISTIQUES ET VALEUR AGRONOMIQUE DES FUMIERS

Le fumier est constitué par les déjections solides (fèces) et liquides (urines) des animaux en stabulation, mélangées plus ou moins régulièrement à des litières (paille, sciure...) et des déchets d'aliments (foin, ensilage...). Ses caractéristiques et sa quantité varient de manière importante selon le type d'animaux, le mode de logement et le régime alimentaire du cheptel. Le fumier est à la fois un **amendement** et un **engrais**. On en épand couramment de 15 à plus de 30 tonnes à l'hectare, ce qui impose la manutention de quantités importantes.

Le fumier est un amendement dans la mesure où il apporte au sol de la matière organique (le fumier de bovins en contient environ 17,5 %) utile pour entretenir (ou enrichir) l'humus et améliorer la structure du sol. Dans les terres cultivées, un excès de fumier pailleux ou pas assez décomposé peut entraîner une porosité excessive (sol creux) défavorable à l'enracinement des plantes ; sur les prairies, un excès peut entraîner des zones de refus par les animaux et conduire à un excédent ponctuel d'azote avec des risques de pollution.

Le fumier est aussi un engrais qui contient de l'azote, du phosphore et de la potasse (fig. 93) ; le fumier de bovins par exemple contient en moyenne de 4 à 6 % d'azote (N - K), de 2,5 à 3 % de phosphore (exprimé en P_2O_5) et de 7 à 9 % de potasse (exprimé en K_2O). Les teneurs moyennes en éléments fertilisants standard peuvent être utilisées, mais, pour le calcul plus précis des doses à épandre, il faut procéder à l'analyse de la teneur en éléments fertilisants du fumier provenant d'un élevage donné.

	Taux de MS en % du poids brut	Azote (N-k) en g/kg K = azote réduit ou Kjeldahl	Phosphore P_2O_5 en g/kg	Potasse K_2O en g/kg
Fumier de volaille de chair	> à 40 %	29	29	20
Fumier de bovins	25	5,5	2,6	7,2
Lisier de bovins	12,7	4	2,2	5
Lisier de porc	1 à 10	5	4	3

Fig. 93 - Valeurs moyennes des teneurs en matière sèche et éléments fertilisants de quelques produits courants (source CORPEN)

Pour réaliser un bon échantillon, on prélève de 15 à 20 prises au moment de la vidange du bâtiment en prenant soin de les prendre de manière bien répartie sur toute la hauteur de la couche ; après mélange des prises, on retient un échantillon d'environ 1 kg que l'on adresse rapidement au laboratoire. Lorsque l'on a procédé à l'analyse d'un fumier d'une production donnée, les teneurs mesurées restent valables tant que les conditions de production ne varient pas (densité animaux/surface, temps de séjour sur la surface, type de paillage, nature de l'alimentation...).

L'efficacité des éléments contenus dans les fumiers étant comparable à celle des éléments contenus dans les engrais solubles, la substitution peut être totale. Cela dit, pour l'azote, on

ne peut pas tenir le même raisonnement ; seule, une partie de l'azote du fumier (fraction d'azote ammoniacal) peut être valorisée la première année (effet direct), le reste est valorisé les années suivantes ou perdu si les conditions sont défavorables. Seul un plan de fumure élaboré à partir d'analyses de terre et d'un bilan des fournitures et reliquats du sol peut conduire à une valorisation optimale des fumiers.

Si la composition chimique du fumier est relativement homogène, ses caractéristiques physiques sont très variables : masse volumique, texture, structure, consistance... Pratiquement, la structure va des fumiers pailleux foisonnants aux fumiers compacts difficiles

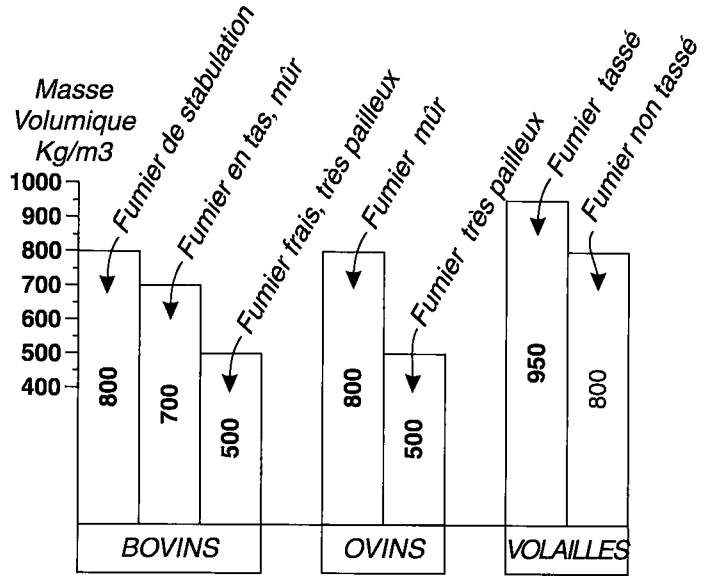


Fig. 94 - Valeurs moyennes de la masse volumique de différents fumiers avant leur reprise (source ITCF)

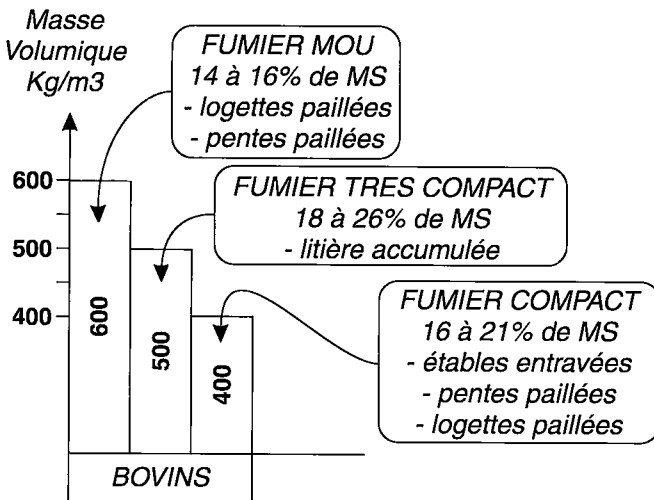


Fig. 95 - Valeurs moyennes de la masse volumique de fumiers de bovins, mesurée après leur chargement dans l'épandeur (source Institut de l'élevage)

à déchiqeter. A titre d'exemple, dans les secteurs les plus fréquentés des bâtiments (lieux de passage, proximité des auges et abreuvoirs...), le taux de déjections et la compacité du fumier sont plus élevés...

En pratique, la masse volumique du fumier (fig. 94) peut passer du simple au double entre son état après chargement dans l'épandeur et son état initial de stockage (fig. 95). La masse volumique du fumier croît avec la durée de stockage (décomposition de la matière organique).

Il est possible d'évaluer la masse volumique d'un lot de fumier en pesant un épandeur rempli, avec le chargeur utilisé sur l'exploita-

tion, de manière la plus régulière possible et à ras les ridelles ; la masse contenue dans l'épandeur est connue par la différence de pesée entre l'épandeur plein et l'épandeur vide. La **masse volumique (mV)** est alors égale au quotient de la **masse (m)** contenue dans l'épandeur par le **volume utile mesuré (v)** de la caisse : $mV = m/v$. Pour l'ajustement de la dose épandue, la masse volumique à prendre en compte est celle du fumier chargé dans l'épandeur avec les moyens utilisés sur l'exploitation. D'autres moyens plus simples peuvent être utilisés (pesée d'un volume témoin : seau, bac...) à condition que les résultats soient représentatifs de la masse volumique moyenne du fumier après son chargement dans la caisse de l'épandeur.

L'épandage des fumiers, compte tenu des périodes d'intervention et des tonnages transportés, peut être à l'origine de dégradations des sols (passages de roues, tassements, ornières...). Pour prévenir ces détériorations, il convient d'interdire les épandages sur les sols détremés, les sols à faible portance ou les sols de consistance semi-plastique, de veiller à la pression des pneumatiques ou d'utiliser des équipements spéciaux (pneumatiques larges...).

• CARACTÉRISTIQUES ET OBTENTION DES FUMIERS COMPOSTÉS

• Le principe du compostage des fumiers :

Le compostage des matières organiques (fumiers, débris végétaux...) est un processus de transformation faisant appel à un cycle de fermentation aérobie connu depuis longtemps. Le compostage des fumiers est une technique en voie de développement et de perfectionnement en raison des avantages qu'elle peut apporter en matière de maîtrise des épandages. En effet, le compostage conduit à l'obtention d'un produit plus homogène ayant une structure plus adaptée à la mécanisation de l'épandage. Le fumier composté est plus stable (odeur réduite) et permet une certaine hygiénisation des épandages.

La transformation progressive du fumier en compost s'accompagne de dégagements gazeux (vapeur d'eau, gaz carbonique et ammoniac...) et d'écoulements de jus. Si le compostage est conduit sous abri, les écoulements de jus sont d'autant plus faibles que la capacité de rétention du produit est élevée (si la teneur en paille est suffisante) ; si le compostage est conduit en plein air, les pluies tendent à entraîner une certaine quantité de jus. Le processus de compostage conduit à l'obtention d'un produit plus ou moins stable, plus ou moins homogène et plus ou moins mûr ou décomposé, selon la nature du produit de départ, le nombre de retournements et la durée du traitement.

• Caractéristiques et propriétés des fumiers compostés :

Au terme du compostage, si l'on observe les caractéristiques d'un compost de fumier on peut constater :

- une réduction de masse d'environ 15 % par rapport à un fumier en tas, et qui peut dépasser 30 % si le compostage est pratiqué dès l'extraction du fumier des bâtiments,
- une diminution de la densité apparente du produit de 30 à 50 % par rapport à un fumier compact,

- une texture et une fragmentation plus fine et nettement plus homogène que le fumier. Ces qualités favorisent la régularité d'épandage longitudinale et transversale et permettent l'épandage de faibles doses/ha en nécessitant moins de contraintes mécaniques sur les matériels,
- une réduction importante des volumes à manipuler,
- l'épandage d'un produit peu ou pas odorant,
- en comparaison avec l'épandage de fumier frais, l'épandage de produits décomposés de type composts, apporte un amendement organique sous une forme plus rapidement assimilable par le milieu et réduit les risques de fuites et de pollution des eaux,
- le compostage permet de mieux programmer les apports sur les parcelles avec une meilleure synchronisation entre les phases de production et d'épandage : les plus grandes quantités de fumier étant produites l'hiver, l'accélération de la maturité par compostage (consistance, degré de décomposition) deux mois après traitement peut par exemple permettre un épandage à la sortie de l'hiver sur prairie ou céréales, ou avec un épandage à faible dose, après une première coupe d'herbe au printemps,
- les composts véhiculent moins de parasites animaux, moins de germes ou de bactéries pathogènes (hygiénisation) et moins de graines valides d'adventices que les fumiers.

Parmi les différents travaux de référence dans le domaine des techniques de compostage, de l'impact des épandages sur l'environnement et de la valorisation agronomique des engrais de ferme, citons les publications de la station INRA de Mirecourt (par exemple : B. Le HOUEROU, 1993, Le compostage des fumiers de bovins, une des pratiques pour protéger l'eau, congrès GEMAS/COMIFER Blois 16 - 18/11/1993).

• **Les matériels pour réaliser le compostage des fumiers :**

Le compostage des fumiers est réalisé sur une aire de dépôt capable de recevoir un ou plusieurs lots de fumier disposés en tas linéaires appelés andains, avec suffisamment de place autour afin de permettre leur aération mécanique (fig. 96). Cette aération est assurée une à trois fois soit en utilisant un épandeur de fumier, soit en utilisant une machine spécifique appelée retourneur d'andains. Le produit composté est ensuite épandu avec un épandeur de fumier classique.

– **l'aération des fumiers compostés avec un épandeur de fumier** (fig. 96) est une pratique qui permet de gérer le processus de compostage avec le matériel déjà utilisé pour le fumier, à savoir un chargeur frontal sur tracteur (ou un chargeur automoteur) et un épandeur de fumier. L'aération est réalisée en chargeant l'épandeur de fumier et en le vidant aussitôt à poste fixe sur une ligne parallèle au tas à aérer. Le passage du produit dans l'épandeur, accomplit l'aération par brassage, déchiquetage et détassage. L'épandeur peut être équipé à l'arrière de panneaux déflecteurs qui limitent la portée des projections et qui tendent à « mouler » le tas pour lui donner une bonne régularité dimensionnelle et une stabilité suffisante.

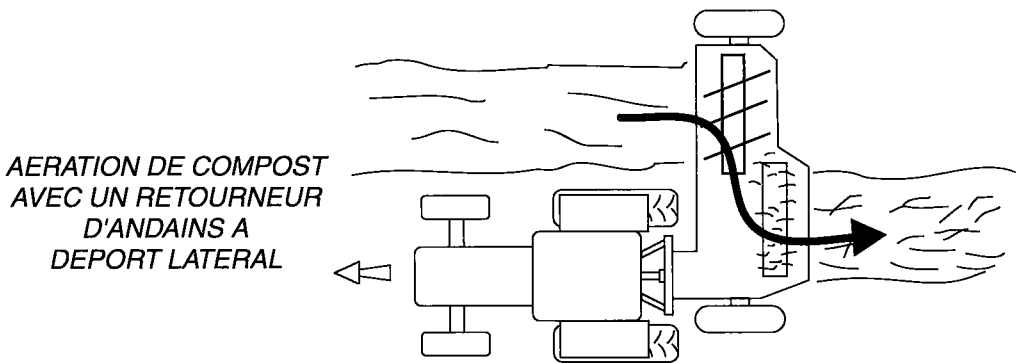
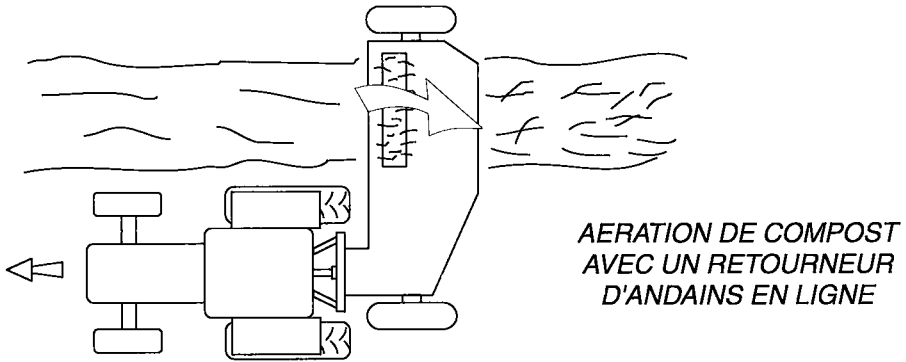
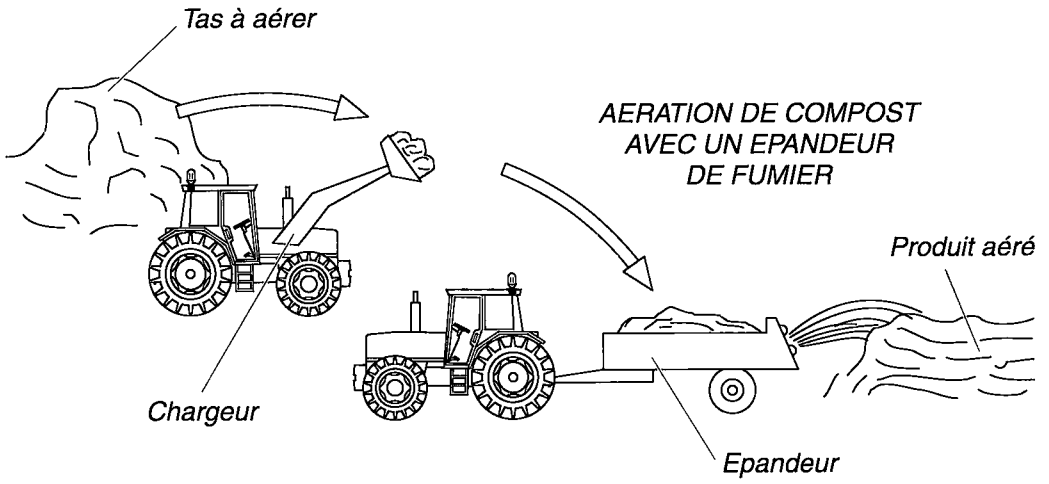


Fig. 96 - Principales méthodes utilisées pour l'aération de fumiers compostés

– **l'aération des fumiers compostés avec un retourneur d'andains** (fig. 96). Il s'agit d'un matériel spécifique permettant de réaliser l'aération du tas. Selon les cas, la machine attelée en déport à l'arrière d'un tracteur traite le produit en le déplaçant soit latéralement par un système de vis en reconstituant un nouvel andain déporté, soit en ligne sous l'action d'un ou de deux rotors. Ces derniers attaquent l'andain de fumier et le rejettent derrière en le reconstituant grâce à des panneaux déflecteurs qui le moulent et assurent sa régularité dimensionnelle. Le traitement comprend deux ou trois opérations d'aération et l'épandage du « compost » obtenu peut être réalisé, 40 à 60 jours après le début du traitement.

Le terme retourneur d'andains n'est pas vraiment approprié pour désigner ce type de machine car l'action mécanique n'est pas vraiment une action de retournement de l'andain comme pour un andaineur de foin, mais plutôt une action de brassage du tas ayant tendance à inverser les couches supérieures et inférieures en détassant le produit pour recréer des conditions aérobies.

Les figures (fig. 97 et 98) montrent deux principes de retourneurs d'andains : un retourneur à déchargement latéral utilisant un rotor unique (fig. 97), et un retourneur à deux rotors muni d'un convoyeur incliné (fig. 98). La largeur d'attaque des rotors est de l'ordre de 4 mètres et la puissance d'entraînement nécessaire est d'environ 80 à 90 ch. Les rotors sont entraînés par la prise de force du tracteur et les roues de la machine sont animées par des moteurs hydrauliques à vitesse réglable. Pendant le travail, l'avancement de l'ensemble tracteur-machine est assuré par les roues de la machine, la transmission du tracteur étant en principe au point mort.

• CARACTÉRISTIQUES ET VALEUR AGRONOMIQUE DES LISIERS

Les lisiers proviennent du mélange (fèces et urine) des déjections émises par les animaux sous forme plus ou moins fluide, pompables si leur taux de matière sèche est inférieur à 15 % (sans débris végétaux et paille). Par extension, on parle aussi de lisier pâteux pour des produits mous, stockés à des concentrations en matières sèches plus élevées et qui ne sont plus pompables. Le lisier contient des éléments solides et des éléments dissous. Certains éléments, notamment l'azote ammoniacal, sont dissous ; ils peuvent progressivement disparaître dans l'air par volatilisation.

Ces produits sont des engrais complexes à gérer pour au moins trois raisons :

– la nécessité d'utiliser des équipements particuliers représentant des investissements relativement lourds par rapport à la valeur des produits, surtout s'ils sont peu concentrés (lisiers de porcs à 3 - 4 % de MS),

– l'obligation de s'organiser pour épandre pendant les périodes autorisées et satisfaire aux dispositions réglementaires en matière de prévention des pollutions et des nuisances,

– la complexité de gestion de la chaîne complète depuis la production, l'évacuation des bâtiments (capacité et qualité des stockages) jusqu'à l'utilisation (disponibilité des surfaces d'épandage et périodes d'accès aux parcelles) tout en adoptant une démarche agronomique pour valoriser des produits de composition variable et instable. Ces conditions sont *a priori* contradictoires avec une fertilisation de précision.

Fig. 97 - Principe d'un retourneur d'andain de compost à rotor à vis et pales (d'après document Ménard)

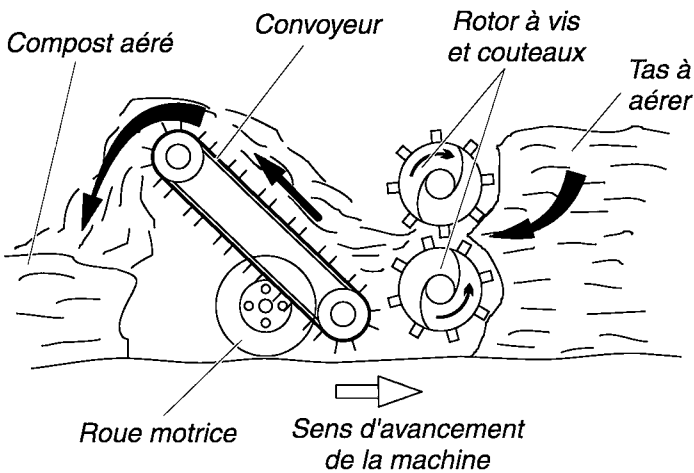
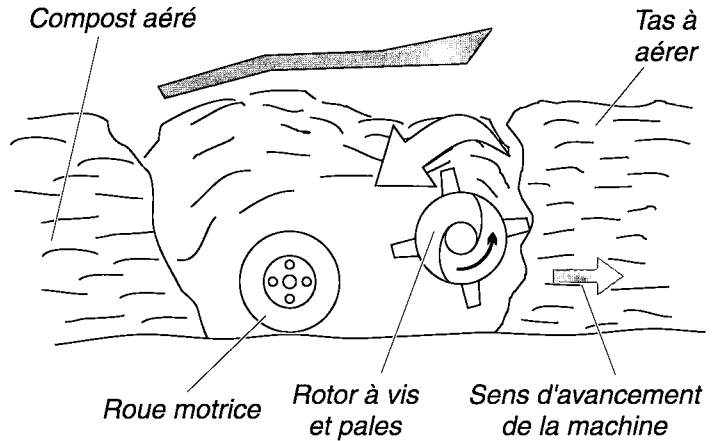


Fig. 98 - Principe d'un retourneur d'andain de compost à deux rotors à vis et convoyeur incliné (d'après document Jeantil)

• La matière sèche :

Le lisier contient plus ou moins d'eau d'origines diverses (lavages, gaspillages d'eau de boisson...) qui modifie sa concentration. Pour qu'ils puissent être pompables, les lisiers doivent avoir un taux de matière sèche inférieur à 15 %.

Pour les lisiers de porc, les variations de concentration sont si importantes qu'il est apparu intéressant de trouver des indicateurs simples de concentration. Des méthodes de mesures et d'estimation de la matière sèche ont été développées. Ainsi, pour les lisiers de porcs, de volailles et de veaux, qui ne renferment pas d'intrants extérieurs perturbateurs (litières), il y a

une bonne corrélation entre la matière sèche des rejets des animaux et leur alimentation. Les modifications qui interviennent ensuite portent sur le degré de dilution : gaspillage d'eau d'abreuvement, les entrées d'eaux diverses (gaspillages alimentaires, lavages, désinfections, évaporation, etc.).

Ainsi, sous condition de réaliser un lisier homogène par un brassage de qualité, on peut corréler la composition du lisier au taux de matière sèche. Cette corrélation est bonne pour les paramètres stables : matières minérales, P_2O_5 , azote Kjeldahl. La corrélation est moins bonne pour les éléments dissous (K_2O) (la qualité des analyses peut être partiellement explicative) et pour les éléments instables comme **l'azote ammoniacal** du fait de nombreuses pertes par volatilisation.

Pour les élevages qui utilisent de la litière (paille, sciure, copeaux, etc.), la proportion de cette litière n'a pas de relation avec la matière sèche rejetée par les déjections. Il est donc pratiquement exclu de pouvoir estimer la valeur du lisier à partir de sa teneur en matière sèche. De plus, pour les bovins, le rejet est lié à la nature et à la quantité de la ration de base, elle-même souvent variable et moins bien connue par l'éleveur. Dans ce cas, la matière sèche n'est pas un bon indicateur pour estimer la valeur minérale du produit.

• La teneur en azote ammoniacal :

La teneur des lisiers en éléments fertilisants (fig. 93) varie selon l'espèce animale, la nature de l'alimentation, le type de production, l'importance des pertes par volatilisation. L'élément essentiel présent dans les lisiers et à la base de toute fertilisation raisonnée est l'azote.

Dans les lisiers, l'azote est présent sous deux formes principales : l'azote minéral sous forme ammoniacale (NH_4^+) et l'azote organique. Le taux d'azote ammoniacal dans un lisier est assez caractéristique de l'espèce animale et est souvent plus élevé que le taux d'azote organique.

Cette forme ammoniacale est par ailleurs dissoute et donc en concentration constante dans tout le liquide.

Pour la fertilisation, on raisonne habituellement la dose d'apport à partir de la concentration en azote ammoniacal (la part de l'azote organique peut être également prise en compte...) ; à partir des résultats du bilan azoté de la parcelle et de la mesure de l'azote ammoniacal du lisier, il est possible de calculer la dose/ha de lisier pouvant être épandue.

La mesure rapide de l'azote ammoniacal est possible grâce à des dispositifs de mesure portatifs, rapides et simples à utiliser. Parmi les différents appareils, citons les analyseurs **Quantofix, Agros et Agro-lisier** :

– **l'analyseur Quantofix** (fig. 99) comprend :

- un flacon A en matière plastique destiné à recevoir un réactif chimique (hypochlorite de sodium) ;
- un flacon B en matière plastique, destiné à recevoir l'échantillon de lisier ;
- une éprouvette graduée ;
- un socle rempli d'eau, relié par une conduite souple au flacon B et communiquant avec l'éprouvette graduée.

Le principe de fonctionnement de cet appareil est le déplacement d'un volume d'eau sous l'effet du volume de gaz produit par la réaction chimique, à savoir la transformation de l'azote

ammoniacal en azote gazeux. La teneur en azote de l'azote ammoniacal ($N-NH^{4+}$) en kg/m^3 de lisier peut être lue directement sur l'échelle de l'éprouvette graduée.

Après la mise à niveau de l'eau dans le socle, l'introduction de l'échantillon (flacon B) et du réactif (flacon A), l'opérateur ferme hermétiquement l'ensemble et s'empare du flacon A pour transférer le réactif vers l'échantillon de lisier. L'augmentation de pression générée par la réaction chimique s'applique sur la nappe d'eau et se traduit par la montée d'une colonne d'eau dans l'éprouvette graduée.

– l'analyseur Agros (fig. 100) comprend :

– un récipient cubique en acier inoxydable muni d'un couvercle étanche portant un manomètre gradué en kg d'azote ammoniacal par mètre cube de lisier ;

– un jeu de trois doseurs d'échantillons de tailles différentes : le plus grand pour les lisiers très dilués, le moyen pour les lisiers normaux et le plus petit pour les lisiers très concentrés ;

– un godet de réactif chimique (hypochlorite de calcium).

Après introduction de l'échantillon avec la

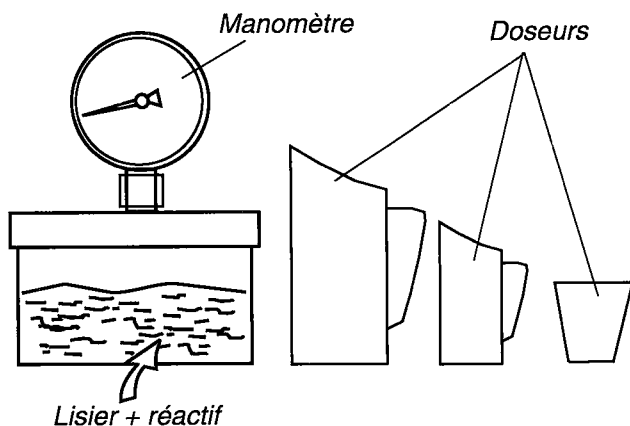


Fig. 100 - Principe du système Agros pour l'analyse de la teneur en azote ammoniacal des lisiers

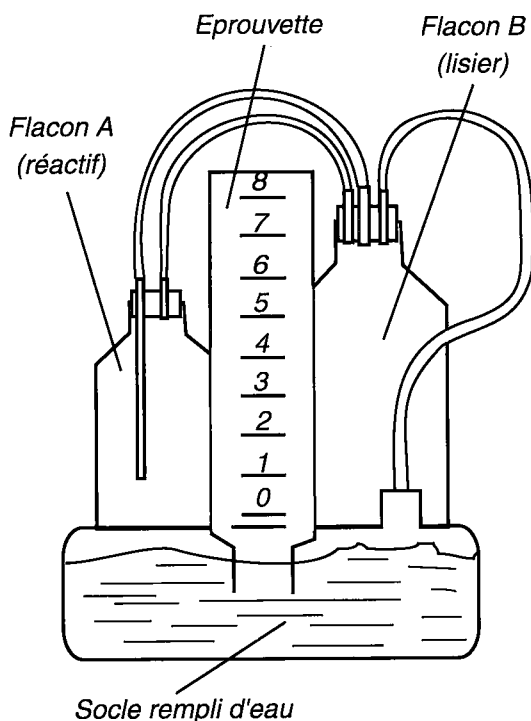


Fig. 99 - Principe du système Quantotix pour l'analyse de la teneur en azote ammoniacal des lisiers

dose d'eau définie dans la notice, l'appareil est hermétiquement fermé, et le contenu du flacon de réactif transféré par retournement. Au terme de la réaction chimique, l'aiguille du manomètre indique la teneur en d'azote ammoniacal.

– l'analyseur Agro-lisier (fig. 101) est constitué d'une éprouvette étanche et d'un manomètre gradué en kg azote ammoniacal par mètre cube de lisier. L'échantillon de lisier est introduit dans l'éprouvette avec un réactif chimique. Après fermeture, l'accroissement de pression dû à la réaction chimique est indiquée par le manomètre.

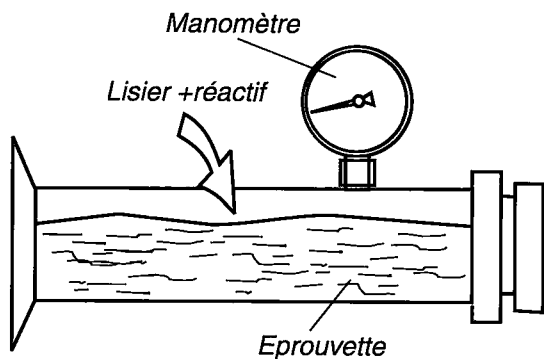


Fig. 101 - **Principe du système Agro-lisier pour l'analyse de la teneur en azote ammoniacal des lisiers**

En général, moins les lisiers sont concentrés et plus la vitesse de sédimentation est élevée. Cette sédimentation crée une contrainte d'exploitation qui peut être gérée de deux manières selon que l'on utilise le lisier homogénéisé ou en traitant le liquide surnageant séparément de la phase liquide décantée.

– **l'utilisation du lisier homogénéisé** est une pratique courante notamment pour les lisiers de bovins. Elle consiste à épandre le liquide et les matières en suspension en une seule opération avec une tonne à lisier. Afin d'épandre sur le sol les éléments fertilisants de façon régulière en dose et en concentration, cette méthode nécessite l'homogénéisation préalable du produit au moment du chargement et la conservation de ce mélange jusqu'au moment de l'épandage. La limite de cette méthode est la pompabilité du produit. L'homogénéisation s'effectue dans la fosse par brassage avant le chargement, en utilisant des **malaxeurs** appelés aussi **mixeurs** ou **mélangeurs**, généralement entraînés par la prise de force d'un tracteur ou par un moteur électrique immergé. Ces matériels peuvent être conçus de manière à assurer une fonction de hachage des agrégats et des éléments grossiers.

– **l'utilisation du lisier en gestion séparée du liquide surnageant et de la phase liquide décantée** peut être envisagée pour les lisiers de porcs sous réserve de disposer de fosses adaptées et d'équipements adéquats (gestion des liquides sur des cultures en place, gestion des sédiments sur le sol nu avant une préparation de sol par exemple). Dans ces conditions, le chargement et l'épandage du liquide sont réalisés avec une tonne à lisier, en principe sans homogénéisation et sans toucher à la masse décantée du fond de fosse. Dans le cas des lisiers de porcs, la phase liquide décantée (boues) peut être reprise avec une pelle mécanique et épandue avec un épandeur de boues à caisse étanche (épandeur à fléaux, à turbine, à plateaux rotatifs...).

• **La gestion des éléments grossiers indésirables :**

Ces éléments sont constitués d'objets se trouvant accidentellement dans le lisier (sacs plastiques, polystyrène, morceaux de bois, etc.) ou naturellement, tels les poils des animaux.

• **La gestion de l'épandage des lisiers :**

Au cours du stockage, les différentes matières en suspension (MES) contenues dans le lisier se regroupent en se sédimentant au fond du stockage d'une part, et en créant une couche superficielle (produits flottants) d'autre part (MES plus légères). De plus, le lisier (surtout celui de bovins) peut contenir des éléments grossiers indésirables qu'il convient de traiter afin de prévenir les difficultés d'épandage.

La sédimentation est plus ou moins rapide en fonction des éléments et de la concentration du lisier. De plus, certaines fermentations produisant des gaz (CH_4 - CO_2) peuvent créer une certaine agitation.

Dans le cas d'épandage précis par rampe d'aspersion ou par injecteurs dans le sol, tous ces éléments indésirables sont susceptibles de boucher les systèmes d'épandage sans que l'on ne s'en aperçoive (cas des enfouisseurs par exemple). Il est indispensable d'empêcher l'intrusion de ces éléments et d'utiliser des dispositifs capables de les retenir en amont de la fosse ou de les éliminer au moment du pompage : grilles de décolmatage, tamis, système de broyage...

• **Le problème des odeurs :**

Le lisier stocké en fosse constitue un milieu vivant. Très rapidement, le mélange fèces-urine entre en fermentation anaérobie et produit des composés générateurs de mauvaises odeurs. Parmi les techniques d'élimination ou de limitation du dégagement d'odeurs, citons **l'oxygénation avant épandage, l'enfouissement couplé à l'épandage, l'enfouissement après épandage et les rampes d'épandage** :

– **l'oxygénation avant épandage** permet l'élimination efficace des odeurs. De nombreux équipements sont commercialisés dans ce but. Les performances des équipements sont variables et les coûts de la désodorisation sont fonction de l'investissement et du mode de fonctionnement appliqué pour obtenir une désodorisation réelle. D'une manière générale, l'oxygénation est une technique coûteuse par rapport à la valeur des produits ; cet aspect économique explique d'ailleurs la faible quantité d'installations en service. Dans chaque cas, la décision d'équipement doit être prise à partir des références établies par les structures de conseils de la filière de production concernée. Selon les cas, les équipements sont constitués de turbines à vitesse lente ou rapide placées en surface, de systèmes hydro-éjecteurs ou déprimogènes. Notons que la désodorisation biologique par oxygénation s'accompagne d'une perte d'azote ammoniacal qui diminue sa valeur agronomique. Cependant, cette technique permet d'élargir les possibilités de valorisation du lisier dans la mesure où elle peut conduire à un allègement des contraintes réglementaires d'application (réduction des distances d'épandage par rapport aux habitations) et, le cas échéant, permettre l'irrigation fertilisante.

– **l'enfouissement à l'épandage** est une technique classique et simple qui consiste à épandre et à enfouir en même temps le lisier. Les systèmes à injecteurs présentent des performances intéressantes lorsque le sol le permet (absence de cailloux, sol ni trop sec ni trop humide...). Sauf dans le cas de lignes d'injection rapprochées, cette localisation peut entraîner une fertilisation de qualité médiocre du fait de la répartition incorrecte des éléments dissous et particuliers dans le sol (faible diffusion des éléments). Les systèmes d'enfouissement peuvent comporter des organes d'émiettement du sol pour favoriser la diffusion et l'infiltration (dents scarificatrices de formes variées).

Dans certains cas, l'épandage en lignes peut être remplacé par un épandage en plain avec enfouissement simultané couplé à un appareil de travail du sol à dents ou à disques.

– **l'enfouissement après épandage** est en fait un chantier décomposé applicable seulement en association avec une préparation de sol. Après le passage de l'épandeur, l'enfouissement est réalisé par un outil de travail du sol à disques ou à dents.

– **les rampes d'épandage** sont des équipements associés aux tonnes à lisier ou, dans certains cas, à une installation d'épandage tractée comme les enrouleurs d'irrigation. La répartition transversale est assurée soit en ligne par des tubes pendants (pendillards), soit en

nappe par des diffuseurs et/ou des déflecteurs plans, répartis sur la largeur de la rampe. L'épandage par rampe est une technique qui réduit les dégagements d'odeurs **pendant l'épandage** dans la mesure où le trajet du lisier dans l'air est très court et s'effectue sans pression et donc sans volatilisation. Cela dit, ce mode d'épandage ne réduit pas les mauvaises odeurs dégagées par les parcelles après l'épandage (odeurs rémanentes), surtout si le temps est chaud !

L'ÉPANDAGE DES FUMIERS

• LES ÉPANDEURS DE FUMIER

Les épandeurs de fumier sont utilisés pour l'épandage des produits ayant plus de 12 à 13 % de matière sèche. En dessous de 18 % de MS, il est nécessaire que l'épandeur soit le plus étanche possible, c'est-à-dire équipé d'une porte télescopique afin d'éviter les fuites et écoulements intempestifs du produit.

Les épandeurs de fumier sont des remorques semi-portées (fig. 102) composées d'un châssis, d'une caisse à fond mouvant, d'organes d'épandage rotatifs généralement situés à l'arrière et de transmissions actionnées par la prise de force des tracteurs pour l'animation du fond mouvant et du système d'épandage.

Ces matériels peuvent atteindre une charge utile de 15 tonnes (parfois plus) et des débits d'épandage variant de 0,8 à 2,5 tonnes par minute.

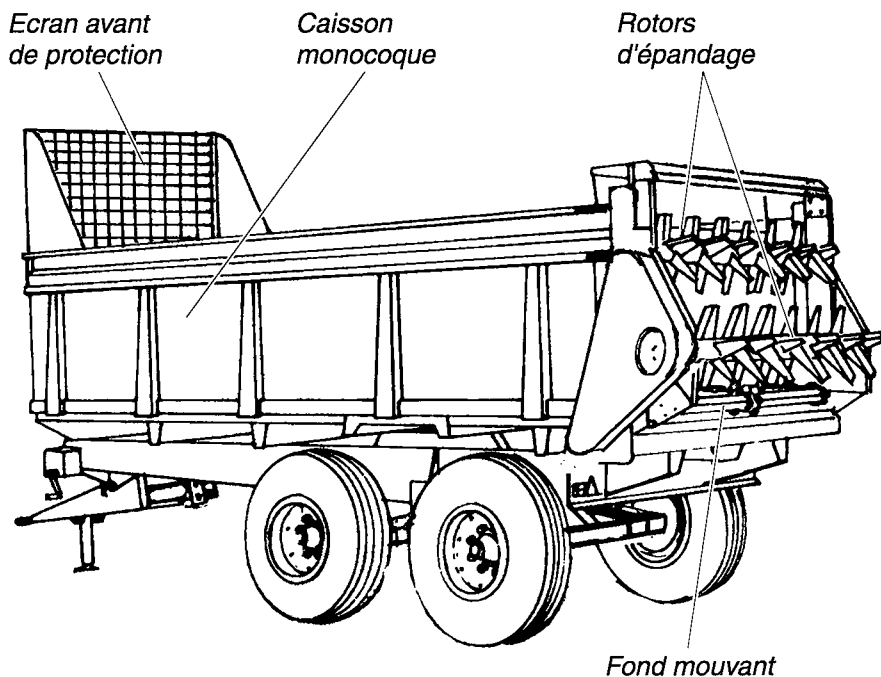


Fig. 102 - Épandeur de fumier à caisse monocoque et double essieu

Compte tenu des doses importantes qu'il est souvent nécessaire d'apporter sur les sols (de 15 à 30 tonnes ou plus, par hectare), les chantiers d'épandage de fumier représentent des tonnages considérables à manipuler, à transporter et à épandre. Du fait du temps passé, des investissements et des moyens de traction à mettre en œuvre, ces chantiers sont relativement coûteux pour les agriculteurs. Plus les matériels ont une largeur de travail importante, plus on réduit théoriquement le nombre de passages de roues, mais plus leur vidange est rapide (pour une dose donnée), cela peut conduire d'ailleurs à repasser sur les traces précédentes pour assurer la continuité de l'épandage. Si l'on veut accroître la capacité de l'épandeur, on a besoin de moyens de traction plus puissants et l'on doit veiller avec encore plus d'acuité à prévenir les risques de détérioration des sols par ornières et compactages. Précisons, par ailleurs, que la valorisation des fumiers implique aussi d'être capable de les épandre régulièrement, à doses faibles et au bon moment.

L'entraînement des organes d'épandage et du fond mouvant est assuré par la prise de force des tracteurs et un arbre de transmission à cardans (fig. 103). Afin de prévenir les risques mécaniques liés aux surcharges et aux blocages des organes d'épandage, les épandeurs disposent d'un ou de plusieurs limiteurs de couple (fig. 104). Le point d'attelage des épandeurs de fumier aux tracteurs s'effectuant, comme pour les remorques semi-portées, au piton ou au crochet

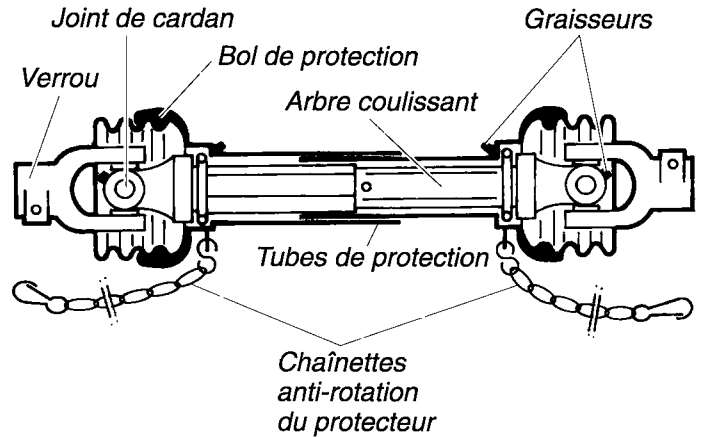


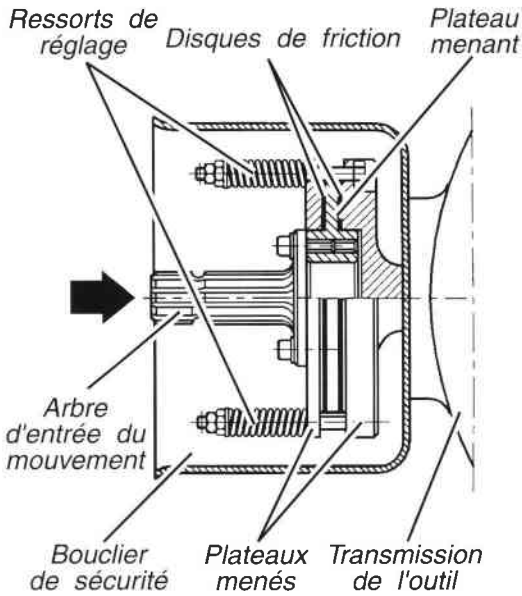
Fig. 103 - **Arbre de transmission à cardans**

d'attelage du tracteur, il convient de débrayer le mouvement de la prise de force dans les virages et les demi-tours afin d'éviter la détérioration du premier joint de cardan. Cette contrainte disparaît si la transmission de l'épandeur dispose, côté tracteur, d'un double joint de cardan (joint homocinétique) appelé aussi joint grand angle (se reporter aux instructions de la notice d'utilisation).

Dans certains cas, les organes d'épandage peuvent être démontables afin de pouvoir utiliser la remorque à d'autres usages. Le fumier étant une matière corrosive et salissante, la structure et les organes des épandeurs doivent être efficacement protégés par des apprêts et des peintures antirouille résistants et doivent être entretenus et nettoyés fréquemment.

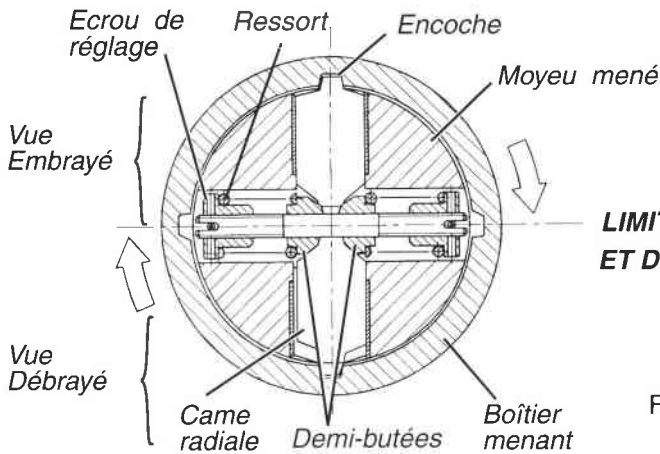
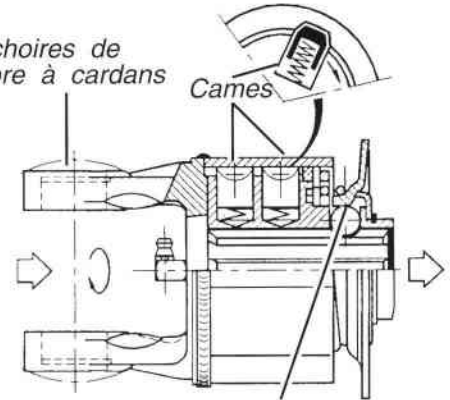
A partir de la même structure de base (châssis-caisse), les constructeurs proposent souvent plusieurs équipements d'épandage : rotors (ou hérissans) horizontaux, rotors (ou hérissans) verticaux, plateaux rotatifs.

La vitesse périphérique des rotors d'épandage du fumier se situe en moyenne entre 8 et 13 mètres par seconde (de 28 à 46 km/h). Compte tenu de la densité des produits, et surtout du



LIMITEUR DE COUPLE A FRICTION

LIMITEUR DE COUPLE A CAMES RADIALES



LIMITEUR A CAMES RADIALES ET DEBRAYAGE AUTOMATIQUE

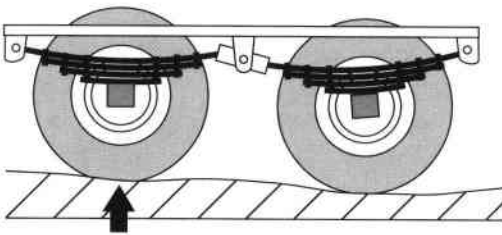
Fig. 104 - Différents limiteurs de couple

risque de présence de pierres dans les fumiers, **les chantiers d'épandage sont dangereux en raison des risques de projections vers la cabine du tracteur, vers l'arrière de l'épandeur ou dans toutes autres directions.**

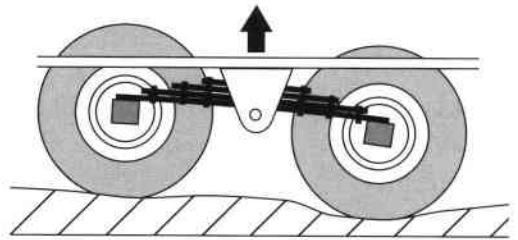
• **Le châssis :**

Selon la nature des sols où sont réalisés les épandages, les épandeurs de fumier semi-portés peuvent être équipés d'un double essieu à partir de 7 ou de 8 tonnes. A la date de rédaction de cet ouvrage, les limites réglementaires pour le poids total autorisé en charge (PTAC) sont de 16 tonnes pour un essieu, 24 tonnes pour deux essieux et 32 tonnes pour trois essieux.

Comme pour les remorques agricoles, les essieux peuvent être disposés en tandem, en balancier ou en boggie (fig. 105) et, dans certains cas, peuvent être autosuiveurs ou directeurs (fig. 106); leur positionnement longitudinal est étudié pour obtenir un report de charge



ESSIEUX TANDEM



ESSIEUX BOGGIE

Fig 105 - **Principe du montage d'essieux en tandem ou en boggie**

qui ne dépasse pas les dispositions réglementaires de charge verticale sur le point d'attelage ; les timons d'attelage peuvent être munis de systèmes d'amortissement (fig. 107) et la signalisation doit être assurée de manière efficace comme sur tous les véhicules remorqués. En ce qui concerne les pneumatiques, la monte de pneus larges à basse pression est souvent pratiquée afin de réduire les risques de tassement des sols et la création d'ornières.

Pour le freinage, les épandeurs doivent répondre aux exigences du Code de la route, au même titre que les remorques. Le Code de la route distingue deux cas, selon que le poids total autorisé en charge (PTAC) de la remorque est inférieur ou supérieur à 6 tonnes.



Fig. 106 - **Vue d'un essieu directeur à commande hydraulique**
(photo Cemagref)



Fig. 107 - Timon d'épandeur muni d'un amortisseur à lames elliptiques
(photo Cemagref)

çon modulable depuis le poste de conduite du tracteur et qui puisse bloquer les roues de la remorque en cas de rupture d'attelage (fig. 108). Les liaisons entre le tracteur et la remorque sont assurées par un raccord hydraulique normalisé et par un câble agissant en cas de rupture d'attelage. Le circuit hydraulique du tracteur comprend un distributeur-régulateur de pression parfois appelé « valve » de freinage de remorque. Ce distributeur-régulateur de pression est installé de manière à prélever l'énergie de freinage en priorité sur les autres circuits, et il est conçu pour délivrer une pression de freinage progressive et proportionnelle aux sollicitations du conducteur et pour limiter cette pression à 150 bars. Selon les cas, la valve de freinage est à commande manuelle ou couplée aux freins du tracteur.

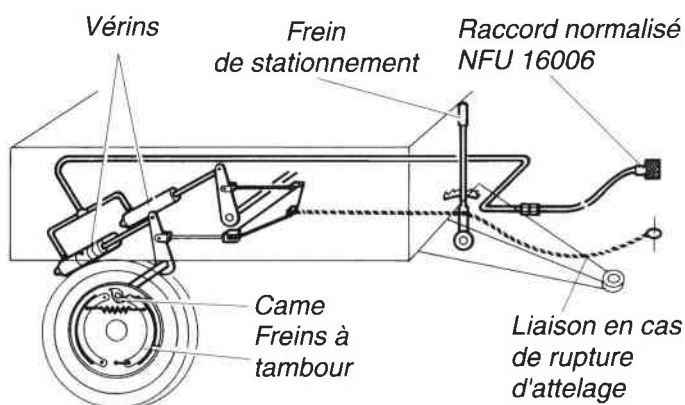


Fig. 108 - Le principe du freinage hydraulique d'une remorque

Les systèmes de freinage d'urgence des remorques, en cas de rupture d'attelage, sont constitués soit d'un dispositif mécanique (fig. 108), soit d'un dispositif hydromécanique (fig. 109).

• La caisse à fond mouvant :

Il existe deux types de caisses d'épandeur à fumier : les caisses à ridelles démontables et les caisses monocoques. Les caisses à ridelles démontables sont polyvalentes, mais plus difficiles à rendre étanches et à nettoyer. Les caisses monocoques sont moins polyvalentes, mais plus étanches et plus faciles à nettoyer.

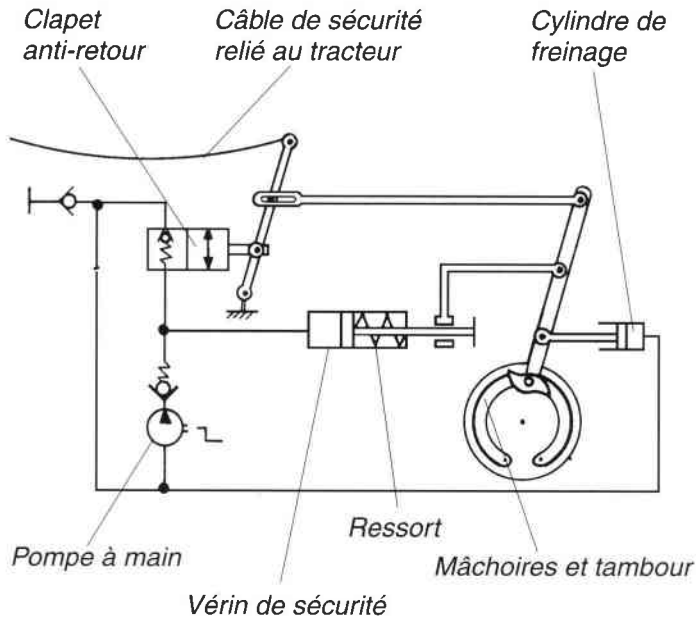


Fig. 109 - Principe du freinage d'une remorque avec sécurité hydromécanique en cas de rupture d'attelage

La hauteur de la caisse par rapport au sol dépend de la capacité de l'épandeur et de la taille des pneumatiques ; elle est généralement limitée afin de permettre le chargement avec les chargeurs frontaux des tracteurs. L'intérieur de la caisse doit être le plus lisse possible pour faciliter le déplacement du fumier vers le système d'épandage. Certains constructeurs proposent des planchers en bois qui améliorent le glissement et sont moins vulnérables à la corrosion ; il existe aussi des caisses légèrement évasées vers l'arrière (en forme de cône inversé) afin de faciliter le déplacement régulier de la masse de fumier vers les organes d'épandage par diminution du frottement contre les parois latérales.

Le fond mouvant (fig. 110) est constitué de deux, trois ou quatre chaînes longitudinales (fig. 111) reliées par des barres métalliques en U ou en L espacées de 20 à 40 cm. Ce train de chaînes tourne en boucle fermée en se déplaçant à l'aller sur le dessus du plancher de l'épandeur et, au retour, par le dessous (à vide). Un mécanisme de transmission entraîne les chaînes et les barres à une vitesse de 0,3 à 5 mètres/minute, de manière à déplacer lentement la masse de fumier vers les rotors d'épandage, selon le débit d'épandage souhaité. Les matériels ayant une charge utile supérieure à 8 tonnes utilisent souvent deux trains de deux chaînes pour mieux répartir les contraintes. Dans tous les cas, un réglage de leur tension permet de compenser l'usure et l'allongement des chaînes.

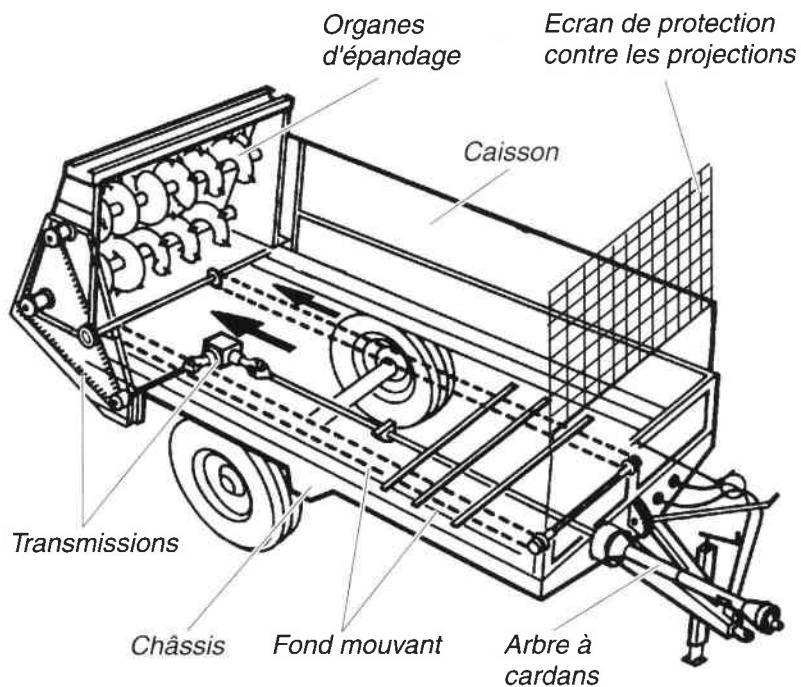


Fig. 110 - Vue générale d'un épandeur de fumier à ridelles

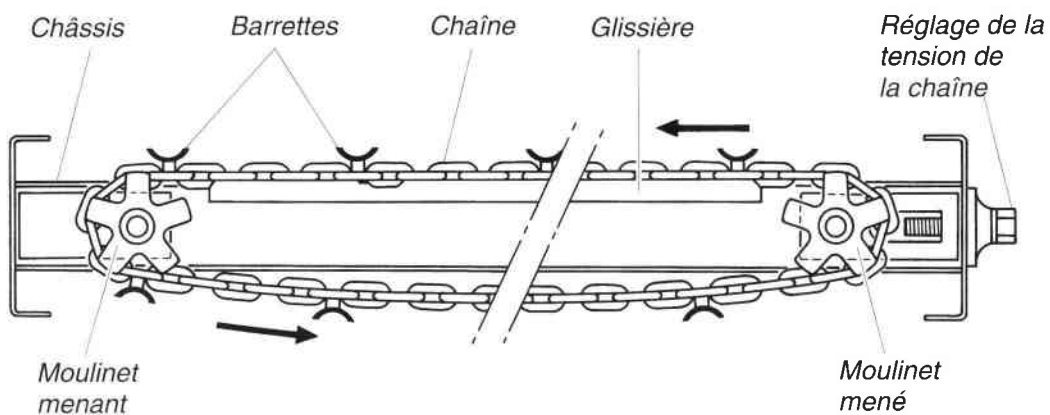


Fig. 111 - Principe d'un fond mouvant

L'entraînement du fond mouvant est assuré soit mécaniquement par la prise de force du tracteur, soit hydrauliquement par un moteur hydraulique alimenté par les circuits du tracteur ou par un groupe hydraulique séparé, intégré à l'épandeur.

Dans le cas d'un entraînement mécanique (fig. 112), la transmission peut être soit discontinue à amplitude réglable par un système de cliquet et de bielle-manivelle, soit continue par un gros réducteur à pignons interchangeables ou à sélecteur de rapport. Selon les cas, un inverseur de marche est prévu en cas de bourrage ou pour mieux répartir le produit pendant l'épandage.

L'entraînement du fond mouvant par un moteur hydraulique (fig. 113) permet de faire varier facilement la vitesse du fond mouvant en modifiant le débit d'alimentation du moteur avec un régulateur de débit. En cas de bourrage, cette disposition permet aussi d'inverser facilement le mouvement du fond par un distributeur double effet. La transmission hydraulique du fond mouvant permet d'embrayer séparément les organes d'épandage et le fond mouvant, à l'arrêt, et d'éviter les surcharges mécaniques pouvant résulter d'un démarrage avec le produit contre les rotors. Cela dit, le bénéfice d'un entraînement hydraulique n'est réel que si le fonctionnement

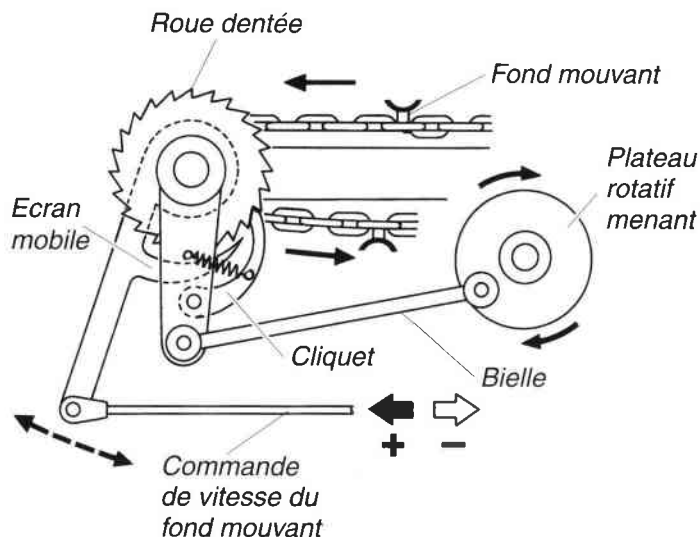


Fig. 112 - Entraînement mécanique d'un fond mouvant par cliquet et bielle-manivelle

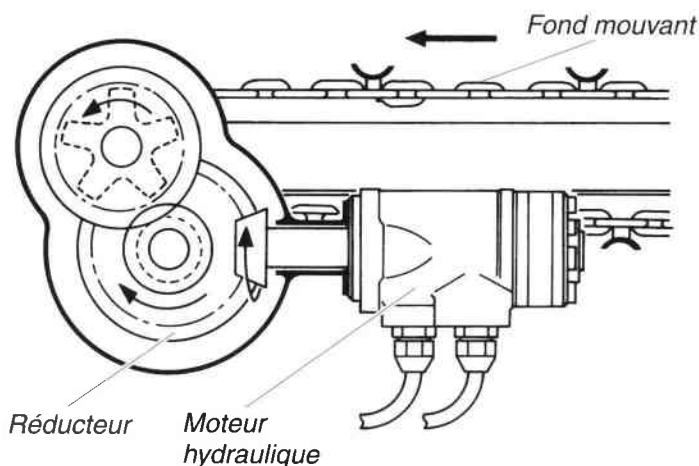


Fig. 113 - Entraînement d'un fond mouvant par moteur hydraulique

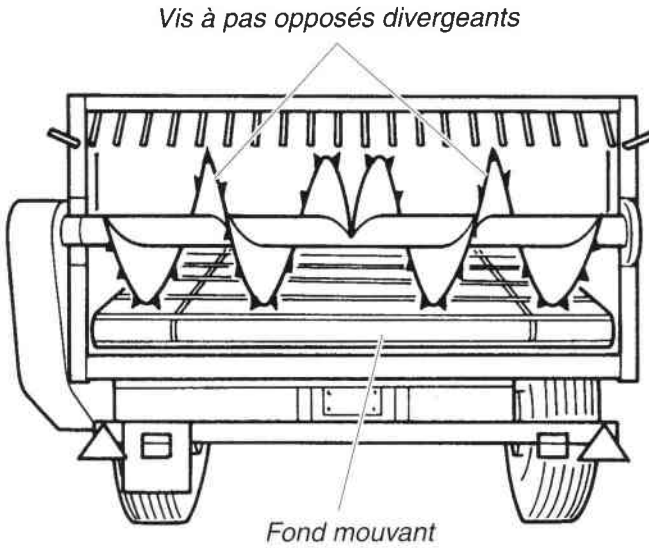


Fig. 114 - **Système d'épandage de fumier par rotor horizontal unique à vis à pas divergents**

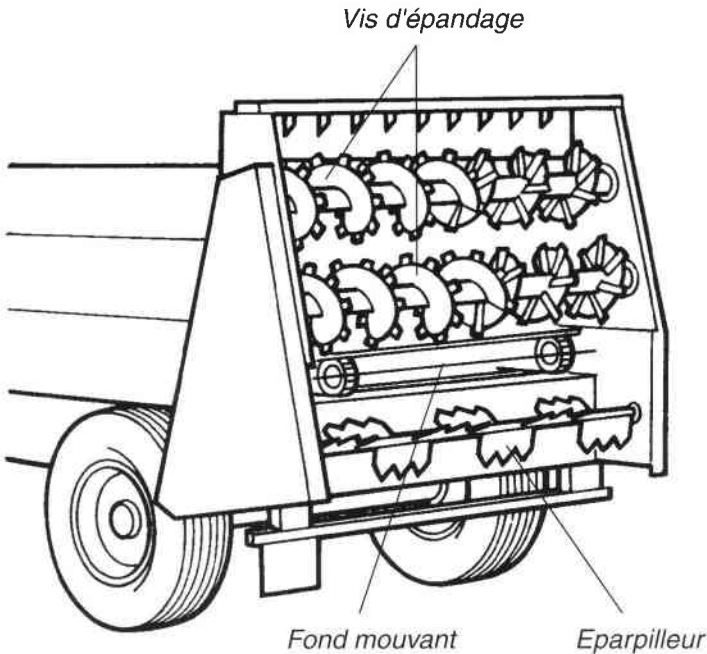


Fig. 115 - **Système d'épandage de fumier à deux rotors horizontaux et éparpilleur rotatif inférieur**

du régulateur hydraulique de débit est fiable et régulier, et que son réglage est précis sur toute la plage d'action. Dans le cas contraire, la régularité d'épandage peut être sensiblement affectée.

• **Les organes d'épandage arrière à axes horizontaux :**

Ces organes, appelés couramment hérissons, déchiquettent et épandent le fumier poussé par le fond mouvant. Ils se composent d'un à trois rotors horizontaux (fig. 114 et 115) tournant généralement dans le même sens et présentant des formes très variées :

- cylindres munis de dents, de couteaux, de lames ou de bèches,
- vis hélicoïdales de 30 à 60 cm de diamètre, équipées de couteaux périphériques,
- disques crénelés montés obliquement sur un arbre, etc.

Les hérissons horizontaux sont très répandus, ils épandent sur une faible largeur (de 2,4 à 3 mètres). Certains modèles peuvent être équipés d'un éparpilleur complémentaire constitué soit d'un rotor horizontal à vis divergentes de grand diamètre placé en second plan, soit d'un rotor horizontal placé sous les rotors d'épan-

dage. Ce dernier système est également proposé pour les épandeurs utilisés pour l'épandage des amendements calcaires (marne par exemple).

Le travail des organes d'épandage peut être résumé en trois phases : **attaque de la masse** de produit poussée par le fond mouvant, **émiettement** et **projection**.

L'attaque du fumier, ou plutôt la régularité d'attaque des rotors horizontaux, est conditionnée par la nature du fumier et sa hauteur par rapport au niveau des hérissons. Cette hauteur a une influence sensible sur l'action des organes de déchetage et sur le débit d'épandage. Pour éviter les irrégularités d'épandage, il convient de réaliser un chargement régulier de l'épandeur dans le sens longitudinal, dans le sens transversal et de ne pas dépasser la hauteur du portique supportant les hérissons (se reporter aux instructions de la notice d'utilisation).

L'émiettement dépend de la nature du fumier et de son état de décomposition : un fumier de paille courte décomposé et assez sec s'émiette plus facilement qu'un fumier dense (peu pailleux). L'émiettement dépend aussi de la forme des organes de déchetage et de la conjugaison d'actions des rotors.

Dans le cas des hérissons horizontaux, ces derniers tournant dans le même sens, le fumier se trouve fortement décheté au passage entre deux rotors. Un hérisson inférieur d'un diamètre plus grand peut permettre de mieux reprendre la matière plus tassée en fond de caisse.

La projection s'effectue sur une largeur pratiquement égale à celle de la caisse (2,50 m environ), sauf pour les hérissons à vis à pas divergents qui tendent à épandre sur une largeur un peu plus élevée (de 3 à 4 mètres). Souvent, les axes des hérissons sont dans un plan oblique vers l'arrière afin de réaliser un front d'attaque incliné, limitant les à-coups d'alimentation et d'épandage dus aux glissements et aux éboulements de fumier devant les hérissons.

• **Les organes d'épandage arrière à axes verticaux :**

Ce système d'épandage (en progression depuis 1990) se caractérise par une largeur d'épandage plus grande pouvant atteindre 6 mètres avec quatre rotors (fig. 116 et 117) et plus avec deux rotors (fig. 118 et 119). Cette largeur plus importante réduit le nombre de passages et de traces de roues dans les parcelles et évite de rouler rapidement lors des épandages à faible dose.

Selon les cas, ces équipements se montent soit sur des épandeurs classiques (fig. 116, 117 et 118) en lieu et place d'un équipement à rotors horizontaux, soit sur des épandeurs spécifiques de conception assez basse et étroite (fig. 119), équipés de pneus larges basse pression. Les caisses classiques sont équipées de deux ou quatre rotors verticaux, tandis que les caisses surbaissées disposent de deux rotors verticaux inclinés vers l'avant.

Contrairement aux hérissons horizontaux, les rotors verticaux tournent en sens inverse l'un de l'autre ; cette disposition produit une nappe d'épandage plus ouverte, et donc une largeur de travail plus grande.

• **Les épandeurs de fumier à épandage latéral par turbine (fig. 120) :**

Ces épandeurs possèdent un châssis et une caisse à fond mouvant semblables aux épan-

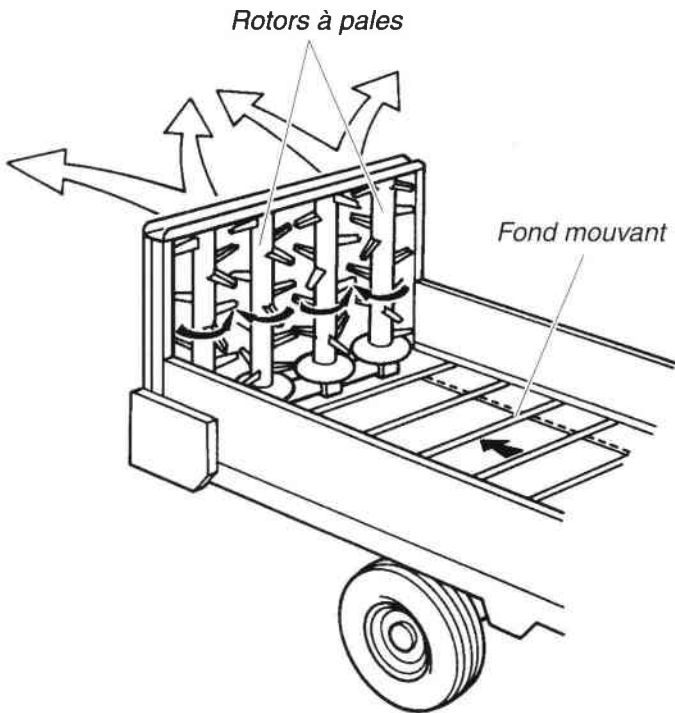


Fig. 116 - Système d'épandage de fumier à quatre rotors verticaux à pales

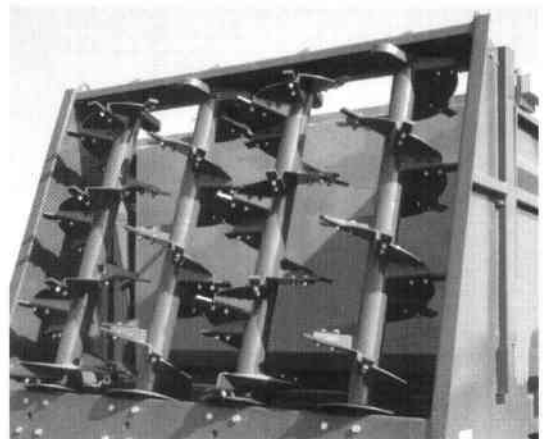


Fig. 117 - Vue arrière d'un épandeur de fumier à rotors verticaux
(photo Cemagref)

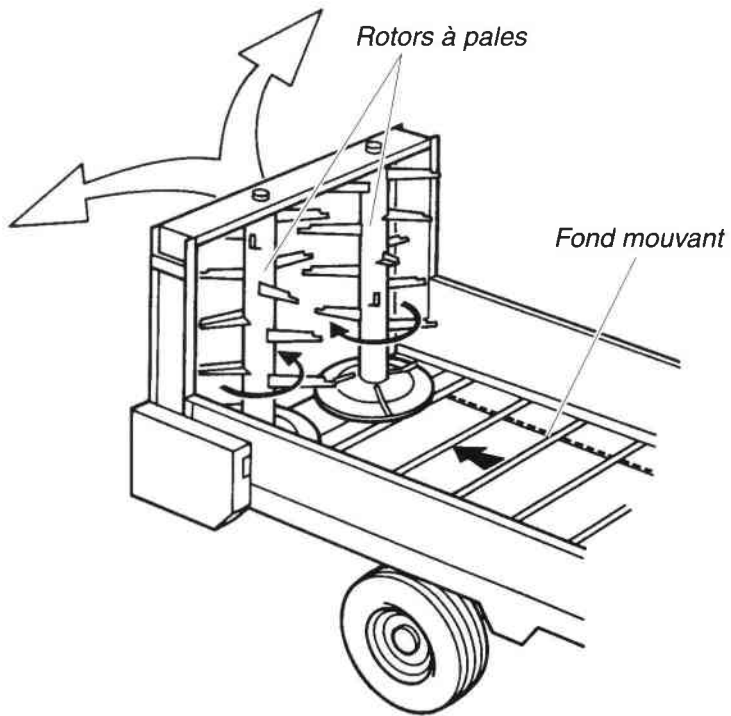


Fig. 118 - Système d'épandage de fumier à deux rotors verticaux et à pales

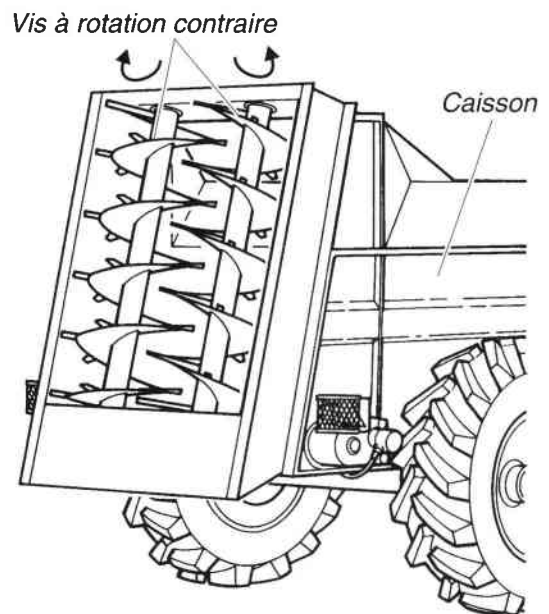


Fig. 119 - Système d'épandage de fumier à deux rotors verticaux à vis

deurs classiques, mais le sens de déplacement du fond mouvant va de l'arrière vers l'avant pour alimenter une turbine qui projette le fumier sur le côté. Cette disposition, peu fréquente, présente l'intérêt de maintenir un report de charge sur le point d'attelage, favorisant l'adhérence du tracteur. Ce système s'applique surtout à des matériels de faible tonnage utilisés pour des épandages variés (fumier, lisier pâteux, fientes, boues de stations d'épuration...).

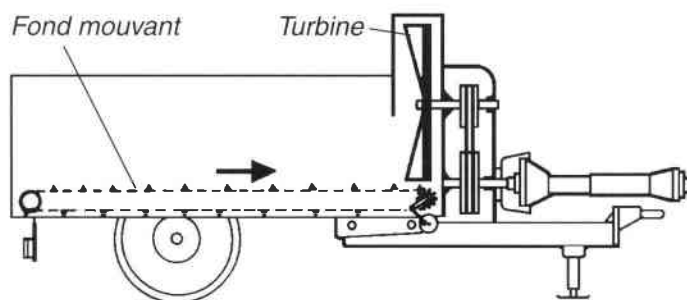


Fig. 120 - Épandeur de fumier à turbine avant

• LES ÉPANDEURS DE MATIÈRES FERTILISANTES NON POMPABLES

Il s'agit soit d'équipements adaptables aux épandeurs classiques de fumier, soit d'épandeurs spécifiques, capables d'épandre des matières plus ou moins pâteuses ou chargées en litières : fientes de volailles, lisiers pailleux, sédiments de fosse à lisier, boues de station d'épuration...

• Les équipements adaptables sur les épandeurs de fumier classiques :

Il s'agit essentiellement de portes de dosage et de tables d'épandage. Ces adaptations sont en principe seulement disponibles pour les épandeurs dont la structure permet une étanchéité suffisante. Dans les cas les plus fréquents, les dispositifs d'épandage arrière sont les mêmes que pour le fumier.

– **la porte de dosage** (fig. 117 et 121) joue le rôle de vanne de régulation de hauteur et donc de débit. Cette porte à ouverture verticale est placée entre la masse de produit et les rotors d'épandage ; son étanchéité avec les parois est assurée par des bandes souples de caoutchouc ou de matière plastique. Fermée pendant le chargement et le transport, la porte est commandée hydrauliquement par des vérins. Pendant l'épandage, elle est plus ou moins ouverte en fonction du débit souhaité vers les organes d'épandage.

– **les tables d'épandages** (fig. 122 et 123) sont placées dans le prolongement arrière du plancher des épandeurs et sont associées à une hotte ou à un panneau déflecteur. Elles sont équipées de **rotors** à axes verticaux, munis de deux ou de quatre pales. En s'écoulant sur les rotors de la table, le produit est projeté par la force centrifuge sur une largeur de 8 à 12 m (parfois 15 m). Le rôle des hérissos de l'épandeur est d'émietter le produit et d'alimenter la

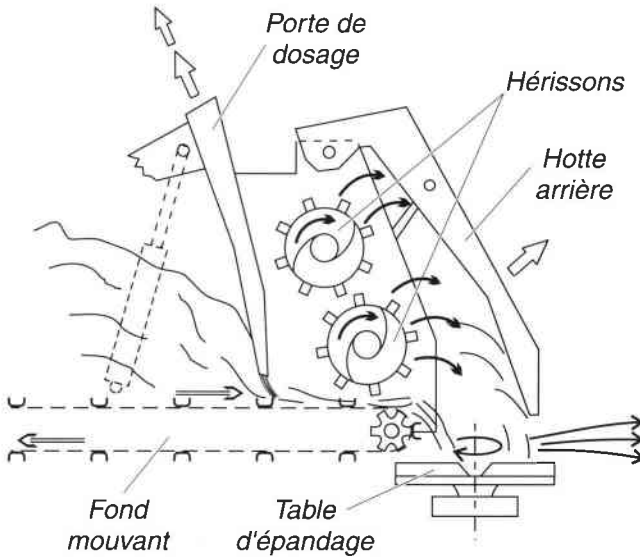


Fig. 121 - Épandeur muni d'une porte de dosage et d'une table pour l'épandage des matières molles

table d'épandage. La hotte orientable, placée à l'arrière des hérissons horizontaux, fait écran et permet de rabattre le produit déchiqueté sur les plateaux rotatifs.

• **Les épandeurs latéraux à vis et turbine avant (fig. 124) :**

Ce type d'épandeur, parfois utilisable pour le fumier, a été étudié pour l'épandage des lisiers épais et des fientes de volailles. Il comporte une caisse métallique étanche avec un fond mouvant ou une ou deux vis d'Archimède qui alimentent une turbine placée à l'avant dans l'axe de la caisse. La turbine de grand diamètre, entraînée par la prise de force du tracteur, projette latéralement le produit au travers d'une tuyère à sortie orientable avec une portée de 7 à 10 mètres.

L'utilisation de ces matériels est en principe réservée à des produits pâteux relativement homogènes. Il n'est pas facile d'obtenir une largeur de travail précise et une répartition transversale correcte, ce qui rend également difficile l'appréciation des distances de passage et les recouvrements.

• **Les épandeurs à vis et plateaux centrifuges arrière (fig. 125) :**

Ces épandeurs ont une caisse étanche en forme de trémie longitudinale au fond de laquelle viennent se loger une ou deux vis d'Archimède. La ou les vis brassent le produit contre une trappe de dosage arrière actionnée par un vérin hydraulique. A sa sortie de la trappe, le produit est repris par deux disques rotatifs munis de pales. Sur certaines réalisations, le support des disques d'épandage est inclinable dans l'axe longitudinal pour faire varier la largeur d'épandage, et dans l'axe transversal pour régler la symétrie de répartition.

• **Les épandeurs latéraux à fléaux (fig. 126 et 127) :**

Ces épandeurs sont constitués d'une caisse étanche supportant un rotor longitudinal, muni de chaînes et de fléaux. Le rotor, animé par la prise de force, peut se déplacer verticalement au-dessus de la caisse, pour permettre une attaque progressive des fléaux qui projettent le produit sur le côté grâce à un déflecteur supérieur en forme de hotte ou de casquette.

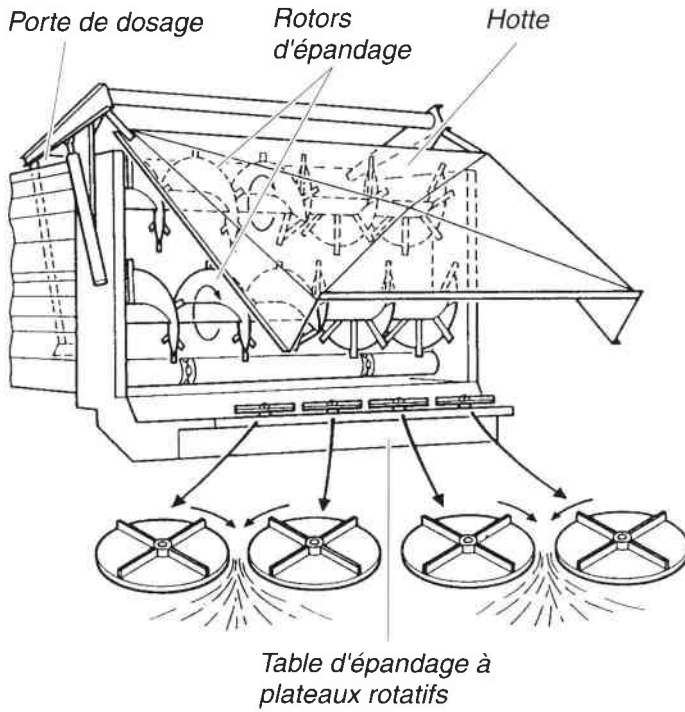


Fig. 122 - Table d'épandage à tableaux rotatifs



Fig. 123 - Vue d'une table après l'épandage de boues de station d'épuration
(photo Cemagref)

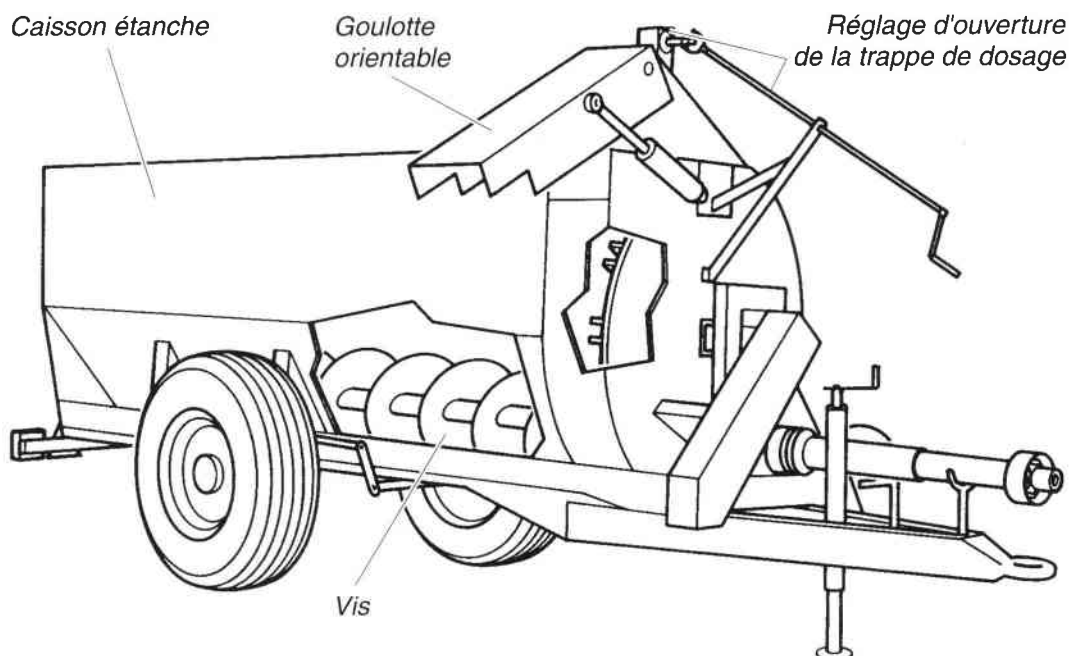


Fig. 124 - Épandeur à caisson étanche, vis d'alimentation et turbine d'épandage latéral

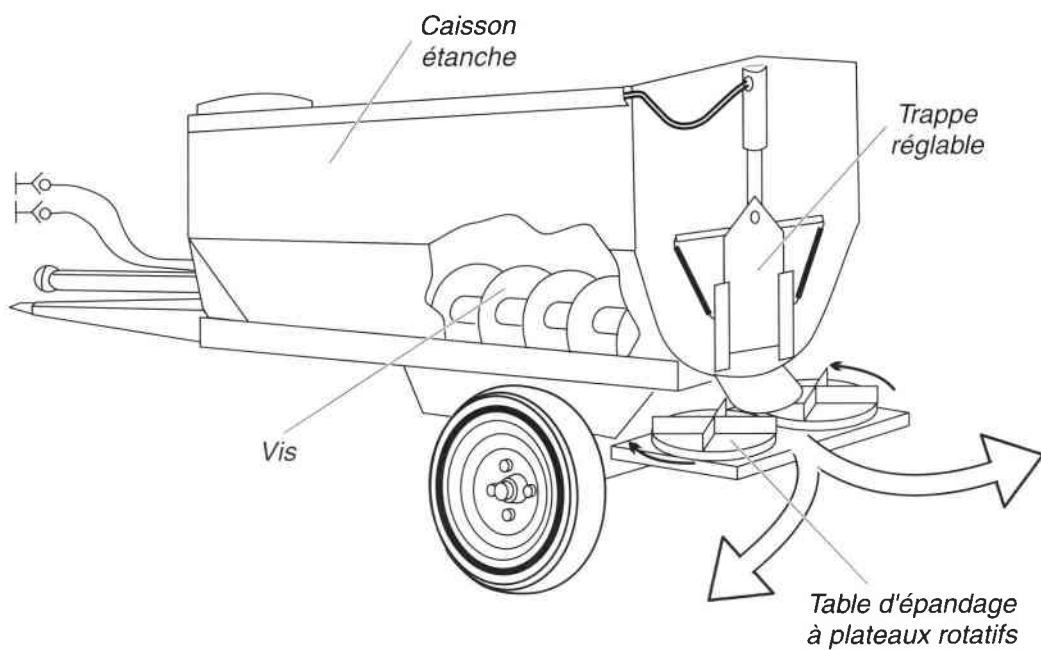


Fig. 125 - Épandeur à caisson étanche, vis d'alimentation et plateaux rotatifs

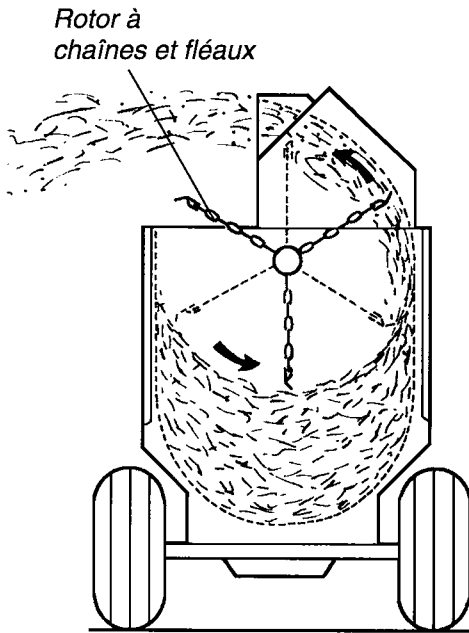


Fig. 126 - Principe de l'épandage latéral avec un épandeur à fléaux

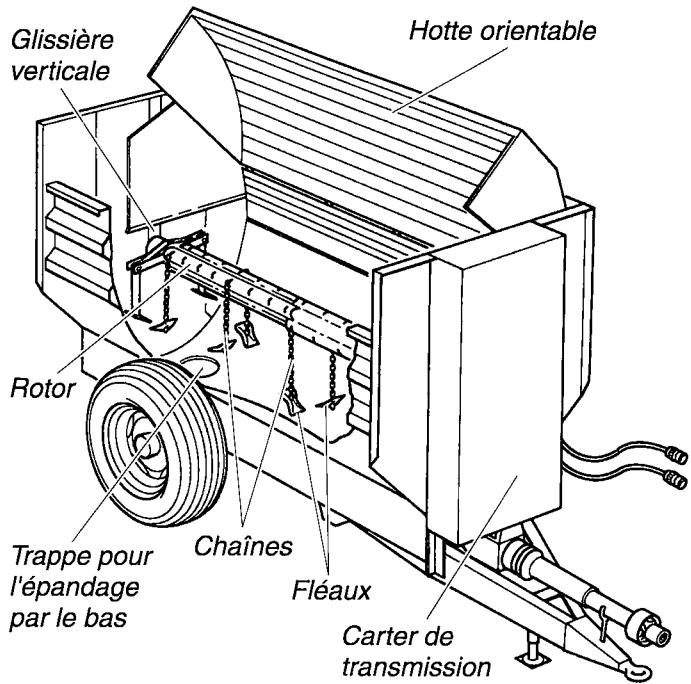


Fig. 127 - Vue d'un épandeur à fléaux
(d'après document Lucas-G)

Ce matériel, adapté aux lisiers liquides ou épais, aux fientes de volailles et aux boues des stations d'épuration déshydratées mécaniquement, peut aussi épandre du fumier et du lisier. Le réglage du débit est obtenu par la descente plus ou moins rapide du rotor et (ou) en faisant varier sa vitesse de rotation. Selon les cas, il peut être possible d'épandre du lisier ou du purin, sans faire appel au rotor à fléaux, par l'intermédiaire d'une vanne d'épandage placée au fond de la caisse et d'une turbine d'épandage à axe vertical.

La principale qualité de ce type d'épandeur est sa polyvalence, mais il est difficile de maîtriser la dose épandue et la répartition au sol.

• LA MAÎTRISE DE LA DOSE DE FUMIER À ÉPANDRE

A la date de rédaction de cet ouvrage, il n'existe pas de solutions techniques satisfaisantes pour appliquer et respecter une dose d'épandage pour les fumiers et les fertilisants organiques non pompables en raison de la grande diversité de leurs caractéristiques physiques (homogénéité, masse volumique, adhésivité, cohésion...) et de l'absence de règles fiables de caractérisation. En raison des impératifs de protection de l'environnement et de la nécessité de trouver des voies de valorisation rentables pour ces matières organiques, des recherches sont conduites pour parvenir à une caractérisation plus fiable et plus rapide des produits et à une meilleure maîtrise des réglages des matériels.

Pour le fumier de bovins par exemple, non seulement il est compliqué de définir un **débit moyen des appareils**, mais il est, en plus, difficile d'obtenir une **répartition transversale** et une **largeur de travail** constantes ; et on constate par ailleurs des variations importantes dans la **répartition longitudinale**.

Le Cemagref met au point des méthodologies de mesure de la dose et de la régularité longitudinale du débit (laboratoire de Montoldre). A terme, des essais complets intégreront la mesure de la régularité transversale pendant la phase de débit constant et la mesure du degré d'émiettement. Parallèlement, le Cemagref (laboratoire de Rennes) et les partenaires professionnels œuvrent à la définition de méthodes de caractérisation des produits organiques. Ces travaux permettront aux constructeurs de réaliser des essais et d'établir des tableaux de réglages pour chaque modèle de machine et de fournir des notices de références aux utilisateurs. L'objectif étant de mettre à la disposition des agriculteurs des matériels faciles à régler et aptes à épandre une dose bien définie d'un produit dont on connaît les caractéristiques et la valeur fertilisante.

• Le débit d'épandage :

La maîtrise du débit d'épandage est la première étape d'un épandage respectant une dose/ha, résultant elle-même d'un bilan de fertilisation d'une parcelle et d'une culture. Comme pour la plupart des épandages, le débit (D) en t/min est connu par la relation :

$$D = \frac{Q \times D \times L \times V}{600}$$

Q = quantité à épandre par hectare (t/ha)

D = débit de l'épandeur en m³/min

L = largeur de travail (m)

V = vitesse d'avancement (km/h)

La démarche de base la plus simple consiste à connaître le poids du chargement de l'épandeur et la vitesse réelle d'avancement pendant l'épandage. Si la distance entre passages est par exemple de 4 mètres, le poids du chargement de 9 tonnes, le temps de vidange de 305 secondes (5 minutes et 5 secondes), et la vitesse réelle d'avancement de 7,6 km/h, le débit moyen est égal à $1,77 \text{ t/min}$ ($9/305 \times 60$), soit une dose moyenne égale à : $(1,77 \times 600) / (4 \times 7,6) = 35 \text{ t/ha}$.

Le pesage peut être réalisé soit avec des pesons que l'on place sous les roues et béquilles des épandeurs, soit sur un pont-bascule.

Avec les épandeurs de fumier, le réglage du débit s'effectue en agissant sur la vitesse du fond mouvant et des organes d'épandage. En reprenant les valeurs de l'exemple précédent : pour épandre 35 tonnes de fumier à l'hectare avec une vitesse d'avancement de 7,6 km/h et une largeur de 4 m, le débit est obtenu avec une vitesse de fond mouvant de 1,14 m/min. Selon les cas, cette vitesse de fond mouvant peut être obtenue en réglant le pas d'entraînement de la roue à cliquet (pas réglé par exemple à 3 dents) ou le débit du moteur hydraulique d'entraînement (molette du régulateur de débit sur la graduation 3,5 par exemple). Ces indications sont valables pour une valeur de densité donnée du fumier à épandre.

Attention, il convient de bien mesurer le sens des expressions : **débit moyen** et **dose moyenne**. En effet, ces valeurs cachent une difficulté propres aux épandeurs de fumier dont le fonctionnement permet d'obtenir difficilement un débit constant pendant tout la période de vidange de la caisse. Maîtriser le tonnage moyen par hectare est une chose, maîtriser la régularité d'épandage en est une autre, bien plus délicate à obtenir ! On constate en effet que le débit réel pendant l'épandage est 1,2 à 1,5 fois plus grand que le débit moyen en raison des variations de régularité longitudinale dues au régime d'alimentation des organes d'épandage (se reporter au paragraphe suivant).

• La répartition longitudinale :

La répartition longitudinale est très dépendante de la régularité de hauteur et du niveau de chargement des épandeurs. La figure 128 montre un diagramme de répartition longitudinale résultant d'essais conduits par le Cemagref : on constate, dans cet exemple, un débit plus faible au début et à la fin de la vidange de l'épandeur pour les raisons suivantes :

– **au début de l'épandage**, les organes d'épandage n'attaquent que partiellement le pro-

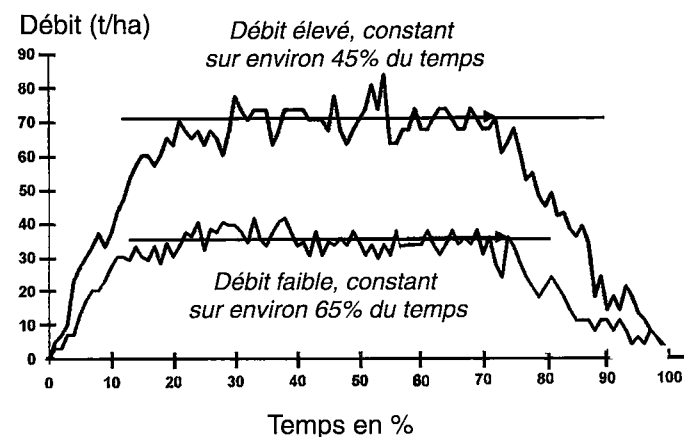


Fig. 128 - Diagramme de répartition longitudinale d'un épandeur de fumier, en fonction du débit (source Cemagref)

duit car l'utilisateur doit éviter de charger le fumier contre le mécanisme d'épandage pour éviter le démarrage de celui-ci en charge,

– **en fin d'épandage**, la diminution de quantité de fumier dans la caisse s'accompagne d'éboulements successifs du produit qui a tendance à être étalé par le fond mouvant.

Cet exemple montre aussi (fig. 128) que le débit de l'épandeur a une influence sur la période de régularité ou de stabilité d'une vidange : la courbe supérieure correspondant à un débit élevé présente une période de stabilité de débit représentant 45 % du temps de vidange, alors que la courbe inférieure correspondant à un plus faible débit présente une période de stabilité du débit représentant 65 % du temps de vidange. La diminution de la période de stabilité de débit constatée lorsque le débit augmente est vraisemblablement due, dans cet exemple, à la vitesse accrue du fond mouvant qui tend à amplifier les phénomènes décrits précédemment pour les phases de début et de fin de vidange.

D'une manière générale, les variations de hauteur de chargement se traduisent directement par des différences de débit et des variations de répartition longitudinale.

• La largeur de travail et la répartition transversale :

Ces deux valeurs ne peuvent être appréciées qu'en pratiquant des essais d'épandage et des mesures (poids par unité de surface) sur des surfaces de mesure (sols d'essais quadrillés, aires bâchées, bacs de réception...). La constance de la largeur et la qualité de répartition dépendent du produit (densité, structure, homogénéité) et des organes d'épandage (forme des pièces travaillantes et mode d'action). A titre d'exemple, certains organes qui paraissent les mieux adaptés à du fumier décomposé peuvent devenir moins efficaces avec du « fumier compacté » venant d'être extrait d'une stabulation libre.

Une étude réalisée en 1992 par l'ADEME et une autre conduite dans la Mayenne en 1994 par la FNCUMA pour le ministère de l'Agriculture montrent que la **régularité d'épandage** des épandeurs de fumier est très sensible aux caractéristiques du fumier et des organes d'épandage ; nécessité de réaliser un chargement également réparti sans dépasser la hauteur prescrite ; pour les recouvrements des passages, tenir compte des variations de largeur d'épandage selon les produits... La figure 129 montre un diagramme de répartition transversale relevé après le passage

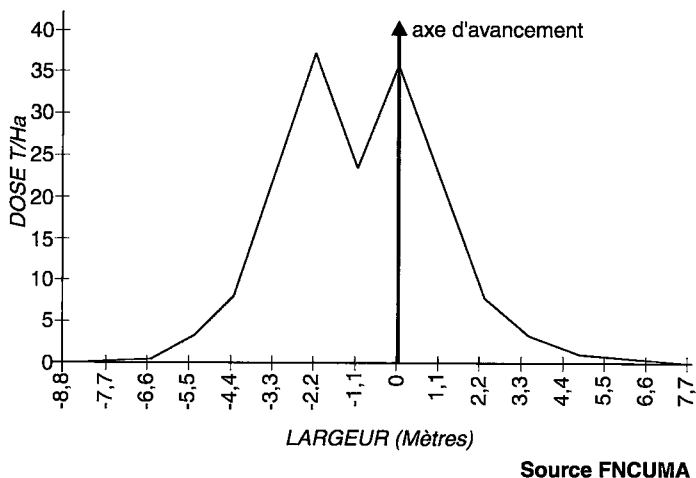


Fig. 129 - Diagramme de répartition transversale d'un épandeur de fumier

d'un épandeur de 10 tonnes à deux hérissons verticaux avec du fumier de bovins ; le pic en creux du milieu peut être la conséquence du recouvrement insuffisant des zones de projection des rotors droite-gauche (avec un produit différent, ce creux pourrait être plus grand ou plus faible) ; la dissymétrie du diagramme (différence de 2 mètres environ entre la zone droite et la zone gauche) peut être tout simplement dû à un chargement mal réparti (tas déporté sur le côté droit) ou à une déviation ponctuelle du tas dans la caisse au moment précis du passage sur l'aire d'essai.

L'ÉPANDAGE DES LISIERS

• LES ÉQUIPEMENTS POUR L'HOMOGENÉISATION DES LISIERS EN FOSSE

La séparation des urines et des fèces dès leur excrétion par les animaux permettrait, si elle pouvait être pratiquée, une gestion différenciée des produits et un élargissement des possibilités de valorisation. Cet objectif, appelé **séparation de phases** (séparation des matières liquides et particulaires), est l'objet de recherches depuis de nombreuses années, mais l'application des procédés efficaces se heurte souvent à de fortes contraintes économiques qui obligent les éleveurs à utiliser fréquemment le principe du stockage unique en fosse. Dans ce cas, la décantation des matières particulaires conduit à l'accumulation en fond de fosse de quantités importantes de sédiments ou de boues plus ou moins visqueuses, chargées d'éléments plus ou moins grossiers selon l'organisation et le type d'élevage. La technique la plus fréquente consiste à procéder à une reprise unique en homogénéisant les constituants du lisier afin de permettre leur pompage et leur épandage avec des tonnes à lisier. Cette homogénéisation en fosse peut être effectuée soit avec des **malaxeurs de lisier**, soit avec des **pompes à lisier**.

• Les malaxeurs de lisier :

Ces matériels sont fréquemment utilisés. Il s'agit soit de brasseurs à hélice à moteurs électriques immergés (lents ou rapides), soit de malaxeurs entraînés par la prise de force des tracteurs. Les premiers sont souvent utilisés pour les lisiers de porcs et les seconds pour les lisiers de bovins. La figure 130 montre un type de malaxeurs à hélice ou à vis, plongé en fond de fosse. Ces malaxeurs, appelés aussi « **mixeurs** », sont attelés à l'arrière des tracteurs et animés par la prise de force ; ils pro-

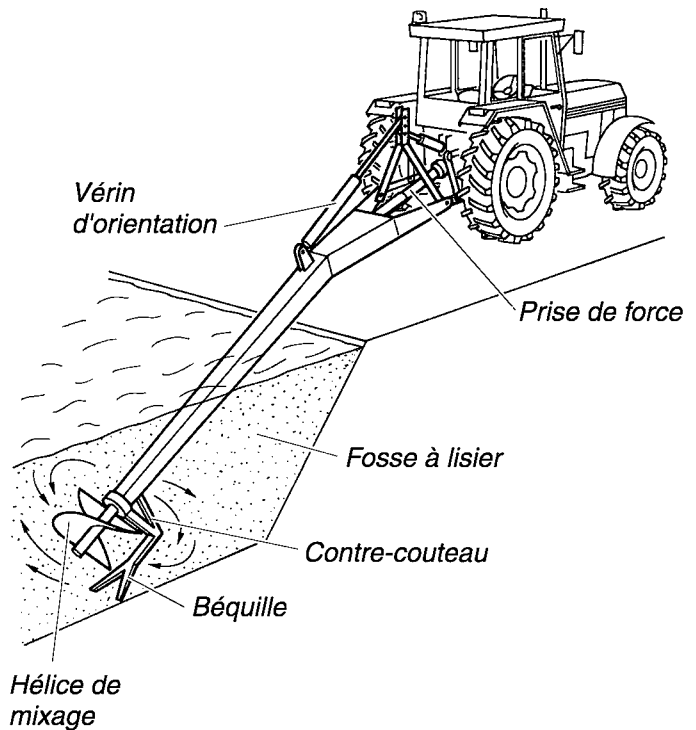


Fig. 130 - Mixeur-broyeur de lisier en fosse

duisent un brassage important, absorbant entre 20 et 40 kW du fait du diamètre important de la vis (de 50 à 75 cm) et de son pas (de 0,7 à 1 mètre).

Selon les cas, les **malaxeurs à vis** peuvent être conçus pour assurer le broyage des éléments grossiers. Dans ce cas, le ou les bords frontaux de la vis portent une lame radiale qui tronçonne les éléments grossiers contre un point fixe jouant le rôle de contre-couteau. Ces broyeurs de lisier nécessitent une puissance de 35 à 50 kW.

• Les pompes à lisier :

L'homogénéisation, le brassage et la reprise des lisiers en fosse peuvent aussi être réalisés par des pompes centrifuges à axe vertical à rotor ouvert, entraînées soit par un moteur électrique (immergé ou non), soit par la prise de force d'un tracteur. Ces pompes sont conçues pour être immergées dans le produit en reposant sur le fond de la fosse. La figure 131 montre le principe d'une pompe à lisier comprenant :

- un **corps** à admission axiale et à refoulement tangential,
- un **rotor** muni d'une **vis de gavage** (vis d'alimentation) et de deux pales en forme de « S » pour le pompage,

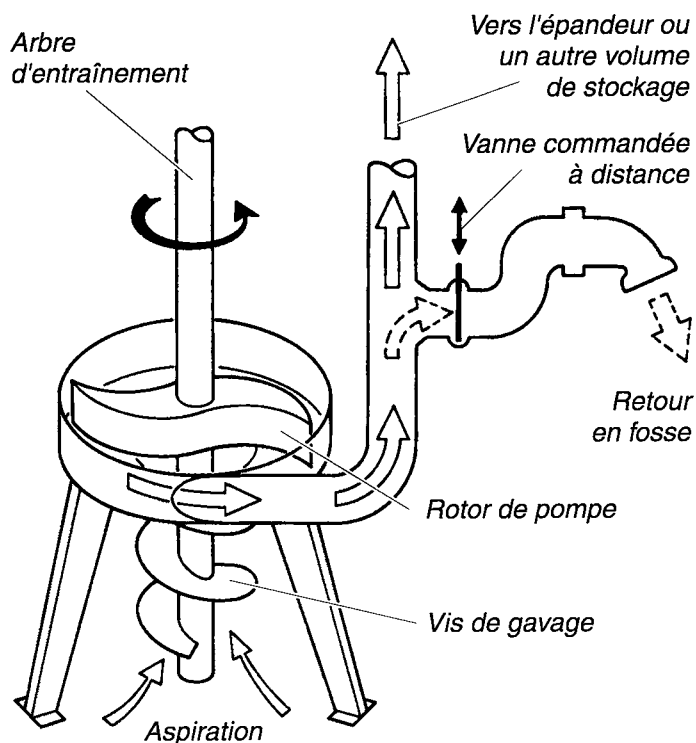


Fig. 131 - Pompe à lisier pour le brassage en fosse et l'extraction

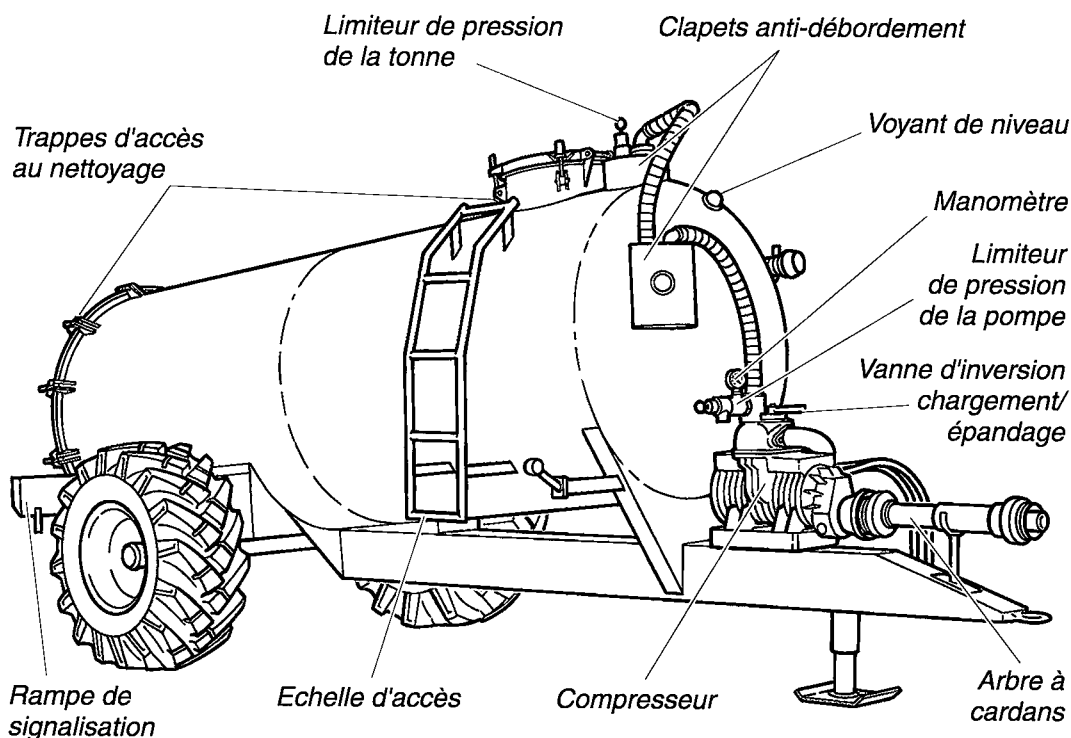


Fig. 132 - Vue générale d'une tonne à lisier

– une **conduite de refoulement à deux directions** : lorsque la vanne est ouverte, le flux de lisier pompé est refoulé dans la fosse pour créer un courant de brassage dans la fosse et homogénéiser son contenu. Lorsque la vanne est fermée, le débit de la pompe est dirigé vers l'extérieur de la fosse soit pour être transvasé, soit pour être chargé dans une tonne.

• LES ÉPANDEURS DE LISIER (fig. 132)

Appelé aussi « tonne à lisier », ce matériel semi-porté est constitué d'un châssis à un, à deux ou à trois essieux, d'une citerne de 3 000 à 24 000 litres, d'un compresseur et de circuits pneumatiques et hydrauliques pour fournir et transmettre l'énergie nécessaire au remplissage et à l'épandage, d'un circuit de remplissage et d'un organe d'épandage (fig. 135) ou de répartition. La puissance de traction est en moyenne de 8 Kw par m³ de capacité de la tonne.

• Le châssis :

Dans le cas le plus simple, le châssis est constitué d'une structure mécano-soudée solidaire de la citerne. Compte tenu de l'accroissement des puissances de traction disponibles et des tonnages (de 4 à 25 tonnes), les épandeurs de lisier de gros tonnage sont de plus en plus

équipés d'un véritable châssis qui permet de supporter des équipements arrière, tels les rampes d'épandage et les enfouisseurs. Selon la nature des sols où sont pratiqués les épandages, les tonnes à lisier peuvent être équipées d'un double essieu à partir de 8 à 10 000 litres ou d'un essieu triple à partir de 16 à 18 000 litres. Comme pour les remorques agricoles, les essieux peuvent être disposés en tandem, en balancier ou en boggie et, dans certains cas, peuvent être autosuiveurs ou directeurs ; leur positionnement longitudinal est étudié pour obtenir un report de charge suffisant vers l'avant, sans toutefois dépasser les dispositions réglementaires de charge verticale sur le point d'attelage ; les dispositifs de freinage sont à commande hydraulique assistée et doivent répondre aux prescriptions du Code de la route (se reporter à la description des systèmes de freinage des épandeurs de fumier), les timons d'attelage peuvent être munis de systèmes d'amortissement et la signalisation doit être assurée de manière efficace comme sur tous les véhicules remorqués.

En ce qui concerne les pneumatiques, la monte de pneus larges à basse pression est souvent pratiquée afin de réduire les risques de tassement des sols et la création d'ornières.

• La citerne :

D'une capacité de 3 à 24 m³, elle est généralement réalisée en acier galvanisé à chaud pour résister à la corrosion. Elle présente une résistance mécanique adaptée aux contraintes de dépression au moment du chargement (de - 0,6 à - 0,8 bar), et de pression pendant l'épandage (de 0,6 à 1,2 bar).

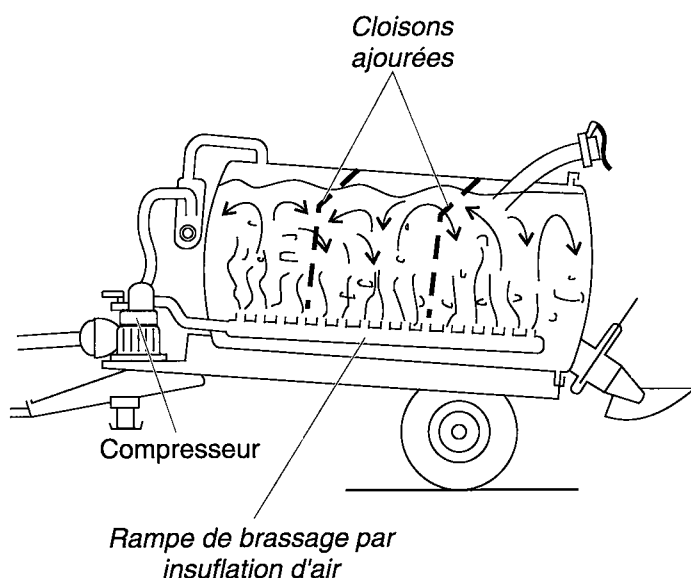


Fig. 133 - Tonne à lisier équipée d'un brassage par insufflation d'air

La partie arrière de la tonne comprend un fond ouvrant ou démontable, fixé par de solides brides et des charnières, afin de permettre le nettoyage et l'élimination des dépôts. Le montage de la citerne est souvent réalisé avec une inclinaison longitudinale de quelques degrés vers l'arrière pour deux raisons :

- limiter l'amplitude des mouvements de liquide dans la tonne et limiter leurs effets sur la conduite de l'ensemble (effets d'inertie),
- favoriser la vidange complète de la citerne et l'évacuation des sédiments.

Pour les lisiers chargés en sédiments ou en matières grossières, certaines tonnes sont équipées de dispositifs d'homogénéisation (fig. 133 et 134) qui maintiennent les matières en sus-

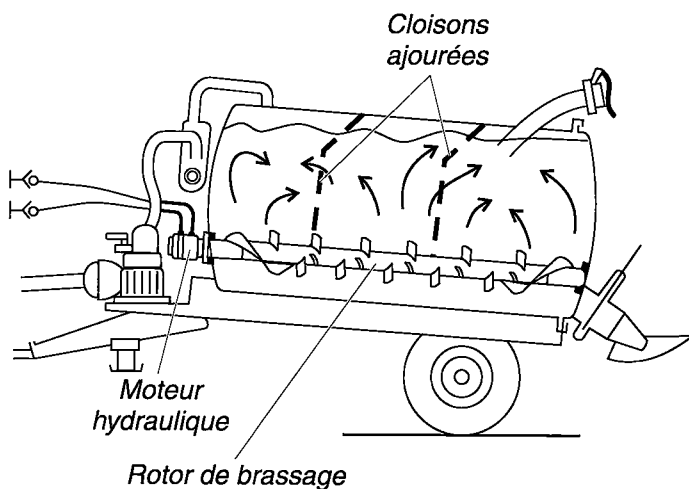


Fig. 134 - Tonne à lisier équipée d'un brassage mécanique par rotors à pales

pension pendant le transport vers le site d'épandage. La figure 133 montre un système d'agitation hydrodynamique réalisé par insufflation d'air dans la partie inférieure de la citerne. La figure 134 présente le principe d'un agitateur mécanique constitué d'un rotor longitudinal à vis entraîné par un moteur hydraulique.

• **Le compresseur et les circuits pneumatiques (fig. 135, 136 et 137) :**

Les tonnes à lisier sont équipées d'un système de chargement pneumatique par dépression. L'énergie pneumatique est fournie par un compresseur rotatif, à lobes (système Roots)

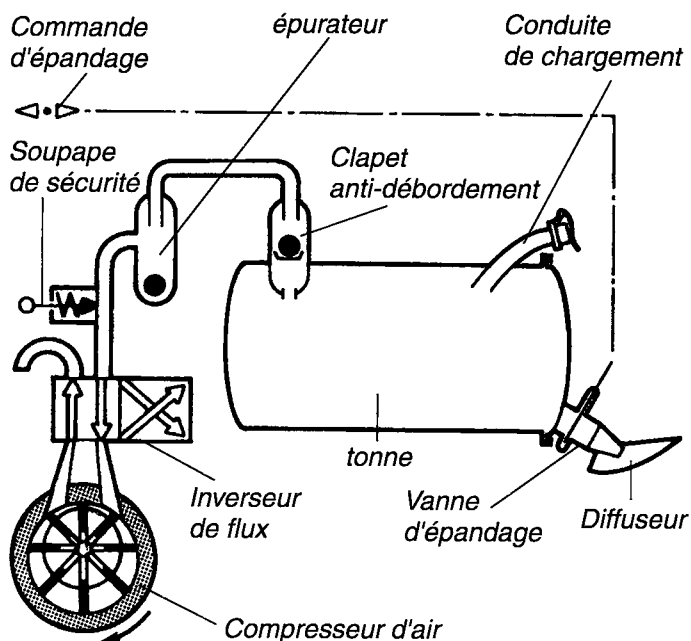


Fig. 135 - Principe de fonctionnement d'une tonne à lisier

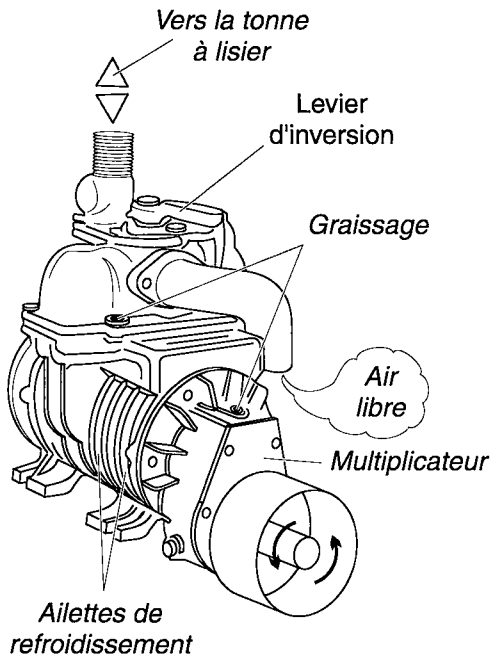


Fig. 136 - Compresseur d'air de tonne à lisier

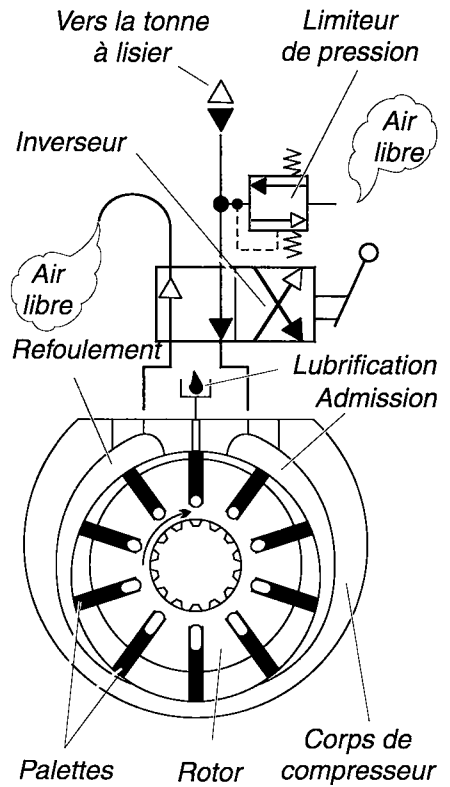


Fig. 137 - Principe d'un compresseur à palettes à inverseur de flux

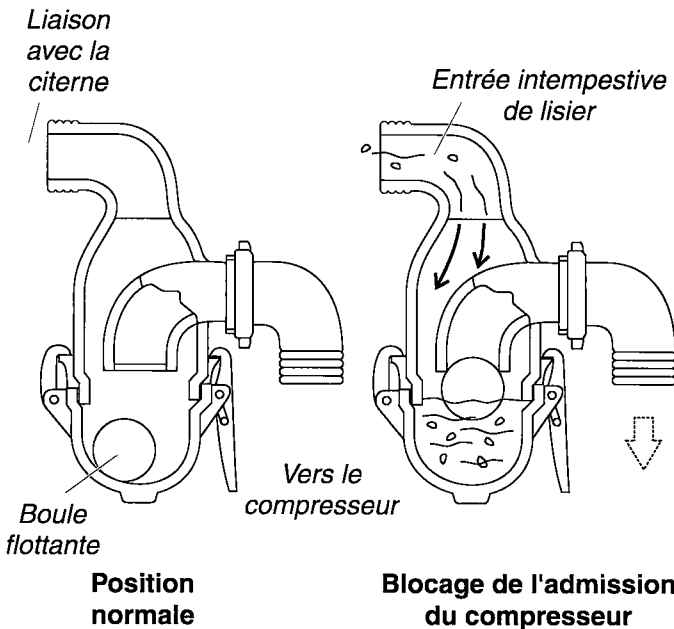


Fig. 138 - Principe d'un clapet anti-débordement à boule flottante

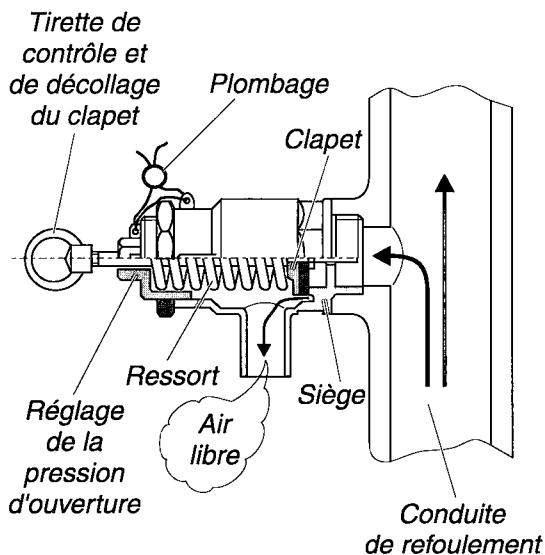


Fig. 139 - Limiteur de pression d'air à simple effet de pression

ou plus fréquemment à palettes, entraîné par la prise de force du tracteur (fig. 136 et 137).

Le débit du compresseur varie de 3 à 15 m³ d'air à la minute selon les constructeurs et le volume des citernes. Un système de vannes d'inversion permet, lors du chargement, de raccorder l'aspiration du compresseur avec l'intérieur de la tonne (fig. 135 et 137). La dépression ainsi produite (de - 0,6 à - 0,8 bar) permet d'aspirer le lisier dans la fosse à l'aide d'un tuyau de remplissage de gros diamètre (de 150 à 200 mm). Le débit de remplissage varie entre 1 200 et 2 200 kg/min, selon la viscosité du lisier, la hauteur d'aspiration et la longueur et le diamètre de la conduite d'aspiration. Une jauge de remplissage (voyants, tube transparent...) permet à l'opérateur de surveiller le niveau de remplissage et d'annuler la dépression au bon moment. En général, le taux de remplissage ne dépasse pas 90 % du volume total de la cuve.

Pour l'épandage, l'opérateur inverse le flux du compresseur qui refoule alors l'air dans la tonne sous une pression de 0,6 à 1,2 bar, afin d'expulser le lisier vers le diffuseur d'épandage.

La sortie du lisier est contrôlée par une vanne commandée à distance depuis le poste de conduite du tracteur.

Un système anti-débordement (fig. 138) à simple ou doubles clapets flottants évite l'aspiration de lisier par le compresseur lors du remplissage. Par ailleurs, un limiteur de pression (fig. 139) et de dépression d'air protège l'installation contre les surpressions et les risques de déformations ou d'éclatement des conduites ou de la citerne.

• Les organes de remplissage :

Afin de réduire le risque d'accidents par chute ou glissade et permettre à l'utilisateur d'effectuer le remplissage de la cuve sans avoir à descendre du tracteur, et donc sans être en contact avec le produit désagréable, les constructeurs proposent soit des **bras de chargement latéraux** pouvant s'accoupler à une **embouchure-relais** fixé au sol, soit des **bras de chargement supérieurs** plongeant directement dans la fosse.

La figure 140 montre un bras de chargement latéral courant, constitué d'une tubulure d'aspiration articulée solidaire de la tonne à lisier qui peut venir s'emboîter dans une embouchure-relais fixe située sur le sol et reliée à la fosse à lisier par une conduite rigide ou souple. Pour

réaliser le chargement, le conducteur approche l'épandeur et déploie le bras de chargement, grâce à une commande hydraulique à distance, pour l'emboîter dans l'embouchure reliée à la fosse. Lorsque le compresseur est actionné, la dépression de la tonne aspire le produit dans la citerne.

La figure 141 montre un **bras de chargement supérieur** conçu à la manière d'une flèche de grue pivotante qui porte un tuyau souple et peut le plonger directement dans la fosse. Au terme du chargement, il convient de prendre le temps nécessaire pour vidanger et égoutter la conduite du bras, avant son repliage.

Selon les cas, les épandeurs de lisier peuvent être entièrement commandés depuis le poste de conduite du tracteur par des commandes électro-hydrauliques : inversion du flux du compresseur, bras de chargement, vanne d'épandage...

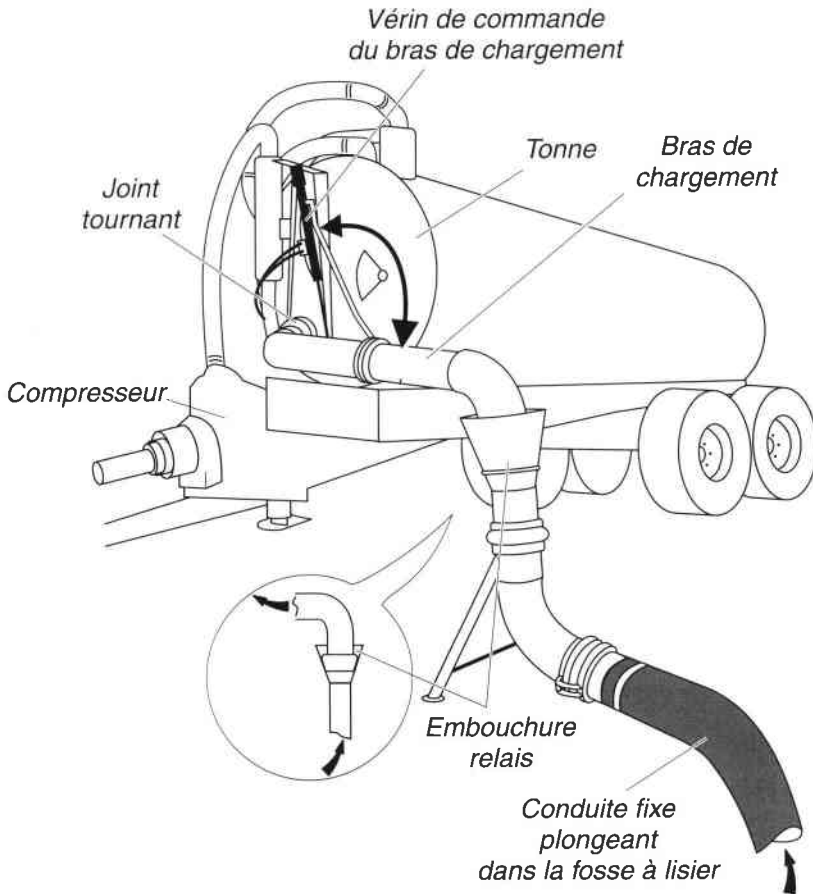


Fig. 140 - Principe de l'aspiration du lisier par bras de chargement latéral et embouchure fixe

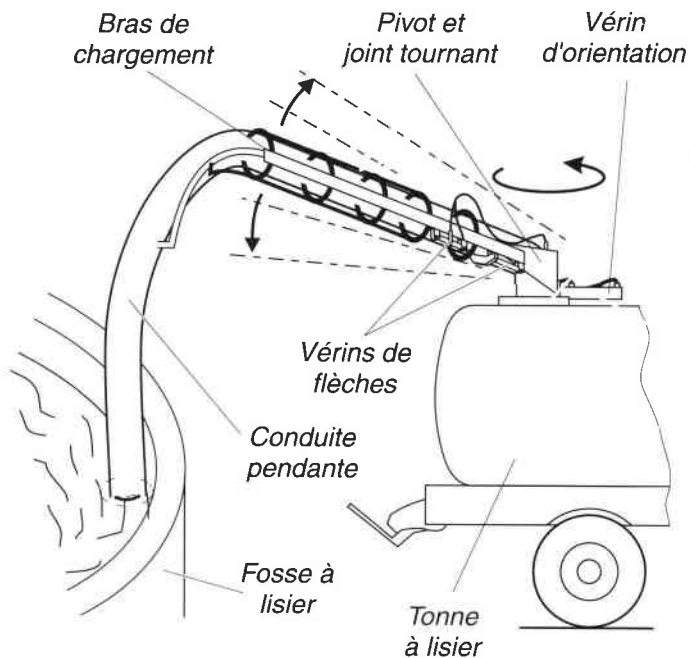


Fig. 141 - Chargement d'une tonne à lisier par bras supérieur pivotant

• **Les organes d'épandage par projection ou aspersion :**

L'épandage du lisier par projection ou aspersion est réalisé en appliquant la pression d'air du compresseur au-dessus du lisier dans la tonne. La projection est assurée par un simple système de diffuseur, appelé système buse-palette (fig. 143), raccordé à la sortie de la vanne d'épandage (fig. 142) et qui projette le produit sur une largeur de 5 à 10 mètres.

Parmi les différentes formes de diffuseurs, on distingue les diffuseurs à nappe relevée (fig. 143) dont la sortie de buse est orientée vers le dessus de la palette à environ 45 cm du sol, et les diffuseurs à nappe rabattue (fig. 143), dont la buse est orientée vers le dessous de la palette située à environ 60 cm du sol.

Dans les deux cas, l'inclinaison de l'écran, en forme de palette, peut être fixe ou réglable. La figure 143 montre un diffuseur à nappe relevée muni d'une vanne de réglage du débit.

Afin d'obtenir différentes valeurs de débit, la buse est interchangeable et son diamètre varie de 45 à 90 mm. Le calibre de la buse a une conséquence directe sur le débit ; malgré cette évidence, il faut remarquer que le débit nominal des buses, pour une pression donnée, est rarement connu des utilisateurs. Dans



Fig. 142 - **Vanne d'épandage à commande hydraulique** (photo Cemagref)

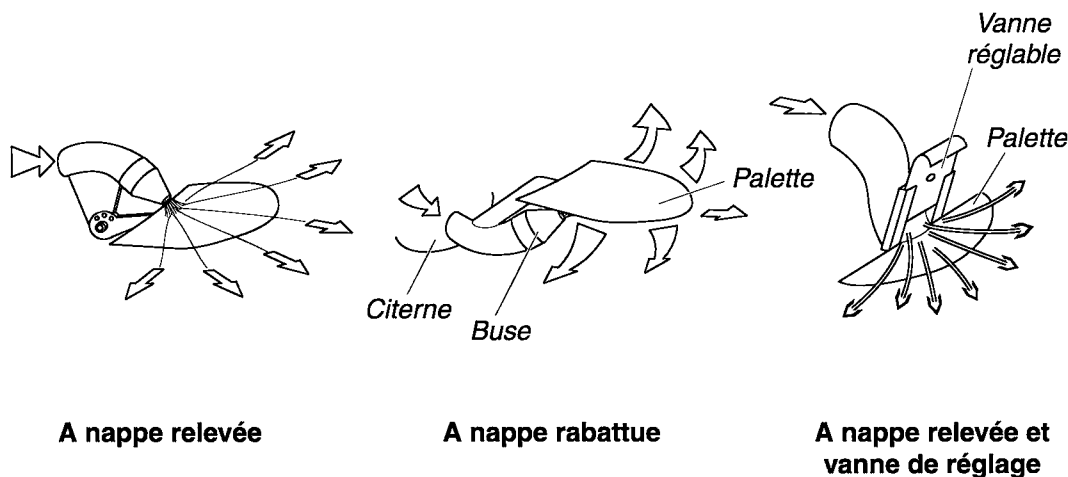


Fig. 143 - Trois types de diffuseurs d'épandage

ce domaine, même si la normalisation n'est pas facile en raison de la diversité des produits à épandre, il serait souhaitable que les notices d'instructions donnent des indications de débit nominal pour les différents calibres de buses proposés.

Certains constructeurs proposent des buses souples en matière plastique ou en caoutchouc qui présentent l'avantage de limiter les risques d'obstruction en se déformant pour laisser passer des éléments non délités.

L'épandage des lisiers en plain par projection-aspersion est fréquemment utilisé depuis que l'épandage des lisiers existe. Cette technique simple présente néanmoins trois inconvénients importants : la répartition transversale et la largeur d'épandage sont peu précises, la projection du lisier favorise un dégagement important d'odeurs fort désagréables et la volatilisation de l'ammoniac (NH_3) est importante.

La répartition transversale peut être améliorée par l'utilisation de rampes d'épandage ou d'équipements d'enfouissement. Les enfouisseurs présentent en outre l'intérêt de réduire très sensiblement les dégagements de mauvaises odeurs.

• LES RAMPES D'ÉPANDAGE DE LISIER

L'épandage des lisiers par l'intermédiaire de rampes montées à l'arrière des tonnes à lisier et repliables sur les côtés pour le transport est une technique qui permet une répartition transversale plus précise que les systèmes d'aspersion par buse-palette unique. De plus, en réduisant le temps et la longueur de trajectoire du lisier dans l'air, l'épandage par rampe limite les dégagements de mauvaises odeurs pendant l'application. Toutefois, en raison des phénomènes d'écoulement et des risques de colmatage, l'épandage par rampe peut présenter des incertitudes quant à la bonne répartition du débit dans les différentes branches et dans la

détection des obstructions partielles au travail. La fiabilité de ce mode d'épandage nécessite un lisier non pailleux, voire même tamisé.

Les rampes se distinguent par le mode de distribution et le mode de diffusion du lisier.

• **Les différents modes de distribution des rampes d'épandage :**

Les trois principaux modes de distribution sont : les rampes à distribution centrale statique, les rampes à distribution centrale rotative et les rampes à distribution en ligne.

– **les rampes à distribution centrale statique** (fig. 144) comprennent un collecteur de lisier (appelé boîte de répartition) alimenté par une conduite primaire centrale connectée à la vanne de sortie de la citerne. La forme interne du collecteur est étudiée pour limiter les risques de colmatage et répartir le produit dans les conduites secondaires alimentant les segments de la rampe.

– **les rampes à distribution centrale rotative** (fig. 145) comprennent un distributeur cylindrique (fig. 146) alimenté par une conduite primaire axiale provenant de la vanne de sortie de la citerne. Les sorties secondaires du distributeur sont axiales ou périphériques, tandis qu'un rotor, tournant à l'intérieur du distributeur, répartit le produit vers les conduites secondaires (écluse rotative). Selon les réalisations, le rotor hache et expulse les débris retenus au niveau des orifices de distribution. Le rotor est animé par un moteur hydraulique.

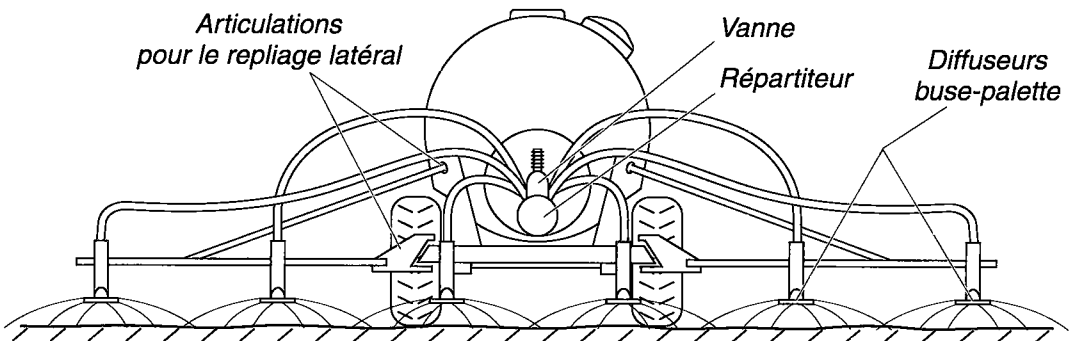


Fig. 144 - **Rampe d'épandage à distribution centrale et diffuseurs du type buses-palettes**

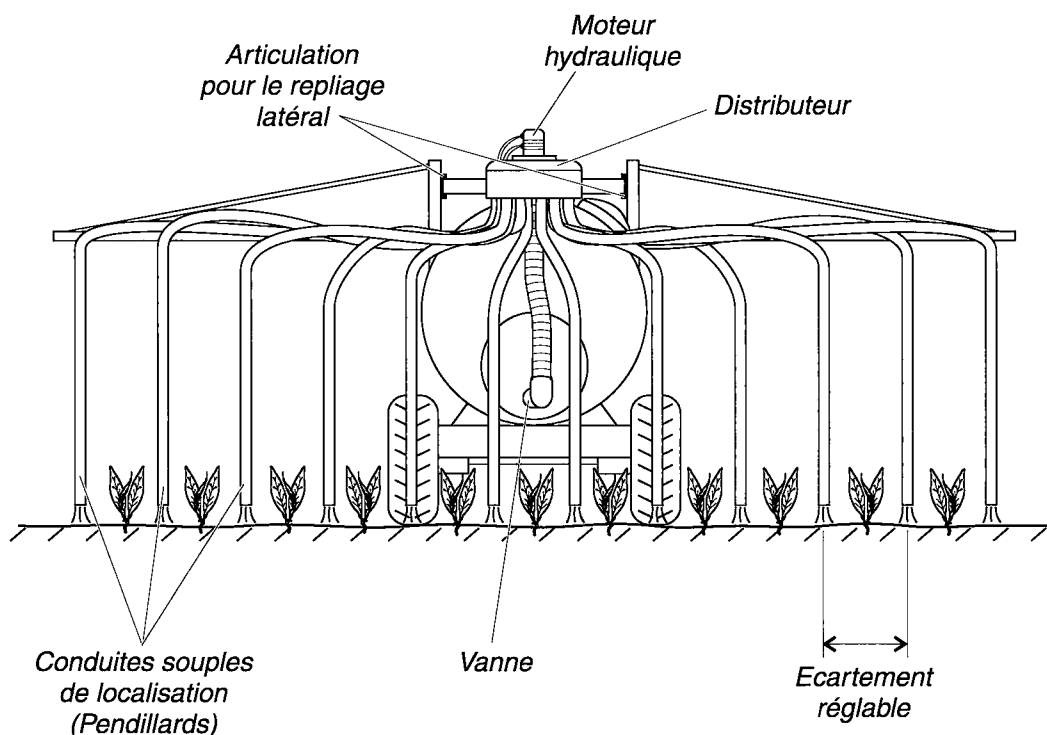


Fig. 145 - **Rampe d'épandage à distribution centrale animée et conduites pendantes de localisation (pendillards)**

– **les rampes à distribution en ligne** (fig. 147) sont constituées d'un tube transversal faisant toute la largeur de la rampe. Ce tube, alimenté par deux ou quatre conduites primaires connectées à la sortie de la cuve, possède autant de voies secondaires que de diffuseurs à alimenter. Selon les cas, les diffuseurs peuvent être des conduites souples (pendillards), des conduites de localisation en « y » renversé (épandage localisé entre rangs de maïs par exemple) ou des diffuseurs buses-palettes (épandage sur prairie par exemple).

• **Les différents modes de diffusion du lisier avec les rampes d'épandage :**

Les trois principaux systèmes de diffusion du lisier sont les diffuseurs buses-palettes, les conduites souples appelées pendillards et les rampes à nappe verticale :

– **les diffuseurs buses-palettes** (fig. 148) utilisés sur des rampes d'épandage fonctionnent selon le même principe que les buses-palettes décrites précédemment.

– **les rampes à pendillards** (fig. 145) sont des rampes munies de simples conduites souples dont l'extrémité aval est à quelques centimètres du sol ou traînées pendant l'épandage. Leur

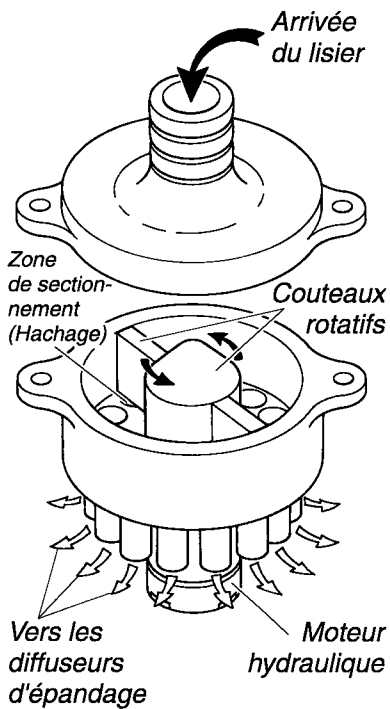


Fig. 146 - Principe d'un distributeur-broyeur de lisier animé par un moteur hydraulique

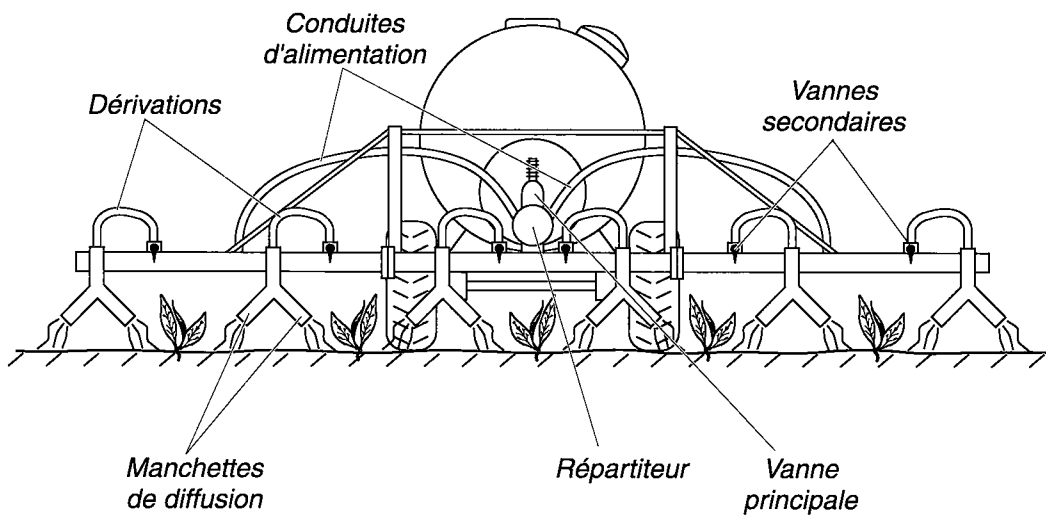


Fig. 147 - Rampe d'épandage de lisier à distribution en ligne

l'espacement est réglé selon l'espace interligne de la culture à fertiliser.

– **les rampes à nappe verticale** (fig. 149) sont peu utilisées. Elles sont constituées d'un déflecteur vertical ou incliné, lisse, et recevant les jets de plusieurs buses horizontales ou obliques placées à intervalles réguliers. La paroi lisse du déflecteur étale les jets de lisier et répartit les écoulements sous la forme d'un mince rideau liquide vertical et continu. La figure 149 montre une rampe à nappe verticale Jeulin qui dispose d'une jupe souple pour accompagner le produit jusqu'à la surface du sol.



Fig. 148 - **Buse-palette d'une rampe d'épandage de lisier** (photo Cemagref)

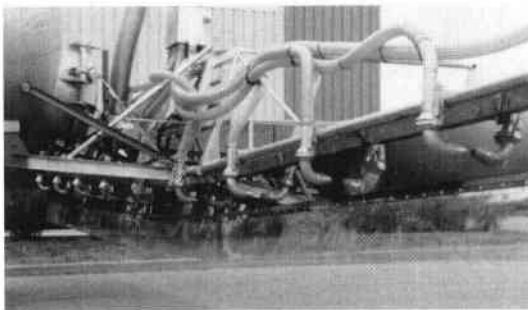


Fig. 149 - **Rampe d'épandage à nappe verticale** (photo Jeulin)

• LES ENFOUSSEURS DE LISIER

Les enfouisseurs de lisier permettent d'incorporer le produit fertilisant dans le sol. Bien que leurs différents principes soient assez simples, ces matériels présentent un coût relativement élevé, comparé à des outils de travail du sol de largeur équivalente, parce qu'ils possèdent en plus un mécanisme de relevage des organes d'enfouissement et un système de distribution du lisier vers les points d'injection. En plus des efforts de traction nécessaires à la tonne à lisier, leur utilisation nécessite une puissance de traction supplémentaire d'environ 22 à 30 kW (environ 10 chevaux par mètre de largeur) selon les équipements et la nature du sol. L'attelage de l'enfouisseur à l'arrière de la tonne à lisier (fig. 150) est la pratique la plus courante. Certains chantiers utilisent des enfouisseurs séparés pouvant être tractés par un second tracteur. Dans ce cas, l'ensemble tracteur + enfouisseur avance en parallèle avec l'ensemble tracteur + tonne à lisier en étant reliés par une conduite de liaison flexible.

Sur le plan agronomique, l'emploi des enfouisseurs de lisier doit faire l'objet de précautions particulières pour prévenir les ruissellements pouvant résulter des phénomènes de **lissage**, particulièrement lorsque l'enfouissement s'effectue dans le sens de la pente. Ces phénomènes bien connus en travail du sol sont dus à l'action de certaines pièces travaillantes en conditions de sol semi-plastique. Les socs, dents et autres organes tendent, dans ces conditions, à lisser verticalement et (ou) horizontalement le sol en créant de véritables parois compactes et étanches très défavorables aux déplacements de l'eau dans le sol. Dans le cas de l'enfouissement de lisier, ce phénomène risque de faciliter des ruissellements indésirables de lisier dans les sillons d'enfouissement, vers les points bas des parcelles et donc les ruisseaux, et de créer des hétérogénéités de répartition dans le sol (surdosage des lignes de dépôts et sous-dosage, voire absence de matière fertilisante entre les lignes d'enfouissement). **D'une manière générale, la prévention du ruissellement nécessite une limitation des doses, et donc des débits par points d'injection, en rapport avec le pouvoir absorbant du sol.**



Fig. 150 - **Enfouisseur de lisier attelé à l'arrière d'une tonne à lisier**
(photo Cemagref)

Les enfouisseurs de lisier peuvent être classés en trois catégories : **les enfouisseurs spécialisés pour l'épandage sur prairies, les enfouisseurs pour les sols travaillés et les enfouisseurs polyvalents.**

• Les enfouisseurs spécialisés pour l'épandage sur prairies :

Étant donné la faible porosité superficielle des sols de prairies par rapport aux sols cultivés et l'absence de façons culturales pendant les cycles de végétation, les enfouisseurs de lisier sur

prairies possèdent un écartement rapproché de leurs éléments pour obtenir la meilleure diffusion transversale possible du lisier. Par ailleurs, les techniques d'injection utilisées ne doivent pas affecter la surface du sol.

Ces enfouisseurs disposent en moyenne de 10 à 24 éléments (fig. 151) espacés de 20 à 25 cm environ (de 2,5 à 6,5 mètres de largeur d'épandage) qui déposent le produit à une faible profondeur (de 4 à 10 cm). Dans le cas le plus fréquent, le lisier est introduit au niveau de chaque élément par un soc injecteur étroit placé dans le sillage d'un disque plat tranchant qui fend verticalement le sol. Les éléments sont reliés à leur châssis transversal par l'intermédiaire de supports pendulaires indépendants munis d'un ressort amortisseur et d'une roue arrière qui joue les rôles de roue de jauge et de roue plumbeuse pour appuyer et refermer le plus possible l'ouverture du sillon.

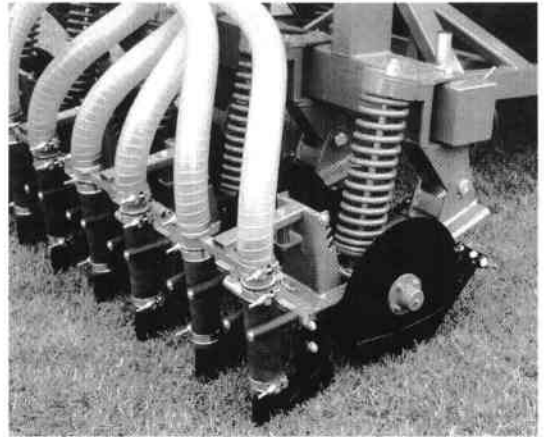


Fig. 151 - **Enfouisseur de lisier sur prairie** (photo Cemagref)

• **Les enfouisseurs pour les sols travaillés :**

L'enfouissement du lisier dans les sols travaillés est réalisé à une profondeur de 10 à 20 cm avec des éléments (disques, dents...) relativement espacés (de 50 à 70 cm). La régularité de diffusion transversale du produit dépendant de la porosité du sol, l'espacement des éléments doit être adapté aux conditions de travail (texture et porosité du sol, humidité...). La constitution des appareils varie surtout en fonction de l'encombrement du sol avant l'épandage (débris végétaux) et de l'état souhaité du sol après l'épandage (nivellement plus ou moins bon). Parmi les nombreuses configurations proposées par les constructeurs, citons : **les enfouisseurs à dents** (fig. 152) accompagnés ou non d'un outil d'ameublissement roulant, **les enfouisseurs à disque et à couteau uniques** (fig. 153) munis ou non de disque de fermeture ou de roues plumbeuses, **les enfouisseurs à deux disques** et **les enfouisseurs polyvalents**.

– **les enfouisseurs à deux disques** utilisent des disques concaves de diamètre relativement important pour limiter les risques de bourrages devant les débris végétaux. La figure 154 montre le principe d'un enfouisseur Sodimac : le bâti transversal de l'enfouisseur est attelé de manière pivotante à l'arrière du châssis de l'épandeur de lisier afin de permettre le relevage hydraulique des éléments par des vérins. Chaque élément d'enfouissement comprend :

- un étançon double monté sur une suspension à ressort hélicoïdal,
- un disque d'ouverture du sillon accompagné d'un tube injecteur de lisier,
- un disque de fermeture du sillon.

Les disques crénelés de forme concave sont placés en opposition avec un angle d'entrure et de coupe. Ces disques agissent comme deux petites charrues parallèles à disques, la pre-

Fig. 152 - Enfouisseur de lisier, pour sol travaillé, à soc-injecteur et outil roulant

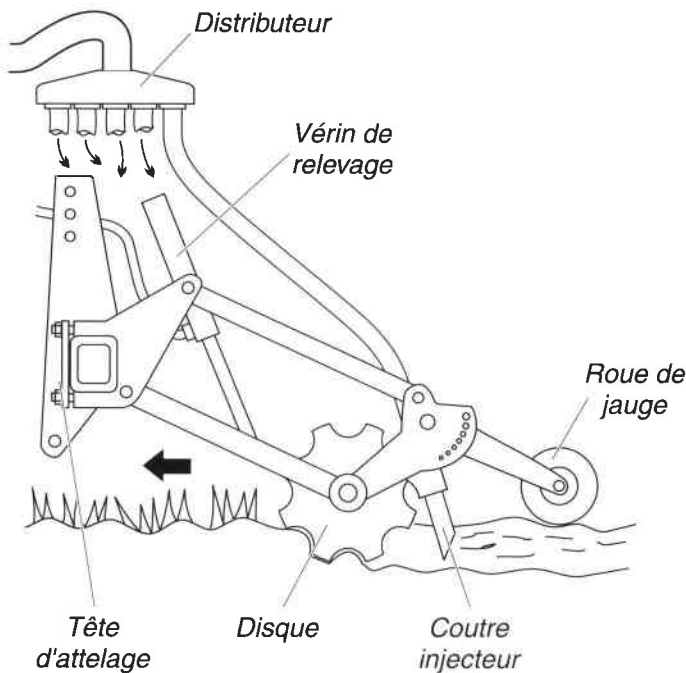
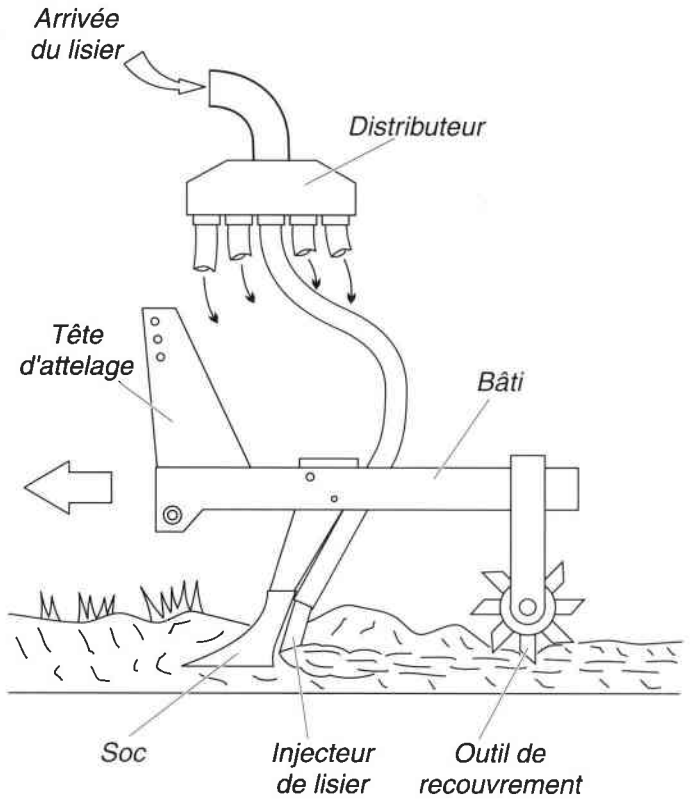


Fig. 153 - Élément d'enfouisseur de lisier polyvalent à disque et coudre injecteur

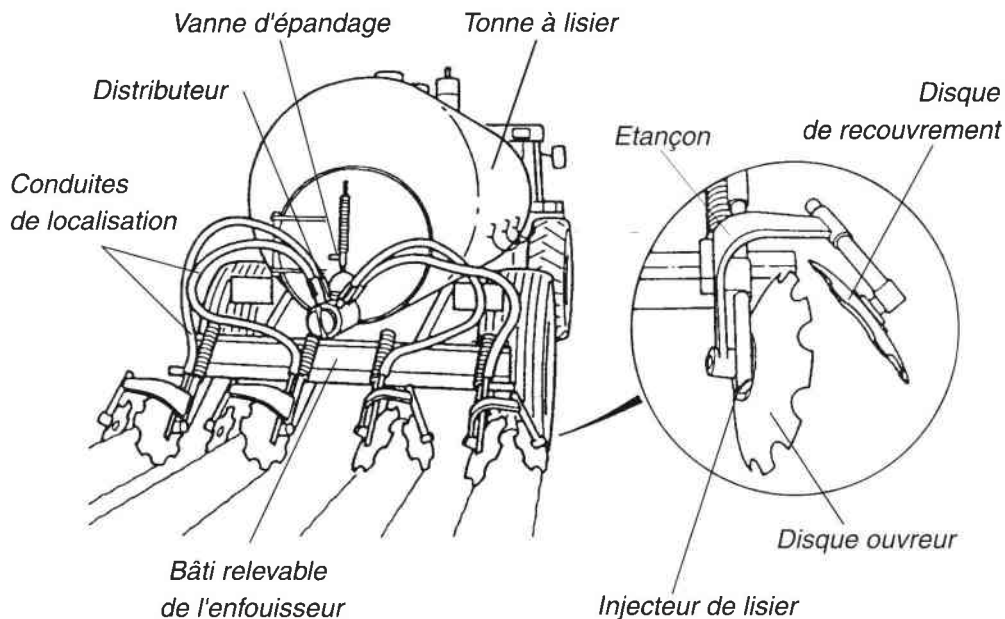


Fig. 154 - **Enfouisseur de lisier à doubles disques** (d'après document Sodimac)

mière ouvrant un sillon, où le lisier est déposé, et la seconde le referme en reprenant la terre rejetée par la première. On obtient ainsi un recouvrement du lisier et un volume de terre travaillé favorable à la diffusion rapide du produit dans le sol. La forme et le mode d'action des disques permettent des enfouissements sur des chaumes de céréales ou des sols encombrés après céréales ou maïs-grain par exemple.

• **Les enfouisseurs polyvalents :**

Ces systèmes d'enfouissement appelés aussi « **enfouisseurs tous terrains** » permettent l'application du lisier sur des chaumes, des sols travaillés et, le cas échéant, sur prairie. Il s'agit essentiellement (fig. 155) d'enfouisseurs à disques verticaux (plats ou bombés, lisses ou crénelés) et de socs injecteurs espacés de 40 à 70 cm, dont la largeur d'épandage peut atteindre 4 mètres (8 éléments) pour une profondeur d'enfouissement de 10 à 20 cm. Le caractère polyvalent de ces enfouisseurs ne dispense pas les utilisateurs de veiller à la bonne adéquation de ces matériels avec la nature particulière du



Fig. 155 - **Enfouisseur de lisier polyvalent au travail** (photo Cemagref)

sol d'épandage, et surtout lorsqu'il s'agit de prairie en pente ou de sols à faible porosité structurale ou de consistance semi-plastique.

• LA MAÎTRISE DE LA DOSE DE LISIER À ÉPANDRE

Comme pour tous les épandages, l'objectif principal est de respecter une **dose** et d'assurer une **répartition** d'épandage sur le sol la plus précise possible.

– **pour définir la dose**, la vraie difficulté est de connaître les caractéristiques et teneurs du lisier à épandre (se reporter au paragraphe « *la caractérisation des lisiers* »). Lorsque les teneurs fertilisantes du produit sont connues, la seule méthode consiste à prendre en compte des informations tirées du bilan de fertilisation (de la parcelle) et des références locales liées à telle ou telle culture (expérience de l'agriculteur et références fournies par les structures de conseil).

– **pour appliquer la dose**, il convient de mettre en cohérence les paramètres de l'épandage et d'assurer une répartition la plus précise possible. Rappelons que les paramètres d'épandage sont liés par la relation :

$$D = \frac{Q \times D \times L \times V}{600}$$

Q = dose à appliquer en m³/ha
D = débit de l'épandeur en m³/min
L = largeur de travail en mètres
V = vitesse d'avancement en km/h

Sur le terrain, l'application de cette relation est loin d'être facile à respecter, car **le débit et la largeur de travail** des épandeurs de lisier sont deux grandeurs difficiles à maîtriser avec précision.

• Le réglage du débit :

Le débit d'épandage d'une tonne à lisier dépend de la nature du produit (densité, viscosité...), de la pression d'air maintenue dans la citerne et de la perte de charge du dispositif d'épandage. Rappelons que le terme « **perte de charge** » est une expression utilisée en mécanique des fluides pour qualifier la résistance à l'écoulement des liquides dans des conduites sous l'effet des frottements, de la viscosité, du régime d'écoulement et des accidents de parcours divers (raccords, coudes...). Étant donné la diversité des produits et la difficulté de déterminer leurs caractéristiques physiques, il n'existe que des solutions empiriques pour connaître et régler le débit d'un épandeur de lisier. La solution la plus simple consiste à mesurer le temps passé pour épandre un volume donné de lisier sur une parcelle de surface donnée pour en déduire le débit en m³/min et la dose en m³/ha.

L'essai de débit en épandant sur une parcelle peut être réalisé avec tous les types d'équipements, pourvu que le lisier soit bien homogénéisé. Il consiste à effectuer l'épandage sur une **surface d'essai**, à la **vitesse de travail** la mieux adaptée aux conditions de déplacement sur les sols à fertiliser (de 3 à 6 km/h par exemple) et en chronométrant le **temps d'essai**.

Prenons un exemple :

- la **différence de volume** avant et après épandage est de $3,6 \text{ m}^3$,
- la **largeur d'épandage** est de 12 mètres,
- la **distance d'essai** est de 100 mètres (0,1 km),
- le **temps de parcours** de la distance d'essai est de 90 secondes,
- la **vitesse (V)** est égale à $0,1 / 90 \times 3600 = 4 \text{ km/h}$,
- le **débit** est égal à $3,6 \text{ m}^3 / 90 \times 60 = 2,4 \text{ m}^3/\text{min}$,
- la **dose** est égale à $(2,4 \times 600) / (12 \text{ m} \times 4 \text{ km/h}) = 30 \text{ m}^3/\text{ha}$.

Pour ajuster le débit, procéder comme dans le cas précédent en agissant sur la pression de la cuve, le diamètre de la buse ou, si le système le permet, sur l'ouverture de la vanne d'épandage. Il convient de retenir que la valeur du débit mesurée ne correspond qu'au type de lisier utilisé (taux de matière sèche, viscosité...).

Le calcul de la dose/ha nécessite l'analyse de la teneur en éléments fertilisants. Cette analyse peut être confiée à un laboratoire spécialisé à partir d'échantillons recueillis selon une procédure définie. Pour la teneur en azote ammoniacal, l'utilisateur peut disposer d'analyseurs portatifs (système Quantofix par exemple). Des systèmes d'analyse de la matière sèche peuvent également être utilisés.

Certains constructeurs proposent des systèmes d'aide à l'épandage plus ou moins sophistiqués permettant le calcul de la dose/ha et/ou la régulation de débit (DPA).

• Les dispositifs DPA (débit proportionnel à la vitesse d'avancement) :

A partir d'un débit de référence calculé en fonction de la dose/ha souhaitée, de la largeur d'épandage et de la vitesse d'avancement, le rôle des systèmes DPA est de maintenir constante la dose malgré les variations de la vitesse d'avancement en agissant automatiquement sur la position d'ouverture de la vanne d'épandage. Plus la vitesse d'avancement tend à diminuer (patinage ou baisse du régime moteur ou changement de rapport de vitesse), plus la vanne se ferme pour réduire le débit en conséquence. Selon les cas, la régulation peut se réaliser en boucle ouverte, sans mesure du débit, ou en boucle fermée, grâce à la mesure en continu du débit. La figure 156 montre un équipement DPA comprenant :

- une **vanne motorisée** commandée par un servomoteur ou un vérin électrique,
- un **débitmètre** à ultrasons,
- un **capteur de vitesse d'avancement** (capteur de vitesse de roue ou radar),
- un **capteur de pression**,
- une **unité de traitement** des informations,
- une **console d'indication et de commande**.

A partir des paramètres d'épandage souhaités (largeur, dose/ha, vitesse d'avancement...), l'opérateur entre les **valeurs de consigne** avec le clavier de la console. En cours d'épandage, le débit est en permanence régulé par la vanne motorisée et l'unité de traitement électronique, à partir des informations fournies par les capteurs et le débitmètre. Le conducteur dispose d'une fonction de correction qui permet de faire varier la dose en cours de travail et de sélectionner un ou plusieurs tronçons de rampe. La console possède un module de calcul et

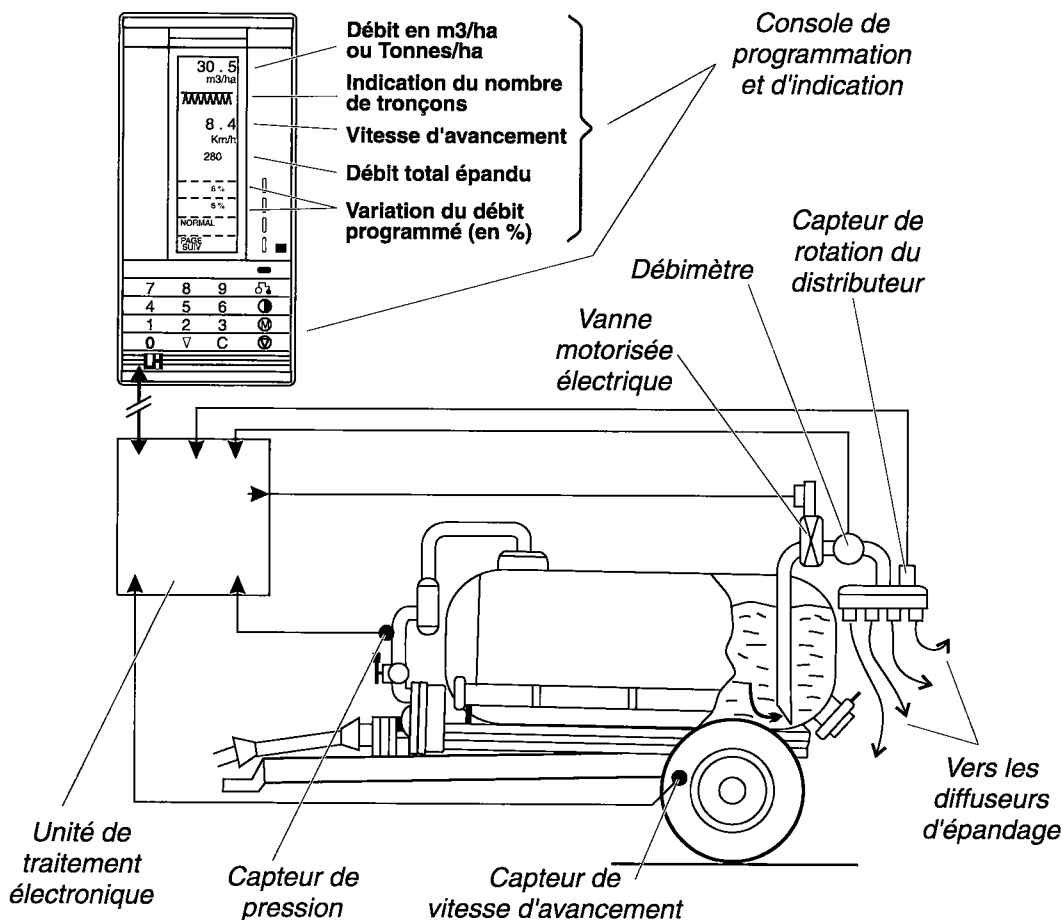


Fig. 156 - Principe d'un système d'épandage de lisier à débit proportionnel à la vitesse d'avancement (DPA) (d'après document LH Agro)

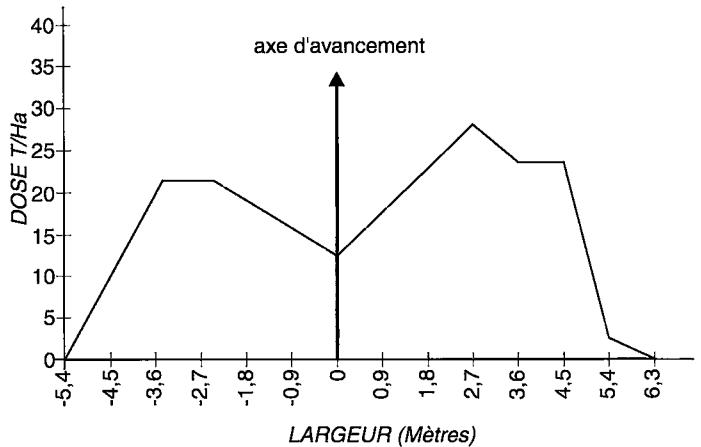
d'affichage qui indique les données du chantier : volume total épandu, régime de prise de force, heure, volume restant en cuve, surface traitée, surface restante... En cas d'anomalie, une alarme sonore prévient l'opérateur et l'écran de la console indique les causes probables de panne.

Bien entendu, ces systèmes nouveaux représentent un investissement important qui ne peut être valablement valorisé qu'à la condition qu'ils soient fiables et durables, que l'on dispose de références sur leur efficacité, qu'il existe des moyens efficaces de caractérisation des produits et que l'on dispose de surfaces d'épandages suffisantes.

• **La largeur d'épandage et la répartition transversale :**

Pour les épandeurs disposant de rampes d'épandage ou d'enfouisseurs, la largeur d'épandage est définie par la position des diffuseurs (buses-palettes, tubes ou injecteurs) et la répartition transversale peut être assez bien assurée si l'espacement des éléments de diffusion est bien réglé et si toutes les précautions sont prises pour éviter les dissymétries de distribution et les colmatages de conduites :

- lisiers correctement homogénéisés et broyés,
- taux de matière sèche pas trop élevé,
- surveillance de l'état des conduites.



Source FNCUMA

Fig. 157 - **Diagramme de répartition transversale d'une tonne à lisier à diffuseur unique du type à buse-palette**

Des contrôles réalisés sous l'égide de la FNCUMA et du BCMA en 1994 et en 1995 (Mayenne et Côtes-d'Armor) montrent que la **régularité d'épandage** des rampes est sensible à la nature des lisiers (nécessité de broyer les lisiers issus de stabulations sur litières de pailles par exemple), à la pente des terrains et aux déséquilibres de pression et de débit dans les conduites d'épandage. La figure **157** montre un exemple de **courbe de répartition transversale** issue de cette étude et concernant une **rampe à diffuseurs buses-palettes** avec du lisier de bovins sous une pression 0,6 bar en cuve et conçue pour une largeur d'épandage de 12 mètres. On observe une dissymétrie due au dévers du terrain (2% de pente dans ce cas) et une réduction du débit dans les conduites des extrémités de la rampe due aux pertes de charges plus élevées (conduites de longueur plus grande). Pour les constructeurs, les difficultés résident dans la conception du réseau de conduites d'épandage dont les éléments doivent être les plus symétriques possibles et dans le choix du diamètre qui relève d'un compromis entre un diamètre plus petit qui réduit le volume mort et un diamètre plus grand moins sensible au bouchage, mais qui entraîne une vitesse d'écoulement plus lente, favorable aux dépôts.

Pour les épandages par projection ou aspersion par des diffuseurs du type **buses-palettes**, la répartition transversale est nettement plus aléatoire, d'une part à cause du régime d'écoulement dynamique et de dispersion du produit extrêmement variables selon la nature des produits, et d'autre part en raison de la difficulté de maintenir avec précision la position de la palette et le centrage du jet pendant la durée de vie de l'épandeur (l'ensemble buse-palette est situé dans une zone exposée aux chocs).

Dans tous les cas, le seul moyen d'évaluer la qualité de la **répartition transversale** est de réaliser des **essais d'épandage** au-dessus de lignes de **bacs de réception**, selon le même principe que pour les essais d'épandeurs d'engrais minéraux solides. Le contenu des bacs est mesuré afin de tracer la **courbe de répartition**. Cette opération de mesure de la répartition transversale permet aussi de définir la **largeur optimale d'épandage** (et donc la distance entre passages) en recherchant le **recouvrement** le plus judicieux. Les intéressés le savent, ces opérations sont beaucoup plus agréables à écrire qu'à réaliser ! non seulement il faut supporter les odeurs, mais il faut manipuler le produit, avec toutefois une satisfaction : c'est à ce prix que les matériels évolueront (validation des systèmes hydraulique les plus fiables et précis) et que les éleveurs parviendront à valoriser ces matières fertilisantes tout en respectant l'environnement et les dispositions réglementaires.

Rappelons que les épandages de lisier doivent être réalisés dans le respect des dispositions réglementaires (directives communautaires, lois, décrets et arrêtés nationaux, règlement sanitaire départemental, arrêtés préfectoraux et municipaux...) relatives à la protection de l'environnement et à la qualité des eaux : distance des lieux d'habitation et des points d'eau, périodes et conditions pédo-climatiques d'épandage... Il est en particulier interdit d'épandre sur terrain nu, sur sol gelé, sur une parcelle à forte pente ou lorsqu'il y a un risque de ruissellement.

Quelques définitions	195
– Produits de traitement	195
– Pulvérisation	196
– Pulvérisateurs	200
La protection des cultures, une nécessité	204
La maîtrise des traitements	205
Les différents traitements phytosanitaires	206
– Les traitements fongicides	206
– Les traitements insecticides	207
– Les traitements herbicides	207
– L'application des engrais liquides	208
Les produits de traitement des cultures	209
– Composition d'un produit phytosanitaire	209
– Les différentes formes de produits phytosanitaires	209

QUELQUES DÉFINITIONS

Les définitions présentées ci-après ont été introduites dans le seul but de faciliter la lecture de cet ouvrage. Les définitions relatives aux produits et traitements phytosanitaires sont disponibles dans divers documents de référence : normes AFNOR NF U 43-000, directive 91/414/CEE, travaux de la Commission des essais biologiques (CEB), index phytosanitaire de l'ACTA....

• PRODUITS DE TRAITEMENT

• **Substance active :**

Substance ou micro-organismes, y compris les virus exerçant une action générale ou spécifique sur les végétaux, partie de végétaux ou produits végétaux.

En général, les substances actives (appelées aussi matières actives) ne sont pas distribuées dans leur état initial, mais sous la forme de **préparations** présentant les garanties requises de sécurité pour les utilisateurs, les cultures et l'environnement.

• **Formulant :**

Toute substance ajoutée à la matière active (ou aux matières actives) pour obtenir le produit formulé.

• **Adjuvant :**

Substance utilisée en mélange extemporané avec un produit formulé, au cours de la préparation de la bouillie, pour en modifier certaines qualités physiques, chimiques ou biologiques.

• **Préparation :**

Produit formulé de composition définie, autorisée à la vente sous un non de marque.

• **Bouillie :**

Préparation, généralement dans l'eau, pour pulvérisation, contenant le(s) produit(s) formulé(s) et éventuellement des adjuvants.

• **Dose :**

Le terme dose indique la quantité de produit formulé à appliquer. L'étiquetage de chaque produit indique la dose homologuée par hectare et la concentration à réaliser selon les objectifs de traitement. Selon les cas, la dose est exprimée par exemple en grammes par hectare (g/ha), en millilitres par hectare (mL/ha) ou en litres par hectare (L/ha).

• PULVÉRISATION

• Antigoutte :

Organe situé en amont immédiat de chaque buse, l'antigoutte est généralement constitué d'une soupape ou d'une membrane soumise à l'action d'un ressort taré à faible pression, ou pilotée par de l'air comprimé. Le rôle de l'antigoutte est de favoriser une ouverture et une fermeture franches des jets de pulvérisation et d'empêcher les écoulements, par les buses, du liquide contenu dans les conduites d'alimentation en dehors des séquences de pulvérisation.

• Buses :

Organes permettant de fragmenter un liquide ou une bouillie en gouttelettes. Suivant le principe de fragmentation utilisé, elles se classent en buses hydrauliques, centrifuges, pneumatiques, électrostatiques...

• Buse à pression de liquide :

Pièce ou ensemble de pièces, dont le rôle est de réaliser la fragmentation de la bouillie sous l'effet d'une pression de liquide au travers d'un orifice calibré (buse hydraulique). Les buses à pression de liquide les plus connues en pulvérisation agricole sont les buses à fente, les buses à turbulence, les buses à miroir et les buses à filets.

• Coefficient d'homogénéité :

Le coefficient d'homogénéité caractérise la régularité de couverture d'une pulvérisation, tant du point de vue de la quantité de gouttes que de leur variété dimensionnelle (dispersion ou largeur du spectre de pulvérisation). Le coefficient d'homogénéité se décline de différentes manières selon la méthode de calcul utilisée : méthode française (coefficient d'homogénéité H), méthode anglo-saxonne (coefficients CH et Span).

• Coefficient (H) :

Le coefficient (H) est un coefficient d'homogénéité qui s'exprime en %. Plus il est proche de 100, plus la population de gouttes est homogène. La formulation du coefficient (H) est abstraite et fait intervenir les moments d'ordre 1, 2 et 3.

$$H = 100 \frac{\sum_{i=1}^{i=N} n_i d_i^2}{\sum_{i=1}^{i=N} n_i d_i \sum_{i=1}^{i=N} n_i d_i^3}$$

H : coefficient d'homogénéité en %
n_i : nombre de gouttes dans la classe _i
d_i : diamètre central de la classe _i (en µm)
N : nombre de classes

• Coefficient (CH) :

Le coefficient CH est une expression anglo-saxonne de coefficient d'homogénéité d'une pulvérisation, déterminé par le quotient du VMD (Volume Median Diameter) par le NMD (Number

Median Diameter) : $CH = VMD/NMD$. Le coefficient CH est toujours supérieur à 1, la valeur 1 correspondant à une homogénéité parfaite (spectre mono-dispersé).

• **Débit :**

Le débit est une grandeur physique exprimant une quantité écoulee par unité de temps. L'unité légale de débit volumique est le m³ par seconde ; dans la pratique et notamment en pulvérisation, on utilise une unité sous-multiple : le litre par minute (L/min). Bien que le symbole du débit soit généralement représenté par la lettre Q, l'usage, en matière d'épandages agricoles, est de le désigner par la lettre D. Pour un pulvérisateur, on distingue le **débit de la pompe** et le **débit de pulvérisation** ; le débit de la pompe est supérieur au débit de pulvérisation (la différence est le **débit de retour en cuve**), le débit de pulvérisation est égal à la somme des **débites individuels des buses** du pulvérisateur.

• **Densité d'impacts :**

Nombre de gouttes de bouillie déposées par cm² sur une surface végétale ou sur le sol. L'expérience montre qu'un dépôt suffisant de petites gouttes non jointives permet des traitements efficaces avec des pertes réduites. La densité d'impacts optimale peut varier selon les types de traitements et de produits. Par exemple, on peut rechercher une densité de 20 à 30 impacts par cm² pour les insecticides systémiques, 30 à 40 impacts par cm² pour les herbicides systémiques de post-levée et 50 à 70 impacts par cm² pour les fongicides de contact (sources Ciba Geigy, ITCF et Berthoud).

• **Dérive :**

Fraction d'un produit de traitement, généralement des fines gouttelettes, qui n'atteint pas sa cible et qui se disperse de manière incontrôlée en causant, le cas échéant, des atteintes à l'environnement et les cultures voisines. Le risque de dérive est d'autant plus grand que les gouttelettes sont fines et que la vitesse du vent est élevée.

• **Diamètre moyen des gouttes (d_a) :**

Il s'agit d'une expression arithmétique, utilisée dans l'étude des populations de gouttes pulvérisées, qui consiste à établir le rapport entre la somme pondérée des diamètres (d_i) d'une population de gouttes par le nombre (ng) de ces gouttes : **d_a = Σd/ng**

• **Diamètre de Sauter :**

Le diamètre de Sauter (d_{v/s}) est une expression caractérisant les gouttelettes de gros diamètre, à partir du rapport entre la somme pondérée des volumes des gouttes (moment d'ordre 3) et la somme pondérée de leur surface (moment d'ordre 2).

$$d_{v/s} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^{i=N} n_i d_i^2}$$

d_{v/s} : diamètre de Sauter (en µm)
 n_i : nombre de gouttes dans la classe _i
 d_i : diamètre central de la classe _i (en µm)
 N : nombre de classes

- **Diamètre médian volumique ou VMD (Volume Median Diameter) ou d_{v50} :**

Pour une population de gouttes représentant un volume total (v), le VMD est une valeur statistique qui définit un diamètre médian de gouttelettes permettant de distinguer deux lots de gouttelettes : un lot de gouttelettes de diamètre inférieur au VMD représentant 50 % du volume (v) et un lot de gouttelettes de diamètre supérieur au VMD représentant 50 % du volume (v). Le VMD, appelé aussi d_{v50} , s'exprime en microns (μm).

L'analyse des populations de gouttes d'une pulvérisation peut être complétée par la détermination d'un diamètre volumique inférieur, appelé d_{v10} , et d'un diamètre volumique supérieur, appelé d_{v90} :

- la valeur d_{v10} (en μm) définit un diamètre de gouttes tel que 10 % du volume pulvérisé sont constitués de gouttes plus petites que le diamètre d_{v10} ,
- la valeur d_{v90} (en μm) définit un diamètre de gouttes tel que 90 % du volume pulvérisé sont constitués de gouttes plus petites que le diamètre d_{v90} .

- **Diamètre médian numérique NMD (Number Median Diameter) ou d_{n50} :**

Pour une population de gouttes représentant un nombre total de gouttes (n), le NMD, ou d_{n50} , est une valeur statistique qui définit un diamètre médian de gouttelettes permettant de distinguer deux lots de gouttelettes : un lot de gouttelettes de diamètre inférieur au d_{n50} représentant 50 % du nombre total (n) et un lot de gouttelettes de diamètre supérieur au d_{n50} représentant 50 % du nombre total (n). Le d_{n50} s'exprime en microns (μm).

- **Goutte :**

En pulvérisation, une goutte est une particule de liquide pulvérisé, sensiblement sphérique, de diamètre généralement inférieur à 1 500 microns (1,5 mm). L'unité utilisée est le micron dont le symbole est μm ; un micron est égal à un millionième de mètre, soit un millième de millimètre.

- **Population de gouttes :**

Le terme population s'applique à l'ensemble des gouttes émises par une buse ou tout autre organe de pulvérisation. La population de gouttes est caractérisée par le spectre de tailles de ces gouttes.

- **Pression :**

Grandeur physique exprimant l'influence d'une force (N) agissant sur une unité de surface (m^2). L'unité légale de pression est le pascal qui correspond à une force de 1 newton agissant sur une surface de 1 m^2 . Les unités de pression utilisées en pulvérisation sont le bar (1 bar = 10^5 pascals = 1,02 kgf/cm^2), le mégapascal (1MPa = 10^6 pascals = 10 bars). Pour information, le PSI (pound square inch), unité de pression anglo-saxonne, équivaut à 0,0717 bar (1 bar = 13,94 PSI).

- **Pulvérisation :**

La pulvérisation consiste à fragmenter un liquide en fines gouttelettes et à en diriger le jet vers les organes végétaux à traiter ou vers le sol, de manière à ce qu'une dose de produit atteigne la cible souhaitée.

- **Recoupement ou recouvrement des jets :**

La notion de recoupement s'applique surtout aux matériels à rampes pour lesquels il convient de respecter une valeur de recoupement des jets afin d'obtenir une répartition de la pulvérisation la plus uniforme possible sur la cible. Pour un angle, une pression de pulvérisation et un espacement entre jets donnés, la valeur de recoupement est obtenue par le réglage de la hauteur de la rampe par rapport au sol ou au plan de la cible végétale.

- **Répartition transversale :**

Répartition du liquide pulvérisé dans le sens perpendiculaire au sens de déplacement de l'appareil de pulvérisation. Sur un appareil à rampe, la répartition transversale est bonne lorsque la surface-cible reçoit une quantité uniforme de produit pulvérisé. Pour parvenir à une répartition transversale convenable, il convient que les jets soient symétriques, que le débit des buses et leur angle de pulvérisation soient identiques et que leur espacement et leur hauteur par rapport à la cible soient correctement réglés (voir aussi recoupement des jets).

- **Span :**

Le « *span* » (qui signifie étendue en anglais) est un coefficient qui permet de quantifier l'homogénéité d'une population de gouttelettes, selon le même principe que pour la détermination de l'étalement granulométrique des granulés d'engrais par exemple. Cette valeur correspond au rapport :

$$\text{SPAN} = \frac{d_{v90} - d_{v10}}{d_{v50}}$$

Plus la valeur du « *span* » est faible, plus le spectre est étroit et plus la pulvérisation est homogène.

- **Spectre de pulvérisation :**

Le terme spectre évoque la répartition dimensionnelle des gouttes produites par une pulvérisation. On dit que le spectre est dispersé (ou large) lorsque les gouttes présentent d'importantes différences dimensionnelles ; au contraire, lorsque les différences dimensionnelles des gouttes sont faibles, on dit que le spectre est peu dispersé ou étroit. Lorsque toutes les gouttes ont le même diamètre, le spectre de pulvérisation est dit mono-dispersé.

- **Taux de couverture (Tc) :**

Le taux de couverture est le rapport entre la surface (Sc) couverte par la pulvérisation et la surface totale qui reçoit cette pulvérisation (Sr) : $Tc = Sc / Sr$.

- **PULVÉRISATEURS**

- **Buses :**

Organes permettant de fragmenter un liquide ou une bouillie en gouttelettes. Suivant le principe de fragmentation utilisé, elles se classent en buses hydrauliques, centrifuges, pneumatiques, électrostatiques...

- **Buse à pression de liquide :**

Pièce ou ensemble de pièces dont le rôle est de réaliser la fragmentation de la bouillie sous l'effet d'une pression de liquide au travers d'un orifice calibré (buse hydraulique). Les buses à pression de liquide les plus connues en pulvérisation agricole sont les buses à fente, les buses à turbulence, les buses à miroir et les buses à filets.

- **Cuve lave-mains :**

Réserve d'eau de 15 litres, facilement accessible, placée sur les pulvérisateurs pour permettre à l'utilisateur de se laver les mains et de rincer les éventuelles projections de produit pendant les manipulations (hygiène et prévention des effets toxiques, allergiques...).

- **Cuve de rinçage :**

Réserve d'eau indépendante de la cuve principale, installée sur les pulvérisateurs, pour permettre leur rinçage. Le rinçage immédiat après traitement permet d'éviter les dépôts, l'évacuation du produit résiduel et sa dilution afin de le pulvériser sur la surface traitée ou sur une culture autorisée.

- **Débit d'un pulvérisateur :**

Volume de bouillie pulvérisé par unité de temps (exprimé en L/min). Pour un volume/hectare choisi, ce débit est proportionnel à la vitesse d'avancement et à la largeur traitée. Divers systèmes permettent de le calculer : règles de calcul, calculatrices séparées ou intégrées aux consoles de commande.

- **DPA (débit proportionnel à l'avancement) :**

Système de régulation assurant un débit de pulvérisation proportionnel à la vitesse d'avancement théorique (capteur de rotation de roue) ou réelle (radar). Les systèmes DPA électroniques (DPAE ou DPE) comportent un débitmètre, ou un capteur de pression placé sur l'alimentation de la rampe, et un capteur de vitesse d'avancement. Les informations fournies par les capteurs (débit/pression, vitesse) sont reçues par une unité électronique qui pilote une vanne motorisée et régule le débit de manière à maintenir, dans une certaine plage, la valeur de consigne du volume/hectare, malgré les variations de vitesse d'avancement.

– **DPM (débit proportionnel au régime moteur) :**

Système assurant un débit proportionnel au régime du moteur du tracteur. Pour un rapport de vitesse engagé, le débit est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur et donc des roues motrices. La régulation DPM ne prend pas en compte les variations de vitesse réelle d'avancement dues au patinage des roues motrices.

• **Humectation :**

Procédé d'application d'un produit phytosanitaire, généralement un désherbant, par contact d'un support imprégné de produit avec les plantes à éliminer :

- brosses ou lanières textiles imprégnées passées sur des mauvaises herbes entre des rangs ou des pieds de vigne par exemple,
- corde imprégnée, placée à une hauteur donnée pour atteindre et détruire les betteraves montées d'une parcelle.

• **Hydro-injecteur :**

Dispositif utilisant la vitesse d'injection d'un liquide dans une canalisation d'aspiration, en vue de remplir la cuve des pulvérisateurs.

• **Incorporateur :**

Équipement des pulvérisateurs constitué par une trémie destinée à l'incorporation de la bouillie dans la cuve du pulvérisateur et, parfois, au rincage des emballages de produits.

• **Jauge :**

Indicateur visuel permettant à l'opérateur de connaître le volume de liquide en cuve lors du remplissage et pendant le traitement (jauge à cadran, jauge à tube transparent, jauge à flotteur, jauge digitale en cabine...).

• **Largeur de travail :**

Distance entre deux axes de passages successifs d'un pulvérisateur correspondant à une couverture transversale régulière de la végétation à traiter.

• **Pulvérisateur :**

Appareil de traitement qui réalise une pulvérisation, c'est-à-dire la fragmentation d'une bouillie en gouttelettes plus ou moins fines sous la forme d'un jet projeté, ou d'un jet porté par un flux d'air, dirigé vers les organes aériens des plantes à protéger ou vers le sol.

• **Pulvérisateur à pression de liquide à jet projeté :**

Appareil de traitement dont la pulvérisation du liquide est obtenue par fragmentation de ce liquide sous pression au travers d'orifices calibrés, appelés **buses** hydrauliques. Les gouttelettes ainsi formées sont projetées par leur propre énergie cinétique, sans l'assistance d'un fluide auxiliaire.

Les pulvérisateurs à jet projeté sont surtout utilisés pour le traitement des cultures basses.

- **Pulvérisateurs à pression, à jet porté :**

Ces pulvérisateurs utilisent le courant d'air d'un ventilateur pour assurer le transport des gouttes entre la buse et la cible. Cette technique est utilisée pour le traitement des végétations élevées (arbres, vergers). En agitant la végétation, la veine d'air facilite la bonne pénétration des gouttes dans les feuillages.

- **Pulvérisateur centrifuge :**

Appareil dont la pulvérisation est produite à la périphérie de disques ou de cylindres rotatifs tournant entre 300 et 7 000 tr/min et parfois plus. La bouillie est introduite à faible pression au centre des disques ou des cylindres. La finesse de la pulvérisation est d'autant plus grande que la vitesse de rotation (force centrifuge) est élevée. Pour des débits assez faibles et pour des liquides ayant des caractéristiques physiques proches de l'eau (viscosité, tension superficielle...), le spectre de pulvérisation est beaucoup plus étroit avec les **buses centrifuges** qu'avec des buses à pression de liquide (buses hydrauliques).

- **Pulvérisateur pneumatique :**

La bouillie, étalée en lame mince ou divisée en filets par un diffuseur, est fragmentée en gouttelettes par un courant d'air rapide qui contribue ensuite à son transport. Le courant d'air, fourni par un ventilateur, est accéléré au niveau du diffuseur de bouillie par un cône convergent profilé (suivi ou non d'un cône divergent), appelé « tuyère ». L'ensemble, constitué de la tuyère et du diffuseur de liquide, est appelé **buse pneumatique**. Ce mode de pulvérisation, parfois utilisé en grande culture, est surtout employé pour les traitements viticoles et arboricoles.

- **Rampe :**

Structure repliable, souvent suspendue, des pulvérisateurs pour cultures basses, servant de support transversal aux buses de pulvérisation. Les rampes sont divisées en plusieurs segments ou tronçons de pulvérisation (à droite et à gauche), pouvant être alimentés individuellement. Selon les appareils, la largeur des rampes varie de 1 à 9 mètres pour les petits matériels horticoles, et de 9 à 36 mètres (voire parfois 42 m) pour les pulvérisateurs de grandes cultures.

- **Réglages :**

Les réglages d'un appareil de traitement sont destinés à configurer cet appareil pour qu'il soit en mesure d'appliquer le volume /hectare choisi : type de buses, pression, débit... (que cet appareil soit équipé ou non de dispositifs de régulation). La mesure du débit du pulvérisateur et son réglage en fonction de la pression sont parfois appelés « tarage » du pulvérisateur.

- **Volume/hectare :**

Volume de bouillie à épandre ou épandu sur une surface d'un hectare. Les divers produits et techniques de traitements utilisés conduisent à appliquer différents niveaux de volume/hectare : **ultra-bas volume / hectare** (< à 5 L/ha), **très bas volume / hectare** (de 5 à 50 L/ha),

bas volume / hectare (de 50 à 100 L/ha), **volume / hectare moyen** (de 100 à 200 - 250 L/ha), **volume / hectare normal** (de 200 - 250 à 500 L/ha) et **haut volume/hectare** (> à 500 L/ha). Le volume/ hectare est indiqué sur les notices d'emploi des produits ou les bulletins techniques des instances de conseil. Il convient d'éviter le terme « débit-hectare », couramment employé dans le même sens. De même, il faut éviter la confusion avec le terme « dose » qui se rapporte à la quantité de produit formulé à appliquer par hectare.

• **Volume résiduel :**

Capacité résiduelle du circuit d'un pulvérisateur lorsque la cuve est vide. Le volume résiduel représente la quantité de produit qui peut encore être contenue dans les organes et les conduites de l'appareil. La présence de ce volume résiduel nécessite le rinçage des appareils après les traitements afin d'éviter les mélanges de produits de nature chimique et de fonction différentes. On distingue le *volume résiduel diluable*, facilement parcouru par l'eau de rinçage, et le *volume résiduel non diluable* constitué par des cavités où la rétention de produit est possible.

LA PROTECTION DES CULTURES, UNE NÉCESSITÉ

Les différentes parties de ce chapitre ne constituent qu'un aperçu des connaissances en la matière. Il a été rédigé dans l'esprit de fournir des informations générales sur la protection phytosanitaire et les aspects agronomiques des techniques de traitements afin de mieux maîtriser l'utilisation des matériels de traitement ; pour plus d'informations, se reporter à l'annexe documentaire et aux publications spécialisées.

Tout au long de leur cycle végétatif, depuis la germination des graines ou le débourrement des bourgeons jusqu'à la récolte, les plantes cultivées sont menacées par les maladies, les attaques d'insectes de différentes espèces et la concurrence de plantes adventives (mauvaises herbes). Si elles ne sont pas enrayerées dès que les parasites sont en mesure de nuire, ces menaces peuvent conduire à des résultats dommageables, voire catastrophiques quant aux rendements et à la qualité des récoltes. C'est pourquoi la lutte contre les ennemis des végétaux constitue l'une des opérations culturales indispensables pour l'accompagnement régulier du cycle des plantes cultivées, au même titre que l'apport d'engrais, la taille, l'irrigation, etc.

La lutte consiste le plus souvent à appliquer uniformément un produit formulé, à une dose par hectare prescrite, de manière à empêcher la progression des mauvaises herbes ou l'attaque de parasites. Ce traitement n'est efficace que lorsqu'il est mis en œuvre peu avant que les mauvaises herbes ou le parasite prolifèrent ou n'altèrent la récolte ; au-delà de ce stade, en effet, il est difficile de lutter efficacement (champignons installés à l'intérieur des plantes ou dégâts d'insectes irréversibles).

Il faut intervenir dans les délais les plus brefs possibles et au moment le plus opportun, après avoir parfaitement pris en compte la nature de l'espèce cultivée, **identifié le risque** ou le **niveau d'infestation** et les **conditions du milieu** : température, humidité, stade de végétation...

LA MAÎTRISE DES TRAITEMENTS

Compte tenu des risques de lessivage par les pluies, de la **période d'efficacité limitée** des produits et de leur mode d'action, il convient de traiter au bon moment. La décision de traitement doit donc être prise en s'appuyant sur les trois conditions suivantes :

- la matière active constituant la spécialité commerciale doit être bien adaptée à la maladie ou au parasite à traiter, d'une part, et au stade de croissance du végétal à protéger d'autre part ;
- le matériel de pulvérisation doit présenter les qualités de précision requises quant à la **dose** et au type de **couverture** souhaités ;
- les conditions atmosphériques doivent présenter le moins de risques possible (température, vent, risque de pluie...).

Pour la décision d'intervention et les modalités du traitement, il convient d'observer les conseils diffusés par les « avertissements agricoles » des services de la Protection des végétaux.

La maîtrise des traitements phytosanitaires repose sur l'efficacité d'emploi des produits, les performances des matériels et le comportement de l'utilisateur. Dans le contexte de rédaction de cet ouvrage, le terme « utilisateur » indique la personne qui choisit le produit, décide de son application et utilise le matériel. Dans la pratique et selon la structure des exploitations, ces trois niveaux peuvent être partagés par une ou plusieurs personnes (agriculteur ou chef de culture et salarié, agriculteur ou chef de culture et entrepreneur, agriculteur et CUMA...).

Dans tous les cas, on recherche à réaliser des pulvérisations comportant des populations de gouttes de grosseur déterminée et de les déposer sur les végétaux (traitements fongicides ; insecticides et herbicides de postlevée) ou au sol (traitements herbicides de prélevée...), avec une certaine densité d'impacts, dans les conditions favorables (stade de croissance, conditions pédo-climatiques...) et en évitant les pertes diverses, notamment par ruissellement, entraînement et dérive.

Pour simplifier, on peut dire que la maîtrise des épandages est fonction de critères dépendant de l'utilisateur et de critères dépendant du matériel :

– **les principaux critères dépendant de l'utilisateur sont :**

- **le sens de l'observation !** Si l'on admet qu'il vaut mieux prévenir que guérir, la meilleure prévention est celle qui consiste à observer régulièrement l'état sanitaire des cultures, surtout lorsque les conditions climatiques sont favorables au développement des parasites. Le sens de l'observation, c'est aussi savoir établir des jugements objectifs pour déterminer les seuils de nuisibilité et évaluer l'efficacité des traitements.
- la connaissance et la maîtrise des informations susceptibles de l'aider dans sa **stratégie de protection** des cultures et ses **décisions d'application** : identification des parasites

ou des maladies, choix des produits et dose d'emploi selon la culture à protéger, période optimale de traitement...

– une utilisation du matériel conforme aux indications données par la notice du constructeur et du produit en veillant particulièrement à l'adéquation des réglages pour exploiter au mieux les propriétés du produit utilisé et respecter l'objectif de **volume / hectare et de la pulvérisation** ;

– un **entretien convenable** afin de conserver le bon fonctionnement, la fiabilité et la précision du pulvérisateur. Il convient particulièrement de veiller à la propreté des filtres, au bon fonctionnement du manomètre, au degré d'usure des buses et à leur remplacement si nécessaire ;

– une surveillance attentive du bon fonctionnement des systèmes de régulation automatique en prenant conscience que les performances et la précision de ces équipements dépendent de la validité des paramètres qui leur sont fournis par l'utilisateur.

– **les principaux critères dépendant du matériel sont :**

– l'aptitude à permettre la réalisation des traitements et le nettoyage dans des conditions de sécurité pour la santé de l'opérateur, les cultures à traiter et l'environnement ;

– l'aptitude à appliquer un volume / hectare de façon homogène et régulière sur les surfaces à traiter ;

– l'adaptabilité aux différents volumes / hectare correspondant aux différentes interventions de l'exploitation ;

– la possibilité d'adapter la largeur de pulvérisation selon la forme des parcelles et pour le traitement des bordures.

• **LES DIFFÉRENTS PRODUITS PHYTOSANITAIRES**

On distingue les traitements fongicides (anticyptogamiques), insecticides ou herbicides. En outre, certaines applications fertilisantes, sous phase liquide, sont réalisées également au moyen de pulvérisateurs.

• **Les traitements fongicides :**

Les spécialités fongicides agissent soit par « contact », soit par « pénétration » ou « systémie » ; dans le premier cas, le fongicide agit en entrant en contact avec les formations de champignons externes et, dans le second cas, le produit pénètre dans la plante en général par les feuilles (fongicide systémique) et crée une défense contre les attaques cryptogamiques (action préventive) ou contre les filaments mycéliens déjà installés (action curative).

Les traitements fongicides sont souvent utilisés en préventifs. Ils nécessitent souvent une couverture continue appliquée par une pulvérisation "mouillante" formée de gouttes relativement grosses qui permettent une bonne imprégnation, la limite étant d'éviter les pertes par ruissellement et par retombée directe sur le sol (lors des traitements de vergers en particu-

lier). Selon les applications, en plus de la fraction du produit ciblée sur le végétal, on recherche aussi qu'une partie atteigne les surfaces inférieures des feuilles, siège préférentiel des attaques.

Une couverture discontinue requiert une pulvérisation plus fine et homogène.

Pour les pulvérisations fongicides, on peut, par exemple, rechercher des gouttes de 200 à 300 μm avec une densité de 30 à 40 gouttes par cm^2 pour les produits à action systémique et des gouttes de 100 à 200 μm avec une densité de 50 à 70 gouttes par cm^2 pour les produits agissant par contact (sources Ciba Geigy, ITCF et Berthoud).

D'une manière générale, les gouttelettes trop fines se déposent difficilement et sont sensibles à la dérive tandis que les grosses gouttes peuvent ne pas atteindre le feuillage. Cela est source de pertes, et l'uniformité et la densité de la couverture en pâtissent. A ce propos, précisons, par exemple, qu'une goutte de 1 000 μm (1 mm de diamètre) a le même volume que 125 gouttes de 200 μm et que la surface qu'elle couvre est cinq fois moins grande !

• Les traitements insecticides :

Les produits insecticides agissent soit directement sur les insectes par contact, ingestion ou inhalation, soit indirectement après avoir pénétré dans la plante (insecticides systémiques).

Pour les insectes mobiles, une couverture très uniforme et très dense n'est pas nécessairement indispensable à la condition, bien entendu, que la dose de produit actif et la période d'effet du traitement soient suffisantes.

Une pulvérisation moyenne et bien répartie, sans trop de grosses gouttes ni de très fines gouttes, est toujours souhaitable dans ce cas. Cependant, les pulvérisations contre les acarariens s'apparentent aux applications antifongiques quant au type de couverture à réaliser.

Pour les pulvérisations insecticides, on peut, par exemple, rechercher des gouttes de 200 à 300 μm avec une densité de 20 à 30 gouttes par cm^2 pour les produits à action systémique, et des gouttes de 100 à 200 μm avec une densité de 40 à 50 gouttes par cm^2 pour les produits agissant par contact (sources Ciba Geigy, ITCF et Berthoud).

• Les traitements herbicides :

Selon les produits, les herbicides agissent soit par contact (action « caustique »), soit par absorption systémique racinaire ou foliaire (herbicides systémiques). Comme la plupart des produits phytosanitaires, les spécialités herbicides ont en général une action sélective.

La lutte contre les mauvaises herbes s'effectue à différents stades de leur cycle biologique, à savoir :

– **au stade de la germination** : ce traitement de prélevée (le terme « *pré-émergence* » d'origine anglo-saxonne est aussi utilisé), nécessite alors une répartition régulière sur le

sol avec une « densité d'impacts » correcte (de 20 à 30 gouttes/cm² de 300 à 400 µm par exemple, sources Ciba Geigy, ITCF et Berthoud) et une période suffisante d'effet du produit. Certains herbicides de prélevée à forte tension de vapeur sont incorporés dans le sol aussitôt après leur application ;

– **au stade de la plantule** : ce traitement de postlevée est celui qui est le plus favorable (de 30 à 40 gouttes/cm² de 150 à 250 µm par exemple, sources Ciba Geigy, ITCF et Berthoud), mais les conditions atmosphériques (vent, pluies) peuvent en retarder l'application. Souvent, une deuxième application peut être nécessaire pour contrôler les adventices poussées entre temps ou insensibles à la matière active utilisée lors du traitement de post-levée ; on parle alors de traitement d'appoint ou de rattrapage.

– **au stade de la plante** : ce traitement consiste à appliquer soit un produit de contact, soit un produit systémique sur les feuillages. Les produits agissant par contact doivent être appliqués sur toute la surface de l'adventice (de 50 à 70 gouttes/cm² de 150 à 250 µm par exemple, sources Ciba Geigy, ITCF et Berthoud), tandis que, pour les produits systémiques, une répartition uniforme est moins indispensable sous réserve que la densité d'impacts soit correcte (de 30 à 40 gouttes/cm² de 150 à 250 µm par exemple) et que chaque adventice reçoive une dose de matière active suffisante pour en stopper le développement par destruction complète de la fonction chlorophyllienne.

Les herbicides peuvent être très sélectifs pour protéger une variété végétale donnée, ou non sélectifs (désherbant total) lorsqu'ils sont utilisés pour un « nettoyage » interculture.

D'une manière générale, les pulvérisations de bouillies herbicides ne doivent pas comporter de gouttes très fines, celles-ci étant sources d'embruns (dérive) nuisibles aux cultures sensibles environnantes.

• **L'application des engrais liquides :**

Certains matériels de pulvérisation peuvent être utilisés pour l'épandage de fertilisants ; il s'agit alors d'épandre des engrais liquides azotés, binaires ou ternaires. Cette technique fait appel à des pulvérisations formées de jets peu fragmentés, car une pulvérisation fine provoquerait des nécroses sur les végétaux (brûlures), surtout si le temps est chaud et/ou sec.

LES PRODUITS DE TRAITEMENT DES CULTURES

Les produits phytosanitaires (ou produits phytopharmaceutiques) appliqués par pulvérisation se présentent sous la forme de poudres mouillables, de granulés solubles, de liquides pâteux ou de liquide plus ou moins fluides. Les produits phytosanitaires peuvent aussi se présenter sous formes de poudres (fongicides par exemple, appliqués par poudrage), de micro-granulés (herbicides par exemple, épandus avec des appareils spécifiques ou des épandeurs d'engrais réglés en conséquence) ou des granulés (anti-limaces par exemple, appliqués avec des matériels spécifiques ou des épandeurs d'engrais réglés en conséquence).

• Composition d'un produit phytosanitaire :

Une spécialité phytosanitaire applicable par pulvérisation comprend généralement trois ou quatre composants :

– **la substance active** qui seule agit contre le ou les parasites. La concentration de cette substance active s'exprime soit en grammes par litre (g/L) du produit commercial, soit en pour cent (%) ou en parties pour mille (ppm) du poids unitaire. Selon leur formulation, les produits peuvent être élaborés à partir d'une ou de plusieurs matières actives,

– **le produit support** qui sert à maintenir la dispersion et la suspension de la substance active. Ce produit est un solvant ou un produit pulvérulent inerte. La concentration de substance active obtenue après mélange avec le produit support est telle que l'emploi de la spécialité phytosanitaire est plus commode et que les dangers de toxicité à l'égard des opérateurs et de l'environnement soit le plus réduits possible,

– **un ou plusieurs formulants** qui sont par exemple des *substances tensioactives* ou des *alourdissants*. Le rôle des produits tensioactifs est de faciliter la dispersion du produit phytosanitaire dans l'eau et de favoriser l'étalement du mélange et son adhésivité sur les feuilles de la culture ou sur les parasites ; on parle à ce propos d'agent adhésivant ou mouillant.

De tels produits sont généralement indispensables, car les téguments des insectes et les plantes comportent sur leur surface des substances cireuses qui empêchent la formation d'un film uniforme de produit. Un produit mouillant a donc pour fonction de réduire la tension superficielle de la bouillie.

• Les différentes formes de produits phytosanitaires :

Les produits phytosanitaires sont classés selon un code international en fonction de leur présentation et de leur mode de mélange : **solution, émulsion, suspension...**

Parmi les nombreuses variantes, citons quelques exemples :

– **les concentrés liquides solubles** (code **SL**) qui sont mélangés dans l'eau. Il y a miscibilité et l'on obtient une vraie solution ; en effet, la répartition du produit phytosanitaire reste uniforme dans la bouillie ;

- **les poudres solubles** (code **SP**) qui sont mélangés dans l'eau. Il y a miscibilité et l'on obtient une vraie solution ;
- **les concentrés émulsionnables** (code **EC**) qui sont des formulations chimiques homogènes diluées dans l'eau sous forme d'émulsion ;
- **les produits en émulsion de type aqueux** (code **EW**) correspondent à une formulation fluide constituée par la dispersion dans une phase aqueuse continue de gouttelettes contenant le produit phytosanitaire ;
- **les suspensions concentrées** (code **SC**) qui sont mélangées, dans l'eau ou dans d'autres liquides, et sans qu'il y ait miscibilité. Le maintien de la suspension peut nécessiter un brassage permanent du mélange dans la cuve de pulvérisation ;
- **les poudres mouillables** (code **WP**) qui se présentent sous une forme pulvérulente destinée à être dispersée dans l'eau ;
- **les formulations de granulés dispersibles** (code **WG**) destinées à être appliquées après délitage et dispersion dans l'eau.

Respecter les instructions des étiquettes des emballages, des fiches de données de sécurité des produits et des notices d'utilisation des pulvérisateurs. Se reporter à l'annexe documentaire et notamment au document du CORPEN : *techniques d'application et de manipulation des produits phytosanitaires* (rappels réglementaires, facteurs de risque, recommandations relatives aux produits, aux matériels et à l'organisation des traitements...).

La taille et la caractérisation des gouttes	212
– La notion de spectre de pulvérisation	213
– Le diamètre moyen des gouttes	213
– Le diamètre de Sauter	214
– Le coefficient H	214
– Le VMD (diamètre médian volumique)	214
– Le NMD (diamètre médian numérique)	214
– Le coefficient CH	215
– Le span	215
Les phases de la pulvérisation	215
– La fabrication des gouttes	216
– Le transport des gouttes	216
– La pénétration des gouttes	219
– Le dépôt des gouttes	219
Le principe et le rôle des buses de pulvérisation	219
– Le débit individuel d'une buse	220
– La relation débit-pression	221
– La répartition de la pulvérisation au niveau des buses	221
– Les matériaux de construction des buses	222
– La normalisation des buses	223
Les différents types de buses de pulvérisation	223
• Les buses à fente	224
• Les buses à turbulence	230
• Les buses à miroir	233
• Les buses bifluide à aspiration d'air	234
• Les buses bifluide à air comprimé	235
• Les buses à filets	236
• Les buses centrifuges	236
• Les buses pneumatiques par détente d'air sous pression	239

Le rôle fondamental d'un traitement est de fragmenter un liquide en gouttes pour appliquer le produit actif en respectant un volume par hectare donné. Pour atteindre au mieux l'objectif du traitement, ces gouttes doivent avoir une grosseur donnée, être en quantité suffisante (densité d'impacts) et parvenir sur leur cible avec une répartition optimale. Pour mieux comprendre les différents aspects d'une pulvérisation, étudions l'importance de la taille des gouttes et analysons les phases principales de la pulvérisation agricole.

• LA TAILLE ET LA CARACTÉRISATION DES GOUTTES

Le volume d'une goutte étant égal à $\pi d^3/6$, ce volume varie avec le rapport des diamètres, au cube. Pour illustrer ce propos, comparons (fig. 158) une goutte (A) de 400 μm et une goutte (B) de 100 μm , le rapport des volumes A et B est égal à 64 :

$$\frac{400^3/6}{100^3/6} = \frac{400^3}{100^3} = 4^3 = 64$$

Cette constatation montre à quel point, en pulvérisation, le diamètre des gouttes est important, d'autant que l'on peut compléter la comparaison précédente par les points suivants : le volume d'une goutte de 400 μm (0,4 mm) étant soixante-quatre fois plus grand qu'une goutte de 100 μm (0,1 mm), pour une concentration donnée, cette goutte porte soixante-quatre fois plus de matière active ! (si la bouillie reste homogène) et, à vitesse égale, son énergie cinétique est soixante-quatre fois plus grande.

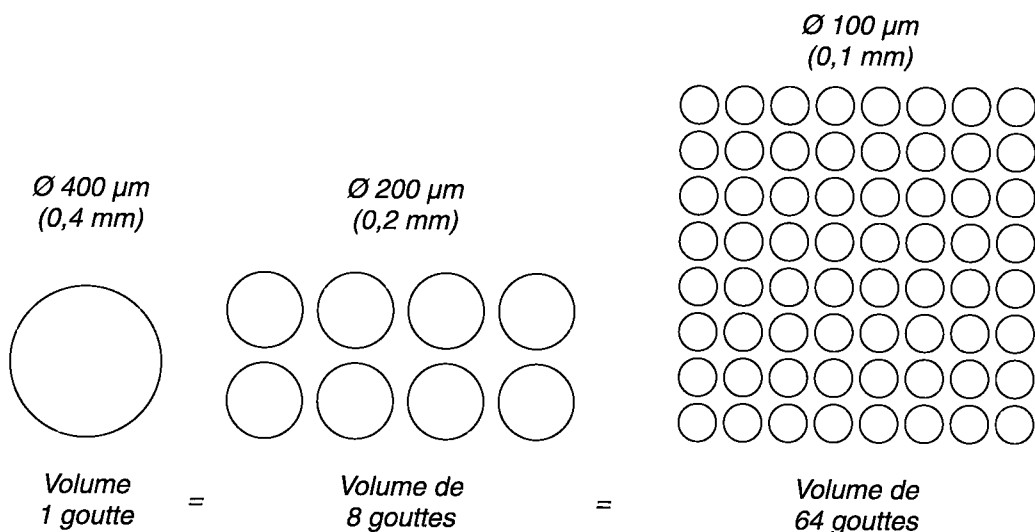


Fig. 158 - L'influence de la taille des gouttes sur la couverture d'une pulvérisation

• La notion de spectre de pulvérisation :

En réalité, un jet de pulvérisation est formé de nombreuses gouttes appartenant à des classes dimensionnelles variées. L'analyse des jets est donc relativement complexe et nécessite des moyens de laboratoire assez sophistiqués (granulomètre laser...).

Le spectre de pulvérisation caractérise la répartition dimensionnelle des gouttes produites par une pulvérisation. On dit, par exemple, que le spectre est étroit lorsque les gouttes présentent de faibles différences dimensionnelles ; la pulvérisation est alors homogène. Le spectre de pulvérisation est caractérisé par des coefficients d'homogénéité (H, CH, Span).

En pulvérisation agricole, les grosseurs mini et maxi des gouttes varient entre 100 et 600 μm (voire jusqu'à 1 500 μm) et les pratiques les plus courantes se situent plutôt entre 150 et 350 μm . Toujours dans le domaine particulier des traitements phytosanitaires, on peut retenir la classification suivante :

- gouttes très fines : < à 100 μm ,
- gouttes fines : de 100 à 200 μm ,
- gouttes moyennes : de 200 à 300 μm ,
- gouttes grosses : de 300 à 450 μm ,
- gouttes très grosses : > à 450 μm .

Aucune technique de pulvérisation n'étant capable de diviser un liquide en gouttelettes de grosseur identique, les chercheurs et les constructeurs s'efforcent de réaliser des buses dont le spectre de pulvérisation est le plus étroit possible ; En d'autres termes, on recherche des jets dont la grosseur moyenne des gouttes correspond à l'objectif de traitement et dans lesquels il y a le moins possible de gouttes plus petites et plus grosses que la moyenne recherchée.

Les méthodes de caractérisation des populations de gouttes s'expriment différemment selon leur origine, française ou anglo-saxonne.

Pour l'école française, on utilise notamment le **diamètre moyen**, le **diamètre de Sauter** et le **coefficient H** ;

Pour les formules anglo-saxonnes, on utilise le **diamètre médian volumique** (VMD ou D_{v50}), les diamètres D_{v10} et D_{v90} et le **diamètre médian numérique** (NMD ou D_{n50}), le **coefficient CH** et le **coefficient « span »** :

• Le diamètre moyen des gouttes (Dm) :

Le diamètre moyen des gouttes (Dm) est une expression arithmétique qui définit le rapport entre la somme (d) des diamètres d'une population de gouttes par le nombre (n) de ces gouttes.

$$d_a = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} n_i d_i}{\sum_{i=1}^{i=N} n_i}$$

d_a : diamètre moyen (en μm)

n_i : nombre de gouttes dans la classe i

d_i : diamètre central de la classe i (en μm)

N : nombre de classes

• **Le diamètre de Sauter :**

Le diamètre de Sauter ou $d_{v/s}$ exprime un diamètre moyen volumique d'une population de gouttes, à partir du rapport entre la somme des volumes des gouttes (moment d'ordre 3) et la somme de leur surface (moment d'ordre 2).

$$d_{v/s} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^{i=N} n_i d_i^2}$$

$d_{v/s}$: diamètre de Sauter (en μm)
 n_i : nombre de gouttes dans la classe i
 d_i : diamètre central de la classe i (en μm)
 N : nombre de classes

• **Le coefficient (H)** est un coefficient d'homogénéité qui s'exprime en %. Plus il est proche de 100, plus la population de gouttes est homogène. La formulation du coefficient (H) est abstraite et fait intervenir des moments d'ordre 1, 2 et 3.

$$H = 100 \frac{\sum_{i=1}^{i=N} n_i d_i^2}{\sum_{i=1}^{i=N} n_i d_i \sum_{i=1}^{i=N} n_i d_i^3}$$

H : coefficient d'homogénéité (en %)
 n_i : nombre de gouttes dans la classe i
 d_i : diamètre central de la classe i (en μm)
 N : nombre de classes

• **Le VMD (Volume Median Diameter ou diamètre médian volumique) :**

Il s'agit d'une valeur statistique (d'origine anglo-saxonne) qui définit un diamètre médian de gouttelettes d'une pulvérisation en distinguant deux lots de gouttelettes : un lot de gouttelettes de diamètre inférieur au VMD représentant 50 % du volume (v) et un lot de gouttelettes de diamètre supérieur au VMD représentant 50 % du volume (v). Le VMD, appelé aussi D_{v50} , s'exprime en microns (μm). Pour une analyse plus précise de la variété dimensionnelle des gouttes d'une pulvérisation, on utilise deux paramètres complémentaires au D_{v50} , le D_{v10} et le D_{v90} :

- le **diamètre volumique inférieur D_{v10}** (en μm) définit un diamètre de gouttes tel que 10 % du volume pulvérisé est constitué de gouttes plus petites que le diamètre D_{v90} ,
- le **diamètre volumique supérieur D_{v90}** (en μm) définit un diamètre de gouttes tel que 90 % du volume pulvérisé est constitué de gouttes plus petites que le diamètre D_{v90} .

• **Le NMD (Number Median Diameter ou diamètre médian numérique) :**

Pour une population de gouttes représentant un nombre total de gouttes (n), le NMD est une valeur statistique (d'origine anglo-saxonne) qui définit un diamètre médian de gouttelettes qui permet de distinguer deux lots de gouttelettes : un lot de gouttelettes de diamètre inférieur au NMD représentant 50 % du nombre total (n) et un lot de gouttelettes de diamètre supérieur au NMD représentant 50 % du nombre total (n). Le NMD ou d_{n50} s'exprime en microns (μm).

Le coefficient d'homogénéité caractérise la régularité de couverture d'une pulvérisation, tant du point de vue de la quantité de gouttes que de leur variété dimensionnelle (dispersion ou largeur du spectre de pulvérisation). Le coefficient d'homogénéité se décline de différentes manières selon la méthode de calcul utilisée : méthode française (coefficient d'homogénéité H), méthode anglo-saxonne (coefficients CH et Span).

- **Le coefficient CH** est une expression anglo-saxonne de coefficient d'homogénéité d'une pulvérisation, déterminé par le quotient du VMD (Volume Median Diameter) par le NMD (Number Median Diameter) : $CH = VMD/NMD$. Le coefficient CH est toujours supérieur à 1, la valeur 1 correspondant à une homogénéité parfaite (spectre mono dispersé). Plus le CH se rapproche de 1, plus la pulvérisation est homogène.

Le tableau ci-après indique les valeurs moyennes du coefficient d'homogénéité CH selon les types de buses utilisés :

Type de buse	Coefficient d'homogénéité CH = VMD/NMD
Buse à miroir	de 5 à 10
Buse à fente	de 2 à 7
Buse à turbulence	de 2 à 4
Epanchage d'engrais	de 2,5
Buse centrifuge	de 1,2 à 1,6
Electrodynamique	de 1,08 à 1,30

Fig. 159 : Valeurs moyennes de coefficient d'homogénéité selon le type de buses

- **Le « span » :**

Le span (ce mot signifie « étendue » en anglais) est un coefficient qui permet de quantifier l'homogénéité d'une population de gouttelettes, selon le même principe que pour la détermination de l'étalement granulométrique des granulés d'engrais par exemple. Cette valeur correspond au rapport :

Plus la valeur du « span » est faible, plus le spectre est étroit et plus la pulvérisation est homogène.

$$\text{Span} = \frac{d_{v90} - d_{v10}}{d_{v50}}$$

- **LES PHASES DE LA PULVÉRISATION**

Bien que la pulvérisation soit un processus complexe et relativement continu, son étude peut être abordée de manière plus simple en distinguant quatre phases : **la fabrication des gouttes, le transport des gouttes entre la buse et la plante, la pénétration des gouttes dans la végétation et leur dépôt sur la cible.**

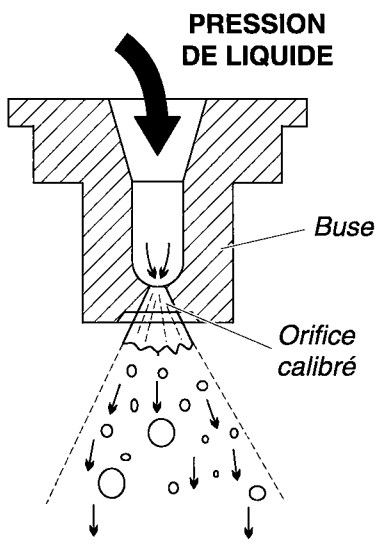
• **La fabrication des gouttes** fait appel à six principes physiques :

- **la pression de liquide** (fig. 160), qui consiste, sous l'effet d'une pression, à forcer le liquide à plus le CH se rapproche de 1, plus la pulvérisation est homogène se diviser à la sortie d'orifices calibrés appelés buses. Les appareils utilisant ce principe sont des **pulvérisateurs à pression de liquide** ;
- **sous l'action de l'air** (fig. 160), où le liquide est divisé en gouttelettes sous l'action d'une veine d'air à grande vitesse, ou sous l'effet d'une buse à détente pneumatique. Les appareils utilisant ce principe sont des **pulvérisateurs pneumatiques** ;
- **la force centrifuge** (fig. 160), que l'on utilise pour fragmenter un liquide que l'on introduit au centre d'un disque ou d'une cage tournant à vitesse élevée. Les appareils utilisant ce principe sont des **pulvérisateurs centrifuges** ;
- **la pulvérisation électrostatique** où la fragmentation du liquide est obtenue par une buse (à pression, centrifuge ou pneumatique) et le transport sous l'effet de la vitesse des gouttelettes et des forces électrostatiques qui résultent de la différence de potentiel (moyenne tension de 2 à 4 kilovolts) existant entre le liquide et les plantes à traiter ;
- **la pulvérisation électrodynamique** (fig. 160) où la fragmentation des gouttes est due aux forces électrostatiques résultant des champs électriques intenses produits par la différence de potentiel entre la buse et la cible (haute tension de 15 à 45 kilovolts). Le champ électrique intense favorise le transport des gouttes ;
- **la thermo-vaporisation, ou pulvérisation thermique, ou thermo-nébulisation**, qui utilise un flux de gaz chaud pour vaporiser les gouttelettes en fines particules de brouillard (< à 50 µm). Ces traitements peuvent être utilisés pour les applications sous serres, ou pour certains traitements forestiers.

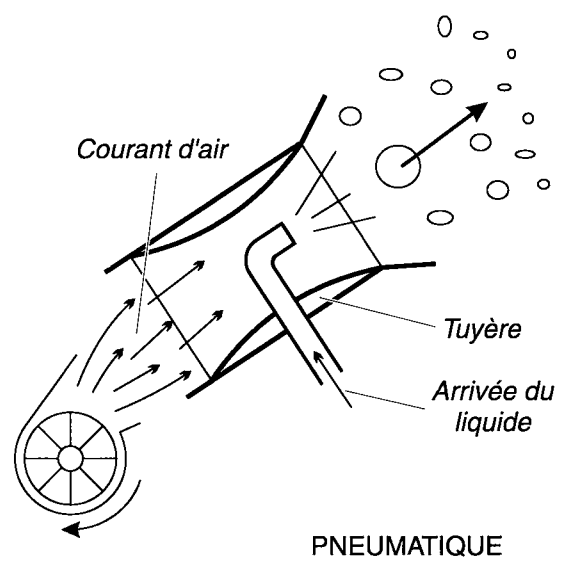
• **Le transport des gouttes** (fig. 161) :

Selon les techniques d'application, le transport des gouttes peut être assuré par **projection**, par assistance ou par attraction électrodynamique :

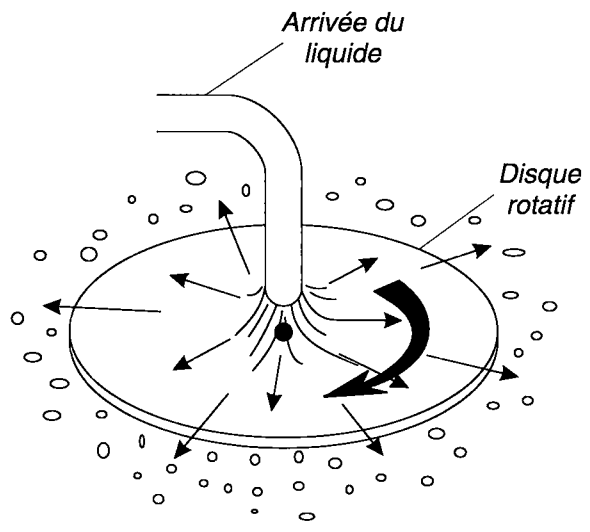
- **le transport par projection** consiste tout simplement à donner aux gouttes une énergie suffisante pour qu'elles puissent atteindre d'elles-mêmes leur cible. Ce mode de transport est obtenu soit par des **jets projetés par pression de liquide**, soit par **projection centrifuge**. En général, dans le transport par projection, les grosses gouttelettes entraînent l'air du jet de pulvérisation qui entraîne à son tour les plus petites gouttelettes. De ce fait, un transport par projection est toujours associé à un transport par entraînement de faible niveau énergétique.
- **le transport avec assistance** consiste soit à porter les gouttelettes avec une veine d'air porteur (**jet porté**), soit avec une veine d'air ou de gaz chaud (**pulvérisation thermique ou thermo-nébulisation** appliquée sur les cultures sous serre), dans ce cas, la chaleur a aussi une action de division des gouttelettes et l'on obtient un brouillard de gouttes inférieures à 50 µm ;
- **le transport électrodynamique**, Dans ce cas, les gouttelettes se déplacent sous l'effet d'une différence de potentiel de 5 000 à 45 000 volts environ ; généralement les gouttes sont chargées positivement à la sortie des buses, et la cible (les plantes) est à la masse.



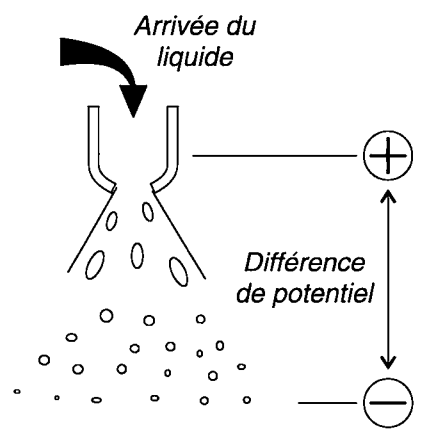
PRESSION DE LIQUIDE



PNEUMATIQUE



CENTRIFUGE



ELECTRODYNAMIQUE

Fig. 160 - Quatre principes de fragmentation d'un liquide

Principe de pulvérisation	Énergie de transport des gouttes	Applications principales	Observations
Jet projeté par pression de liquide	Énergie cinétique propre	Appareils à rampe pour cultures basses	La vitesse initiale et l'énergie cinétique dépendent de la pression et du débit à chaque buse
Jet projeté par force centrifuge	Énergie cinétique propre	Appareils à rampes ou pulvérisateurs portatifs à très bas volume/hectare	La vitesse des gouttes dépend de la vitesse de rotation du disque, mais elle peut dépendre parfois de la pression et du débit
Jet porté à pression de liquide	Vitesse initiale et courant d'air porteur	Souvent des appareils arboricoles et viticoles. Certains matériels sont à rampes.	La vitesse des gouttes dépend essentiellement de la pression de liquide et de la vitesse de l'air porteur.
Jet porté pneumatique	Courant d'air porteur	Souvent, des appareils arboricoles et viticoles. Certains appareils à rampes.	La vitesse des gouttes dépend de la vitesse du courant d'air porteur.
Jet porté centrifuge	Force centrifuge et courant d'air porteur	Diffuseurs à hélice et cage rotative.	La vitesse des gouttes dépend de la vitesse du diffuseur et du courant d'air porteur
Jet porté thermique	Courant porteur d'air chaud	Traitements sous serres et traitements forestiers	La vitesse des gouttes dépend de la vitesse du courant d'air porteur.
Jet porté électrostatique	Énergie cinétique et différence de potentiel	Traitements à très bas volume/hectare	Le diamètre des gouttes est essentiellement dû à la pression et à la vitesse
Jet porté électrodynamique	Différence de potentiel	Traitements à très bas volume/hectare	Plus la différence de potentiel croît, plus les gouttes tendent à aller vite et à se diviser

Fig. 161 - Tableau résumant les différents modes de transport des gouttes en fonction du type de pulvérisation

• La pénétration des gouttes :

La bonne pénétration des gouttes dépend de leur énergie cinétique (grosseur et vitesse initiale), de leur direction par rapport à l'architecture foliaire de la plante et des brassages pouvant résulter de l'agitation des feuilles sous l'effet de la pulvérisation et de la présence éventuelle d'une veine d'air.

– **pour les systèmes à jet projeté** par pression, la bonne pénétration dépend surtout de la vitesse des gouttes (et donc de leur énergie cinétique) et de la distance à parcourir ;

– **pour les systèmes à jet porté**, la bonne pénétration dépend de la vitesse et de la bonne orientation du flux d'air porteur et de la distance à parcourir ;

– **pour les systèmes électrostatiques et électrodynamiques**, la pénétration est d'autant meilleure que la différence de potentiel est élevée et que la distance à parcourir est faible.

• Le dépôt des gouttes :

Le dépôt est caractérisé par la faculté des gouttes à se fixer en particulier sur les feuillages. Un bon dépôt nécessite une densité d'impacts, et donc de gouttes suffisantes, afin d'assurer la qualité de la couverture de la plante. Concrètement, cette qualité de couverture dépend du volume appliqué à l'hectare, du choix des buses, des réglages de pression et de la densité du couvert végétal.

Le dépôt des gouttes est caractérisé par la densité d'impacts au cm^2 . Cette densité varie, par exemple, de 20 à 80 impacts/ cm^2 selon le mode d'action des produits. On recherche par exemple, de 20 à 30 impacts par cm^2 pour les insecticides systémiques, de 30 à 40 impacts par cm^2 pour les herbicides de postlevée et de 50 à 70 impacts par cm^2 pour les fongicides de contact (sources CIBA GEIGY).

L'analyse du dépôt des gouttes sur les végétaux montre que, pour un nombre donné d'impacts au cm^2 , la grosseur des gouttes est plus ou moins homogène.

• LE PRINCIPE ET LE RÔLE DES BUSES DE PULVÉRISATION

Pour la majorité des systèmes de pulvérisation, les organes essentiels qui assurent le calibrage du débit et la fragmentation du liquide sont les **buses** (fig. 162). Avant d'aborder les propriétés et caractéristiques des différents types de buses, observons les fonctions d'une buse élémentaire à pression de liquide (fig. 163) : cette buse comporte un orifice calibré soumis en amont à une pression de liquide telle que ce liquide est forcé de franchir l'orifice à vitesse élevée. Ce rétrécissement provoque des perturbations du régime d'écoulement de la veine liquide lors de son passage dans l'orifice (frottements, écoulements différenciés, turbulences...) puis à sa sortie lorsqu'elle entre en contact avec l'air ambiant. Ces perturbations sont à l'origine de la division du liquide en gouttelettes plus ou moins régulières.



Fig. 162 - Vue des buses d'une rampe de pulvérisation (photo Cemagref)

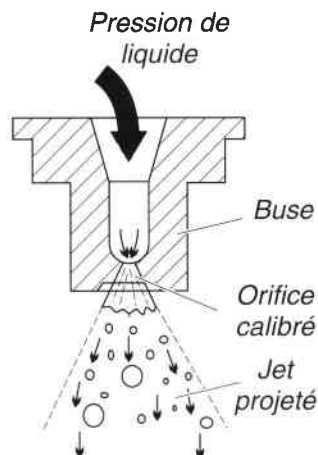


Fig. 163 - Principe d'une buse à pression de liquide

• **Le débit individuel d'une buse :**

Le débit individuel des buses est une caractéristique extrêmement importante qui constitue la base de tout raisonnement en matière de pulvérisation. Le débit d'une buse peut être calculé par la relation :

$$Q = ms \sqrt{\frac{2P}{\rho}}$$

Q = débit (m³/s),
 m = coefficient de débit,
 S = section de l'orifice (m²),
 P = Pression en amont de l'orifice (Pa),
 ρ = masse volumique du liquide (kg/m³).

Cette relation est obtenue par l'application de l'équation de Bernoulli à travers un orifice (équation exprimant la conservation de l'énergie).

Le coefficient de débit « m » est toujours inférieur à 1, il dépend notamment des pertes de charge singulières de l'orifice, de la forme de l'orifice, de la nature de l'écoulement en amont de l'orifice, de la pression...

La vitesse théorique du liquide est exprimée par le terme de racine : $\sqrt{\frac{2P}{\rho}}$

Pour des raisons hydrodynamiques, la vitesse théorique du liquide due à l'orifice calibré atteint sa valeur maximale au niveau d'une section de liquide contractée située un peu en aval de l'orifice. L'influence de la pression sur la vitesse du liquide peut être calculée et résumée par le tableau ci-après :

Pression (bars)	1	2	5	20	40
Vitesse d'éjection (m/s)	14,1	25,5	34,6	63,2	89,4

Fig. 164 - **Vitesse moyenne calculée du liquide à la sortie des buses en fonction de la pression** (source Cemagref)

Ces chiffres n'ont qu'une valeur indicative et les valeurs de vitesse des gouttelettes issues de ce jet liquide chutent fortement dès leur entrée dans l'air.

Pour les buses à pression de liquide, quel que soit le type utilisé, le débit dépend du calibrage de son orifice et de sa pression d'alimentation. Pour chaque type de buse, les constructeurs indiquent un débit correspondant à une pression mesurée à la buse. Pour les buses à fente, des couleurs normalisées permettent d'identifier les principaux calibres pour une pression de référence de 3 bars.

• **La relation débit-pression :**

Pour une buse donnée, la pression en amont de l'orifice varie en théorie avec le carré du rapport des débits. Prenons l'exemple d'une buse fonctionnant à une pression (p) de 3 bars et ayant un débit (q) de 2,07 L/min. Si l'on désire obtenir un débit (q') de 1,8 L/min, il faut régler la pression (p') à 2,25 bars en appliquant l'équation suivante :

$$q' = q \cdot \sqrt{\frac{p'}{p}} \text{ ou } p' = p \cdot \frac{q'^2}{q^2} = p \cdot \frac{1,8^2}{2,07^2} = 2,25 \text{ bars}$$

Cette relation est applicable tant que l'écart entre le débit (q) ou la pression (p) et le débit (q') et la pression (p') est faible. Dans le cas d'un réglage, faire plusieurs fois ces mesures afin d'obtenir le débit souhaité par itérations successives.

Pour faciliter les réglages, les constructeurs de buses fournissent en général les valeurs de débit des différents types de buses, selon la pression d'utilisation. De toute manière, lors des opérations de réglages des pulvérisateurs, il convient de mesurer le débit réel aux buses après avoir procédé à une correction de la pression (se reporter au chapitre 10).

Les frottements et les perturbations (coudes, distributeur, vannes, anti-gouttes...) rencontrés par le liquide dans les canalisations provoquent des pertes de charge (pertes de pression). La pression réelle aux buses est inférieure à celle qui est indiquée par le manomètre, lorsque celui-ci mesure la pression très en amont des buses.

• **La répartition de la pulvérisation au niveau des buses :**

L'une des particularités des traitements par pulvérisation tient au fait que l'on doit appliquer sur une surface (végétation ou sol) une certaine quantité de produit, fragmentée en gouttelettes ayant une dimension et une répartition les plus homogènes possibles à partir de plusieurs buses. Dans ces conditions, la bonne répartition de la pulvérisation sur la cible à traiter ne dépend pas seulement des caractéristiques des buses, mais aussi de l'action de l'ensem-

ble de ces buses. Parmi les nombreux paramètres qui influencent la répartition, citons : **l'angle et la forme des jets, la position relative des buses, la symétrie des jets et l'égalité des débits des buses** :

– **l'angle au sommet du jet**, ou angle de pulvérisation, ou encore angle de sortie du jet, est l'élément de base pour l'étude de l'association de buses de même type et de même calibre sous une rampe horizontale (pour cultures basses notamment) : la hauteur de la rampe et la valeur de recouvrement des jets sont deux facteurs qui dépendent de cet angle au sommet ;

– **la forme du jet** dépend du type de buse et de la pression. Les buses à fente forment des jets assez plat du type « pinceau », les buses à turbulence des jets creux à section circulaire ou annulaire. La forme du jet est aussi prise en compte pour le positionnement des buses afin d'assurer les valeurs de recouvrement les plus judicieuses ;

– **la position des buses** doit tenir compte de l'angle et de la forme des jets fournis par les buses. En France, l'entraxe des buses est généralement de 50 cm, sauf dans certaines fabrications spécifiques. Il convient, de respecter le parallélisme des buses en fonction de leur mode de pulvérisation : alignement du plat des jets pour les buses à miroir par exemple, ou décalage de 5° du plan des jets avec les buses à fente ;

– **la symétrie des jets** est obtenue lorsque la pulvérisation est répartie symétriquement autour de l'axe de chaque buse. Une usure irrégulière, un défaut d'usinage, des pastilles excentrées ou un bouchage partiel sont autant de causes qui altèrent la symétrie du jet et la répartition du liquide pulvérisé ;

– **l'égalité des débits** des buses sur toute la longueur de la rampe est nécessaire. Ceci implique que les buses soient du même calibre et du même constructeur, que leur degré d'usure soit égal et que leur pression d'alimentation soit identique.

• **Les matériaux de construction des buses** :

Selon les cas, les buses sont réalisées soit en **céramique**, soit en **résine de synthèse**, soit en **acier inoxydable**, soit en **laiton**.

– **les buses en céramique** (alumine frittée par exemple) sont réalisées soit en une seule pièce, soit insérées dans un corps en matière plastique (polyamide, PVC...). Les céramiques sont des matériaux très durs qui présentent une résistance très élevée à l'abrasion (durée de vie plus de vingt fois plus longue que celle de l'acier inoxydable après vingt heures d'usure accélérée). La grande dureté des céramiques ne dispense pas d'éviter les chocs et d'effectuer les opérations de débouchage avec le plus grand soin.

– **les buses en résine de synthèse** sont réalisées en matière plastique traitée à base de polymères. Ces matériaux, peu coûteux, présentent cependant une bonne résistance à l'abrasion (généralement meilleure que l'acier) mais sont vulnérables aux rayures. Il convient donc d'observer le plus grand soin lors des opérations de débouchage.

– **les buses en acier inoxydable** résistent bien aux agressions chimiques. Leur résistance à l'abrasion est variable selon les traitements qu'elles ont subis en fabrication (durcissement, trempe...).

– **les buses en laiton** présentent une résistance moyenne à l'abrasion et à la corrosion chimique. Le laiton est un alliage de cuivre et d'étain qui se prête particulièrement bien aux moulages de formes complexes.

• **La normalisation des buses :**

Les paramètres caractérisant les performances des buses de pulvérisation sont définis dans la norme NF U-26.110, en concordance avec la norme internationale ISO 5682/1. Ces deux normes définissent les conditions, les moyens de mesure, les procédures et la description des essais de buses. Ces normes sont utilisées par les constructeurs et les laboratoires de recherche et d'essais comme celui du Cemagref à Montpellier.

Les différents paramètres sont :

– **l'uniformité de débit**, qui permet d'évaluer la qualité de fabrication. Les débits individuels des buses doivent être compris dans une fourchette de plus ou moins 5 %, par rapport au débit moyen du lot ;

– **la variation de débit en fonction de la pression ;**

– **la distribution de la pulvérisation**, qui consiste à mesurer sous différentes pressions la répartition transversale et la symétrie des jets des buses ;

– **la variation de débit et de la distribution en fonction de l'usure** sous l'action d'un abrasif (oxyde d'aluminium) ;

– **l'angle de pulvérisation** en fonction de la pression ;

– **la taille des gouttelettes** pour les valeurs de pression indiquées par le constructeur. L'analyse peut être réalisée soit par piégeage des gouttes sur un support de silicone (boîte de Petri), soit par un analyseur granulomètre à laser.

Nous verrons à propos des buses à fente qu'il existe des normes spécifiques pour leur dimensionnement et le repérage de leur débit nominal.

• **LES DIFFÉRENTS TYPES DE BUSES DE PULVÉRISATION**

Les principaux types de buses à pression de liquide (fig. 165) sont les **buses à fente**, les **buses à turbulence**, les **buses à miroir**, les **buses bifluïdes** et les **buses à filets**, chacune ayant des caractéristiques géométriques et des utilisations différentes.

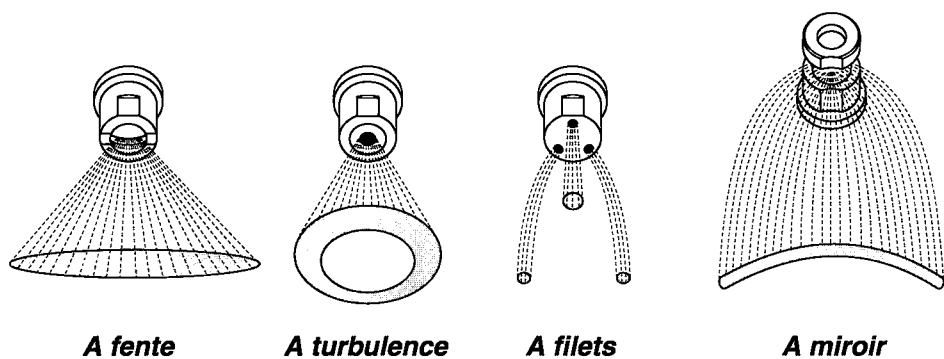


Fig. 165 - Principaux types de buses à pression de liquide

• **Les buses à fente** (fig. 166) :

Les buses à fente sont le plus souvent utilisées pour les traitements des cultures basses (fongicides, insecticides, herbicides) ; elles doivent leur appellation à la forme elliptique étroite de leur orifice d'écoulement en opposition aux orifices à section circulaire. Selon les cas, elles se présentent soit sous la forme d'éléments séparés, soit sous la forme d'éléments insérés à l'écrou. Les buses séparées sont schématiquement constituées par un corps cylindrique comportant une **collerette** pour assurer l'appui de son **écrou** de fixation au **porte-buse**. La face supérieure de la collerette peut être munie de deux saillies se logeant dans le porte-buse lors du serrage de l'écrou, dans le dessein de réaliser la même orientation des jets pour toutes les buses équipant une rampe. Leurs dimensions sont normalisées par la norme ISO 10626.

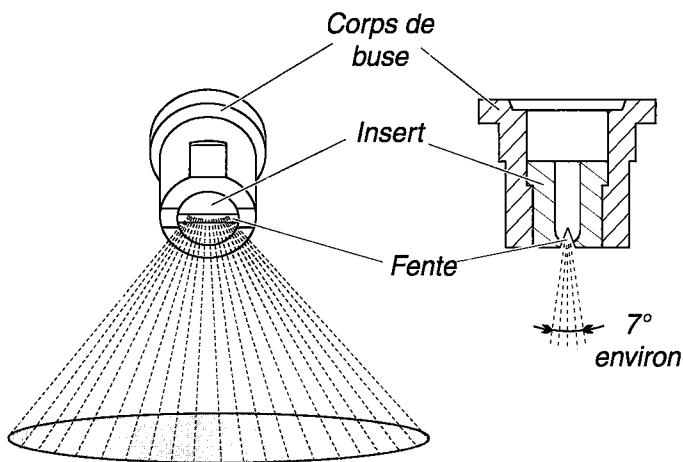


Fig.166 - Principe d'une buse à fente

La figure 166 montre la coupe transversale d'une buse à fente et le profil du jet. Le processus de fragmentation du liquide peut être résumé de la manière suivante : dès sa sortie de l'orifice, le liquide forme une nappe continue représentant un plan angulaire. Le film liquide est étiré par les forces de pression et se fractionne pour produire des gouttelettes. L'augmentation

de pression diminue la hauteur de cette nappe angulaire. Le jet, appelé souvent « **jet pin-ceau** », a un certain angle au sommet (80° ou 110°, parfois on rencontre des jets de 65 ou 90°) et une certaine épaisseur dans le plan perpendiculaire au plan du jet (l'angle d'épaisseur du cône est environ de 7°).

Sous une pression assez basse, inférieure à 1 bar, l'angle de buse est inférieur à l'angle de pulvérisation ; les gouttes se détachant de la périphérie de cette nappe sont grosses et leur répartition est irrégulière. Au fur et à mesure que la pression augmente, l'angle de pulvérisation tend à augmenter (fig. 169) et la pulvérisation devient de plus en plus fine.

Pour des pressions de 1 à 4 bars, les buses à fente produisent des pulvérisations dont le diamètre de Sauter s'échelonne de 150 à 500 µm. D'une manière générale, les pulvérisations les plus fines sont obtenues avec des buses de petit et moyen calibres à des pressions élevées.

Les plus grosses gouttes sont produites par le bord des fentes et elles se situent donc sur la périphérie du jet, principalement sur les deux extrémités. Le spectre optimal dépend surtout du mode d'action des produits utilisés ; à la date de rédaction de cet ouvrage, les pratiques agricoles tendent à rechercher un spectre de pulvérisation compris entre 150 et 350 µm.

L'étude en laboratoire des jets montre que les petites gouttes parviennent à atteindre leur cible en étant entraînées par les turbulences d'air générées par les grosses gouttes, cela, bien sûr, en absence totale de vent et de mouvements extérieurs (oscillations des rampes par exemple).

Les buses à fente sont principalement caractérisées par leur **angle de pulvérisation** et leur **débit nominal**.

- les angles de pulvérisation sont 80° et 110°,
- le débit nominal (calibre de la buse) est indiqué pour une pression de 3 bars et il est repéré par un code couleur établi par la norme ISO 10625 (tableau de la fig. 167).

Débit à 3 bars (L/min)	Code couleur	Code buse associé
0,4	Orange	01
0,6	Vert	015
0,8	Jaune	02
1,2	Bleu	03
1,6	Rouge	04
2,0	Brun	05
2,4	Gris	06
3,2	Blanc	08

Fig. 167 - **Code couleur des buses à fente selon la norme ISO 10625**

Le code buse associé n'est pas prévu par la norme ISO 10 625, il correspond approximativement au 1/10 du débit de la buse exprimé en gallons US/min à 3 bars (1 gallon US = 3,785 L/min).

Pour les buses à fente, les constructeurs adoptent souvent le mode de désignation suivant :

Marque	Type	Angle du jet	Code débit	Code couleur
--------	------	--------------	------------	--------------

Prenons l'exemple suivant : Albuz API 110 03 Bleu indique une buse à fente fabriquée par Albuz sous la dénomination API (Alumine frittée) angle de jet 110°, code débit 03, correspondant à 1,2 L/min à 3 bars et code couleur ISO bleu.

Afin de faciliter la compréhension du fonctionnement des buses, plusieurs exemples sont proposés :

– les figures **168** et **169** montrent l'influence de la pression sur le débit et sur l'angle du jet d'une buse à fente à 110°, de débit nominal 1,2 L/min (110 - 03),

– la figure **170** montre le principe d'un essai de répartition d'une buse sur un banc de répartition,

– la figure **171** montre les diagrammes comparés de répartition d'une buse à 80° (80 02) et d'une buse à 110° (110 03), placées à une hauteur de 0,50 m sur un banc à gouttières. La représentation graphique de la répartition transversale de la pulvérisation de buses isolées donne lieu à des formes assimilables à des triangles ou à des trapèzes. La largeur traitée par une buse se décompose, par rapport au pied de l'axe de la même buse, en deux parties droite et gauche. Lorsque la répartition est symétrique et régulière, le contenu des éprouvettes de la partie droite présente les mêmes niveaux de volumes que celles de la partie gauche. En pratique, même si la distribution des buses est satisfaisante, des variations de répartition peuvent être engendrées par des oscillations des rampes.

– la figure **172** montre l'influence de la pression sur le diagramme de distribution d'une buse 110 03 à une hauteur de 0,6 m. Dans ce cas précis, on constate que l'augmentation de pression, et donc de débit, s'accompagne d'un élargissement de la largeur du jet (surtout entre 1,5 et 3 bars) correspondant à un accroissement de l'angle de pulvérisation (fig. **169**) et d'une dissymétrie notable entre 3 et 5 bars.

Attention ! ces indications sont des exemples relevés en laboratoire, il convient donc de ne pas les généraliser en raison des nombreuses interactions des différents paramètres (hauteur de buse, niveau d'usure, pression, écart entre lots de buses...). Cette remarque justifie par ailleurs quatre conseils très importants pour parvenir à une précision de pulvérisation correcte :

- ne pas monter des buses de constructeurs ou de modèles différents sur une même rampe,
- ne pas monter des buses de débit nominal différent sur une même rampe,
- prendre toutes les précautions nécessaires pour ne pas altérer les caractéristiques des orifices des buses,

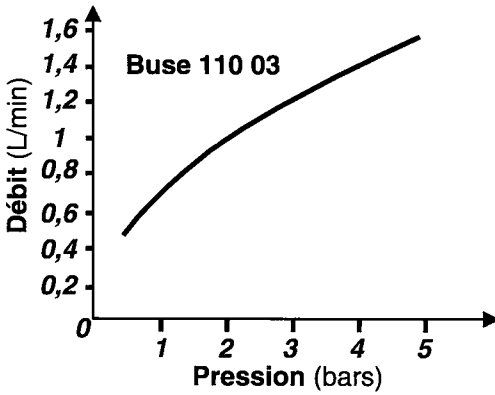


Fig. 168 - Influence de la pression sur le débit d'une buse à fente de 110° (source Cemagref)

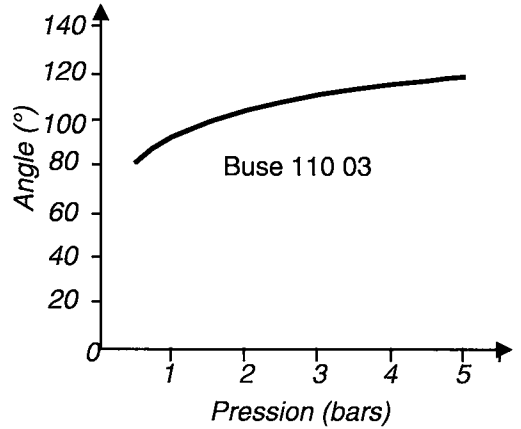


Fig. 169 - Influence de la pression sur l'angle du jet d'une buse à fente de 110°(source Cemagref)

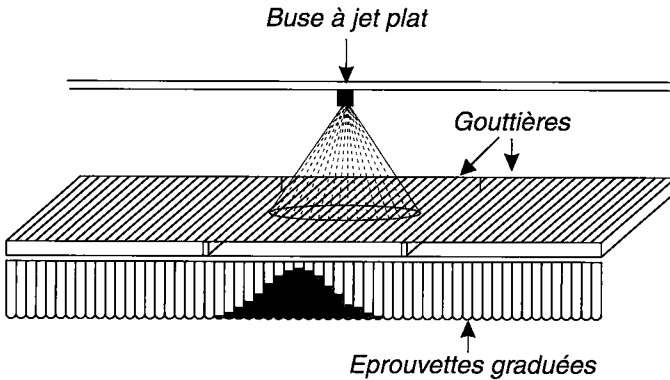


Fig. 170 - Essai de répartition d'une buse sur un banc de répartition

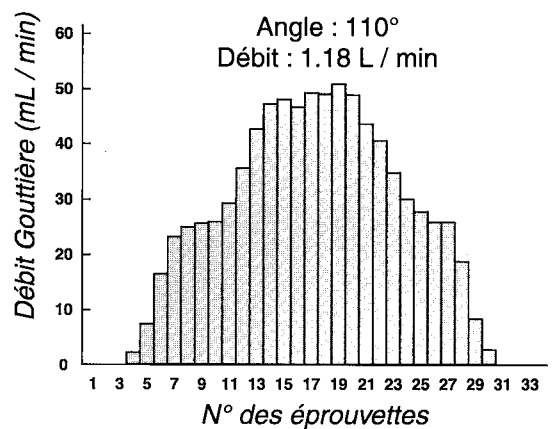
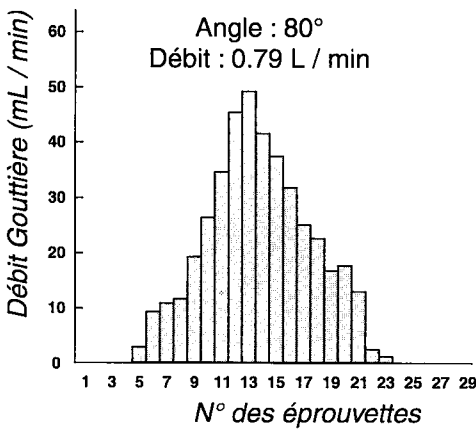


Fig. 171 - Exemple de diagrammes de répartition de buses à fente 80° et 110° relevés avec un banc de répartition (source Cemagref)

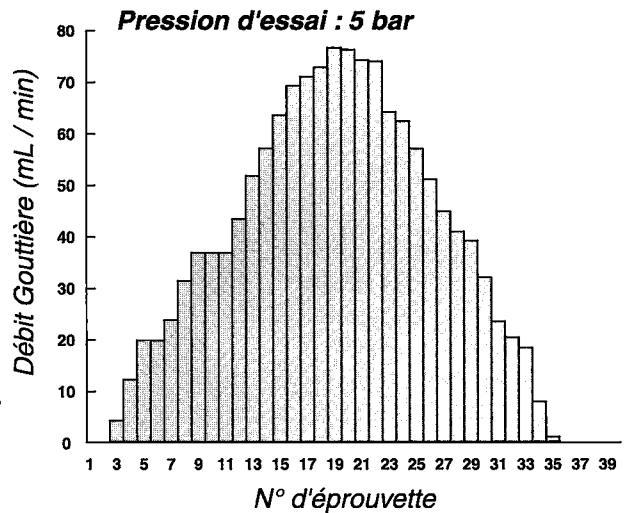
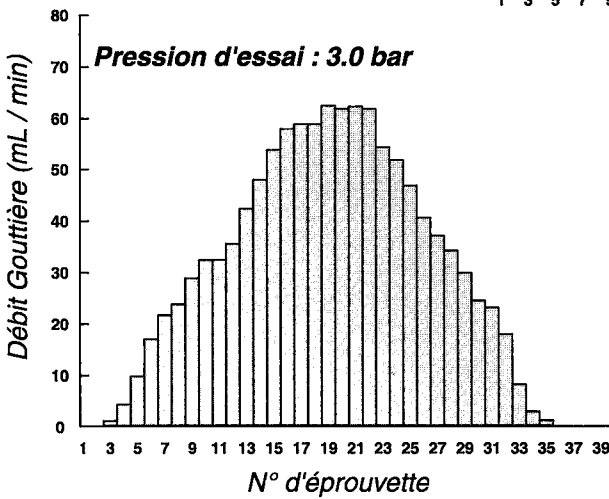
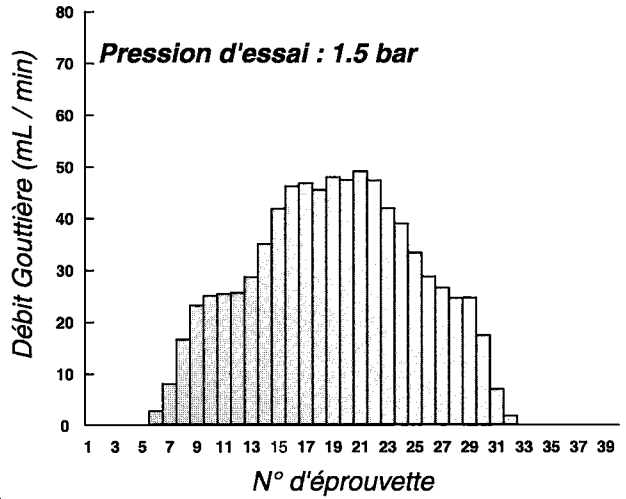


Fig. 172 - Exemples de diagrammes de répartition d'une buse à fente 110° en fonction de la pression (source Cemagref)

– procéder à des contrôles réguliers de débit et remplacer les buses avant que leur usure entraîne des perturbations préjudiciables pour la qualité des traitements et l'environnement.

Pour les buses ayant un débit nominal supérieur à 1 L/min, il faut les positionner avec un décalage d'environ 5° afin d'éviter la formation des grosses gouttes dans la zone de croisement des jets.

Les buses peuvent être protégées contre les bouchages par un **filtre** dont les mailles doivent être d'autant plus fines que la section de la fente est plus petite.

Les buses à 80° sont conseillées pour les faibles débits, car elles sont moins sensibles au bouchage par rapport au même calibre d'une buse à 110°. En revanche, pour les gros débits, il est conseillé d'utiliser des buses de 110° afin d'assurer un bon recouvrement des jets.

Dans les conditions normales de pression (de 1 à 4 bars), le **coefficient d'homogénéité CH** (VMD/NMD) des buses à fente se situe normalement entre 2 et 7. Pour une pression constante (3 bars par exemple), si l'on utilise des buses de débit croissant, le NMD, le VMD et le CH tendent à augmenter.

Les buses s'usent d'autant plus vite que :

- le matériau les constituant est plus sensible à l'abrasion,
- la pression est plus élevée,
- le pouvoir abrasif des particules en suspension est élevé,
- la concentration en particules est plus grande.

Un taux d'usure élevé se traduit par un accroissement de débit et un effet néfaste sur la structure des jets (répartition et finesse des gouttes).

Le **taux d'usure** (T_u) d'une buse peut être caractérisé par le rapport de son débit nominal (q_n) avec son débit réel (q_r) sous une pression et un liquide identiques : $T_u = q_r/q_n$, ce qui correspond aussi au rapport du débit de la buse usée avec le débit de la buse neuve ; l'usure d'une buse correspond en fait à une augmentation de son calibre.

Lors d'essais d'usure en laboratoire en conditions normalisées (selon la norme NF U-26.110 concordante avec ISO 5682/1), on constate des différences importantes selon la nature des matériaux ; prenons l'exemple avec des buses de matériaux différents au bout d'un test d'usure de 20 heures à 3 bars : on peut relever un accroissement de débit de 40 % ou plus avec un certain type d'acier Inox, de 10 à 20 % avec des buses en polyamide (selon le type de polyamide) et 5 % avec des buses en alumine frittée. L'alumine frittée, sous réserve d'une qualité adéquate, est de tous les matériaux le plus résistant, puisque l'augmentation de débit au bout de 100 heures de test d'abrasion en laboratoire est inférieure à 10 %.

L'évolution des buses à fente conduit à deux types de buses particulières : les **buses antidérive à fente** et les **buses à double fente**.

– les **buses antidérive à fente** ont été développées dans un souci de protection de l'environnement en réduisant la part des gouttes trop fines et les risques de dérive, notamment lors des traitements par vent modéré.

Leur principe consiste à placer immédiatement, en amont de la buse à fente (fig. 173), une **pastille** dont l'orifice calibré est déterminé en fonction du débit recherché (pour une pression donnée). La section de l'orifice calibré de la pastille étant légèrement plus faible que la section de la fente, il se produit une perte de charge d'environ 30 % en amont de la fente. Cette réduction de pression crée une pulvérisation avec un spectre dimensionnel décalé vers une grosseur de gouttes plus grande (fig. 174). La sensibilité au bouchage est réduite, ainsi que la production de gouttes fines.

Compte tenu du diamètre moyen de gouttes assez important, obtenu avec ces buses, leur usage convient aux applications qui ne nécessitent pas une couverture dense ; elles peuvent donc, dans certains cas, être déconseillées pour l'application de produits agissant par contact.

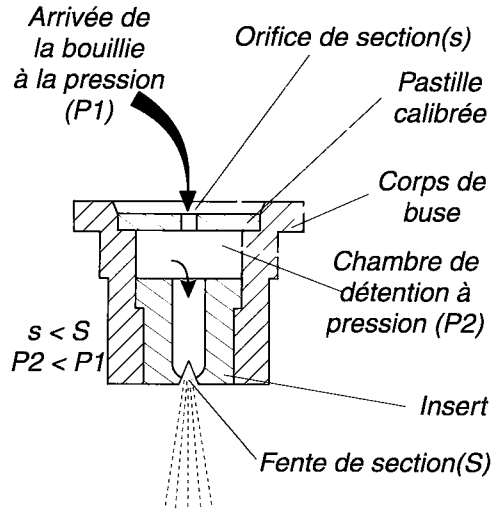


Fig 173 - Principe d'une buse à fente antidérive

– les **buses à double fente** comportent deux fentes parallèles. Elles sont utilisées lorsqu'on recherche une couverture très dense (application, par exemple, d'un fongicide sur céréale au stade épiaison). Ces buses, pour un débit donné (des deux jets), présentent des orifices plus petits qu'une buse classique et sont donc plus sensibles au bouchage.

• **Les buses à turbulence** (fig. 175) :

Les éléments caractéristiques d'une buse à turbulence sont l'**hélice**, la **chambre de turbulence** et la **pastille à orifice calibré**.

Calibre de buse à 3 bars	Pression	VMD Buse de travail	VMD Buse normale	Rapport antidérive
0,61	1,5	184	255	1,4
0,61	3	139	209	1,5
1,7	1,5	276	330	1,2
1,7	3	221	297	1,3

Fig. 174 - Comparaison du VMD des gouttes pulvérisées entre une buse à fente normale et une buse antidérive de calibres différents (source Albu)

L'hélice est le dispositif principal d'une buse à turbulence ; ses caractéristiques géométriques et ses dimensions déterminent la physionomie du jet de pulvérisation. Cette hélice, constituée de **canaux tangentiels**, met le liquide en rotation avant son arrivée dans la chambre de turbulence et permet ainsi de transformer l'énergie de pression en énergie cinétique. Les hélices sont le plus souvent en résine de synthèse ou en alumine frittée.

La **chambre de turbulence** est une capacité qui définit le type de buse ; elle peut avoir la forme d'un cylindre, d'un cône ou d'un tronc de cône. Elle est très souvent associée à l'hélice ; parfois, elle est formée par un tube très court, amovible et indépendant.

Les **pastilles** sont des disques interchangeables portant un orifice central calibré dont le diamètre varie de 8/10 à 25/10 de mm ou plus. L'utilisation des calibres inférieurs à 10/10, ne peut pas être étendue aux bouillies en suspension en raison des bouchages qui sont alors inévitables. Souvent, les pastilles sont en acier inoxydable mince (quelque 1/10 de mm) ; l'usinage de l'orifice doit être aussi parfait que possible pour éviter la déformation du jet et du spectre de la pulvérisation. L'usure des pastilles en Inox est assez rapide, mais leur faible coût permet un remplacement fréquent. Il existe aussi des pastilles en céramique (alumine frittée), en alliage de tungstène ou en saphir.

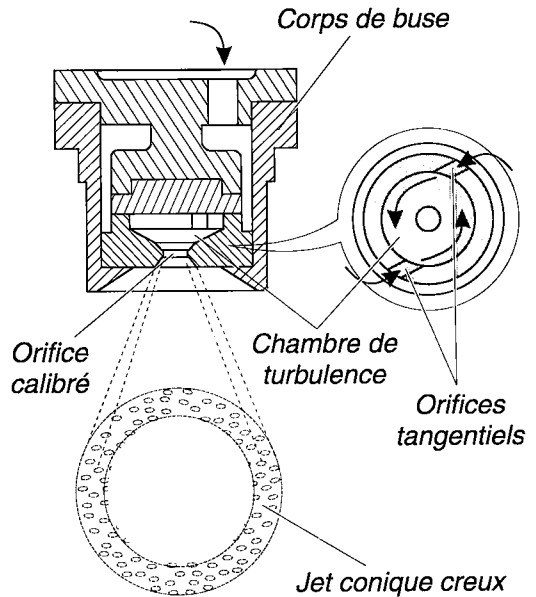


Fig. 175 - Principe d'une buse à turbulence

Sous une pression basse (de 1 à 2 bars, selon le diamètre de la pastille), après avoir été mis en rotation par l'hélice, le liquide tourbillonne dans la chambre, sort par l'orifice sous forme d'un cône liquide mince et continu qui se fragmente au contact de l'air ambiant. L'angle du cône varie de 20 à 100° en fonction du diamètre de l'orifice de la pastille, de l'épaisseur de celle-ci, du nombre et de la géométrie des canaux de l'hélice, du volume de la chambre de turbulence et de la pression de liquide.

Suivant le degré d'ouverture du jet, ce dernier est plein ou creux et donne lieu à une projection sur le plan horizontal d'une trace circulaire ou annulaire.

La **hauteur de la chambre de turbulence** est une caractéristique fondamentale puisqu'elle permet d'obtenir un jet étroit (jet bâton) ou un jet conique, suivant que la hauteur de la chambre est grande ou faible. Cette particularité a donné lieu à la fabrication de buses à jet réglable (fig. 176), notamment pour l'équipement des appareils portatifs. Le réglage du jet permet d'obtenir à volonté un jet conique d'angle et de débit variables, par modification du volume de la chambre de turbulence.

Le coefficient de débit d'une buse à turbulence varie sensiblement avec les caractéristiques de l'hélice, de la chambre de turbulence et de la pastille, ainsi que des propriétés physiques du liquide (viscosité, densité...) :

- pour un type de jet conique, le coefficient de débit est proche de 0,2,
- pour des petits diamètres de pastille et des canaux d'hélice à faible section, le coefficient est compris entre 0,40 et 0,62,
- pour des diamètres d'orifices et des canaux d'hélice plus grands, il peut osciller entre 0,2 et 0,52.

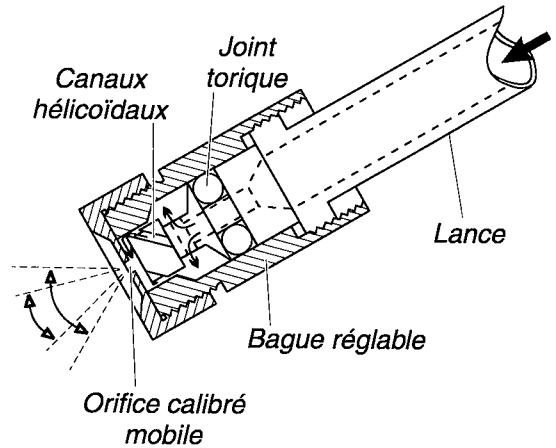


Fig. 176 - Principe d'une buse à turbulence à jet réglable

Les pulvérisations obtenues avec des buses à turbulence sont formées de populations de gouttes moyennes ou fines, dont le diamètre de Sauter (d_{vs}) s'échelonne de 70 à 400 μm . Les pulvérisations sont d'autant plus fines que les pastilles sont de petit calibre et que la pression est forte. Plus la pression est faible, plus le diamètre de Sauter des gouttes augmente.

L'analyse des jets de buses à turbulence conduit aux remarques suivantes :

- dans le cas de jets creux, on obtient une couronne conique formée de gouttelettes assez grosses et, au milieu, des gouttes fines ;
- on observe un effet d'entraînement des petites gouttes par la masse d'air mise en mouvement par la couronne de grosses gouttes ;
- dans un jet conique plein, on peut remarquer qu'il n'y a pas une répartition uniforme des gouttes dans le jet.

Dans la pratique, et pour un appareil donné, on obtient les débits nécessaires en faisant varier les diamètres des pastilles et les pressions. Afin d'éviter les risques de bouchage, on utilise de préférence des pastilles d'au moins 10/10 de mm. Selon le diamètre des pastilles, les buses à turbulence peuvent fournir des débits compris entre 0,4 et 6 L/min, ou plus, sous des pressions de 3 à 6 bars ; des valeurs plus élevées de pression peuvent être utilisées pour des traitements fongicides (10 bars par exemple) ou en arboriculture pour atteindre la cime des arbres (de 20 à 40 bars).

Les buses à turbulence sont, en général, employées sur une végétation développée pour les traitements anticryptogamiques et insecticides sur vignes ou vergers avec des pulvérisateurs à pression à jet porté, soit en cultures basses pour les applications d'insecticides avec des pulvérisateurs à pression à jet projeté. Leur emploi n'est pas indiqué pour les traitements herbicides, car la pulvérisation obtenue comporte une fraction notable de gouttes très fines sensibles au vent, même léger, et dangereuses pour les cultures avoisinantes.

• **Les buses à miroir (fig. 177) :**

Les buses à miroir sont constituées d'un orifice calibré horizontal et axial situé face à une surface courbe parfaitement polie, appelée « miroir ». En sortant de l'orifice calibré, la veine moulée de liquide s'étale sur la base du miroir suivant un angle très grand dont la valeur est fonction de la distance et de l'inclinaison du miroir ainsi que de la pression du liquide. L'axe de la conduite étant horizontal et le miroir incliné vers le sol, l'étalement de la veine de liquide donne lieu à une pulvérisation dont la trajectoire rappelle un éventail, d'où l'appellation parfois de jet en éventail.

Les buses à miroir sont caractérisées par une très grande ouverture de l'angle de pulvérisation qui peut atteindre 150°. Des espacements de l'ordre de 1,20 m sont alors possibles pour des hauteurs de rampe de 0,40 à 0,50 m. Ces valeurs peuvent être intéressantes pour les bas volumes par hectare.

Elles sont réalisées en acier inoxydable, en alumine frittée ou en résine de synthèse. Leur utilisation concerne surtout l'épandage des fluides visqueux ou des solutions avec des suspensions.

Le jet des buses à miroir présente une sensibilité au vent plus grande que les buses à fente car son épaisseur est plus faible et il comporte, à la sortie du miroir, un voile représentant une surface liquide non fragmentée relativement importante.

Il est indispensable que les axes de symétrie des jets soient parfaitement parallèles et se trouvent sur les mêmes plans verticaux passant par les axes des buses. Lors du calage de la position des buses, prendre soin de ne pas détériorer la surface et les arêtes du miroir.

Les débits fournis par les buses à miroir, sous des pressions de 1 à 2 bars, varient de 0,5 à 4-5 L/min. Le coefficient de débit est proche de 1 car l'écoulement ne rencontre pratiquement pas de restriction.

Les buses à miroir donnent lieu à une pulvérisation dont les diamètres de Sauter sont compris entre 400 et 800 μm . Les valeurs les plus faibles sont obtenues avec les petits calibres et des pressions relativement élevées (de 2 à 3 bars).

L'utilisation des buses à miroir requiert un support particulier entre le porte-buse et la rampe afin de permettre le positionnement horizontal de la buse, à 90° par rapport à la position des buses à fente ou à turbulence.

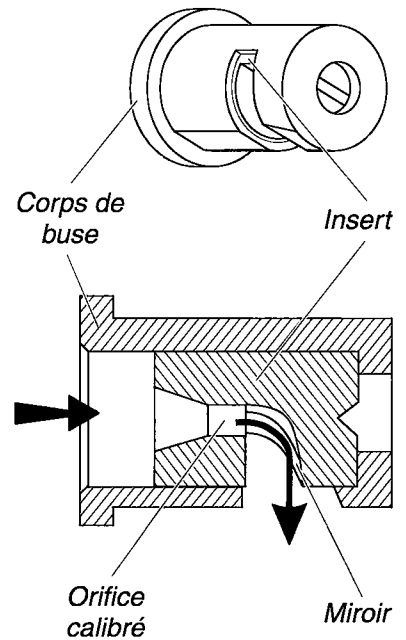


Fig. 177 - **Principe d'une buse à miroir**

• **Les buses bifluide à aspiration d'air (fig. 178) :**

Ce type de buse a été développé récemment afin d'améliorer la couverture des pulvérisations sur les végétaux sans accroître les risques d'accentuation de la dérive des fines gouttelettes. Leur principe consiste à charger le jet de bouillie de bulles d'air afin d'accroître la taille des gouttes et de multiplier le nombre d'impacts sur la cible par dislocation des bulles. Parmi les dispositifs proposés par les constructeurs, citons le concept de buse TurboDrop de la société *Céramiques Techniques Desmarquest*. Cette buse comprend, d'amont en aval, trois éléments principaux :

- une pastille à orifice calibré,
- un corps de mélange muni d'une entrée d'air atmosphérique et d'un canal axial de mélange,
- une buse de sortie.

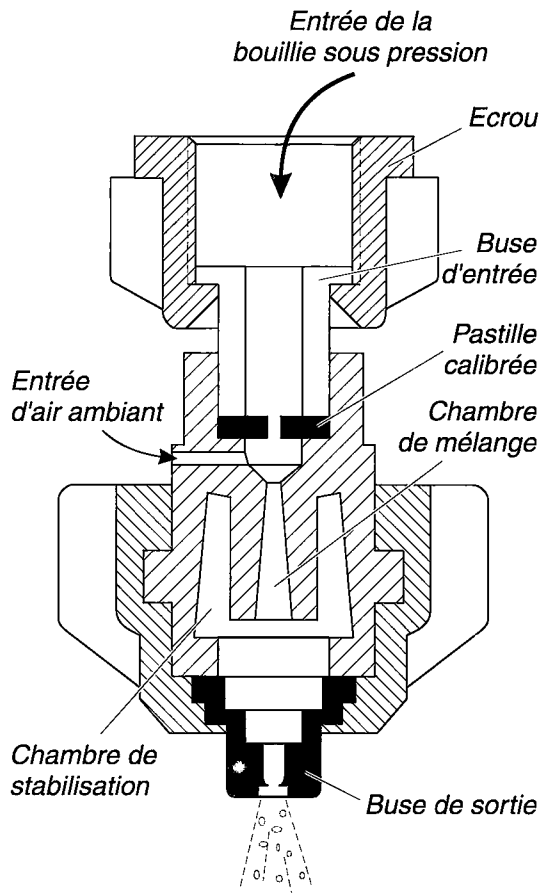


Fig. 178 - **Schéma d'une buse bifluide à aspiration d'air Albuz TurboDrop**
(d'après document Albuz)

Le fonctionnement de l'ensemble peut se résumer de la manière suivante : à sa sortie de l'orifice calibré, le jet de bouillie crée une dépression à l'entrée du corps de mélange, au niveau de l'orifice radial d'entrée d'air ; l'air aspiré par cette dépression est alors emprisonné sous forme de bulles dans la veine liquide. Ce mélange est ensuite expulsé vers la cible au travers de la buse de sortie.

Les caractéristiques de la pulvérisation peuvent être modifiées en changeant le calibre de la pastille et la pression de liquide.

Les buses bifluide à air aspiré sont développées pour répondre à des conditions précises de traitement avec une pression de rampe plus élevée (de 4 à 5 bars par exemple) qu'avec des buses classiques. Leur emploi doit donc s'effectuer dans le respect des instructions du fabricant et des structures de conseil.

• **Les buses bifluide à air comprimé (fig. 179) :**

Ce type de buse applique le procédé Airtec® développé au Royaume-Uni en 1989. Il s'agit d'une buse à miroir précédée d'une chambre d'insufflation dans laquelle se mélange l'air sous pression venant d'un circuit pneumatique alimenté par un compresseur, avec le jet liquide sous pression provenant du circuit de bouillie du pulvérisateur. L'insufflation d'air dans le jet de bouillie produit des gouttes en forme de **bulles de liquide chargées d'air** ; ces gouttes sont ensuite projetées et réparties par le miroir de la buse vers la végétation.

Les buses bifluide à air comprimé présentent les propriétés suivantes :

- possibilité de **réglage de la grosseur des gouttes** en modifiant séparément la pression de l'air insufflé et la pression de la bouillie,
- lors de l'impact des gouttes chargées d'air avec le feuillage, celles-ci éclatent en multipliant le nombre de points de contact de la bouillie avec la surface végétale.

Ce type de buse permet d'appliquer des bas volumes/hectare tout en conservant une dimension suffi-

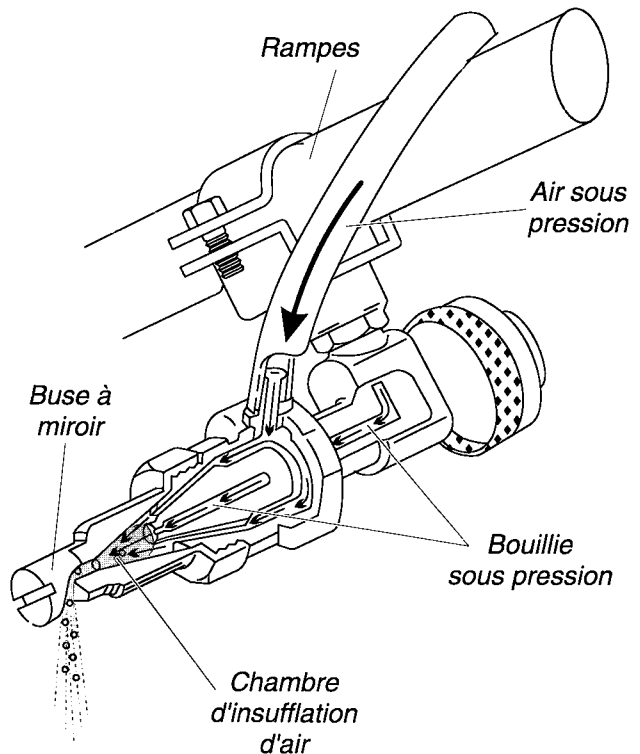


Fig. 179 - **Principe d'une buse bifluide à air comprimé Airtec**
(d'après document Airtec-Blanchard)

sante des gouttes avec moins de risques de bouchage des buses. Bien entendu, ces avantages s'accompagnent en contrepartie d'un coût plus élevé du matériel : buses spéciales, circuit d'air comprimé, compresseur...

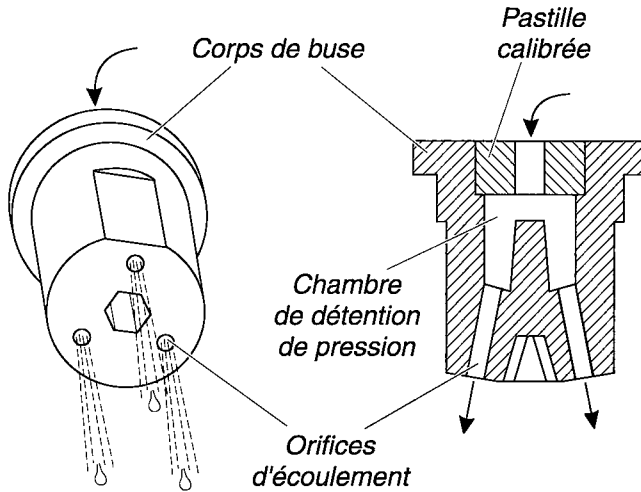


Fig. 180 - Principe d'une buse à filets

• **Les buses à filets** (fig. 180) :

Ces buses sont utilisées pour l'épandage d'engrais liquides azotés en couverture sur céréales en raison de leur faible fragmentation du liquide, favorable à l'application des engrais azotés sans risques de nécroses (brûlures) sur les feuilles pourvu que la pression d'utilisation se situe à une valeur suffisamment faible pour éviter la formation de gouttes fines.

La fragmentation des filets liquides s'effectue simplement au contact de l'air ambiant au cours de leur trajet vertical.

Ces buses se montent sur les mêmes porte-buses que les autres buses. Le réglage du débit se fait par ajustement de la pression et par pastilles calibrées interchangeables s'intercalant entre la collerette et le corps de buse.

• **Les buses centrifuges** (fig. 181) :

Les **buses centrifuges**, aussi appelées « **buses rotatives** », peuvent remplacer dans certains cas des buses à pression de liquide, notamment sur des rampes pour cultures basses.

Pour comprendre le principe de la pulvérisation centrifuge, examinons le comportement d'un jet liquide lorsqu'il parvient au centre d'un disque rotatif : au contact du disque, le liquide s'étale sur toute sa surface en un mince film qui, lorsqu'il parvient à la périphérie du disque, est soumis à différentes forces qui conduisent à la fragmentation du film liquide en gouttelet-

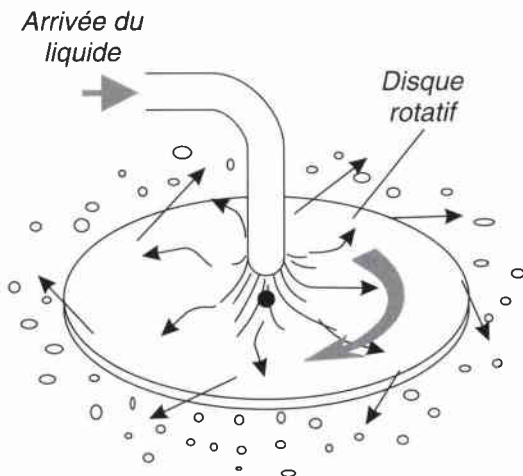


Fig. 181 - Principe d'une buse centrifuge

tes. Ce processus de fragmentation peut être expliqué en observant trois stades caractéristiques liés à la variation de débit :

– **pour un faible débit**, on obtient à la périphérie du disque en rotation une couronne de liquide qui est le siège de légères perturbations locales qui provoquent une fragmentation et donnent naissance à des gouttes. A ce stade, on obtient la **formation directe de gouttes** ;

– **pour un débit plus élevé**, des **ligaments** se forment à des intervalles de distance réguliers à partir de la couronne de liquide. Ces ligaments, instables, se désintègrent à une certaine distance en donnant des gouttes qui partent tangentiellement à la circonférence du disque. A ce stade, **la formation des gouttes est consécutive à la formation de filaments liquides** ;

– **pour un débit encore plus élevé**, on observe la création d'un **film de liquide** en forme d'anneau non interrompu qui s'étend au-delà de la périphérie du disque et se fragmente de façon irrégulière. Les gouttes produites sont alors plus hétérogènes que dans les deux cas précédents.

Si la périphérie du disque est dentelée, le nombre de ligaments est contrôlé par la dentelure et le phénomène de fragmentation est stable pour des débits plus élevés.

La pulvérisation centrifuge donne généralement une meilleure homogénéité que les buses à pression. Le VMD est généralement compris entre 100 et 200 μm . Le coefficient d'homogénéité CH est compris entre 1,2 et 1,6.

La pulvérisation centrifuge est d'autant plus fine que :

- le diamètre du disque est grand,
- la vitesse de rotation est élevée,
- le débit de liquide est faible,
- la tension superficielle du liquide est faible.

L'avantage de ce type de pulvérisation est de permettre le réglage de la finesse des gouttes, indépendamment du débit de liquide. En effet, l'utilisateur peut fixer un débit afin de satisfaire le critère de volume/hectare, en choisissant le calibre du conduit d'amenée de la bouillie et/ou en modifiant la pression de travail, et faire varier la grosseur des gouttes en modifiant la vitesse de rotation du disque.

L'inconvénient de la pulvérisation centrifuge est lié à son avantage : la finesse des gouttes rend la pulvérisation très sensible au vent.

Parmi les différents dispositifs de pulvérisation centrifuge, examinons le système **Girojet** de Tecnomat (fig. 182 et 183) qui comprend :

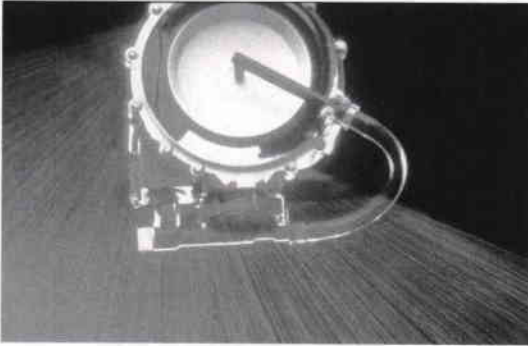


Fig. 182 - Vue du système de buse centrifuge Girojet de Tecnomat (photo Tecnomat)

- un disque concave à axe horizontal de grand diamètre (145 mm) à bordure dentelée,
- un tube d'alimentation avec un gicleur débouchant au centre du disque,
- un moteur électrique de 8 W,
- un carter déflecteur angulaire qui délimite l'angle de pulvérisation à 140° et qui collecte sur 220° la partie supérieure du secteur de pulvérisation et la renvoie en cuve,
- une pompe ou un hydro-injecteur de retour permet de faire recirculer le liquide recueilli par le déflecteur (60 % environ).

L'alimentation s'effectue à faible pression (de 1 à 4 bars environ) par l'intermédiaire d'une électrovanne ; le réglage du débit est obtenu par l'emploi de pastilles calibrées et par la variation de la pression.

Grâce à une commande électrique par rhéostat, la vitesse de rotation du disque est réglable de 800 à 1 700 tr/min pour obtenir une finesse des gouttes pouvant varier de 50 à 500 μm . Les gouttes formées se déplacent suivant des trajectoires tangentielles. Pour une pulvérisation à partir de rampes horizontales, le grand angle de pulvérisation (140°) permet un entraxe des disques de 1,50 m et une hauteur de rampe de l'ordre de 60 cm ; dans ce cas, une buse centrifuge permet de remplacer trois buses à fente espacées de 0,50 m.

Il existe aussi des **buses centrifuges à cage rotative** (cylindre creux à fentes parallèles ou à mailles fines) associées à des hélices et entraînées par un moteur hydraulique ou un moteur électrique. La fragmentation des gouttelettes est réalisée par la force centrifuge et leur transport par le courant d'air de l'hélice ; ces diffuseurs ou ses buses rotatives sont donc **centrifuges à jet porté**.

Les traitements par avion peuvent faire appel à des diffuseurs centrifuges. Le principe de division du liquide est le même que pour les pulvérisateurs centrifuges « terrestres » à jet projeté.

La pulvérisation est réalisée au moyen de buses rotatives et de pompes, entraînées par hélices grâce au courant d'air dû à la vitesse d'avancement de l'avion (fig. 184). Un équipement complet peut comporter par exemple de quatre à huit buses rotatives, c'est-à-dire deux ou quatre par aile dans le cas d'avions monomoteurs.

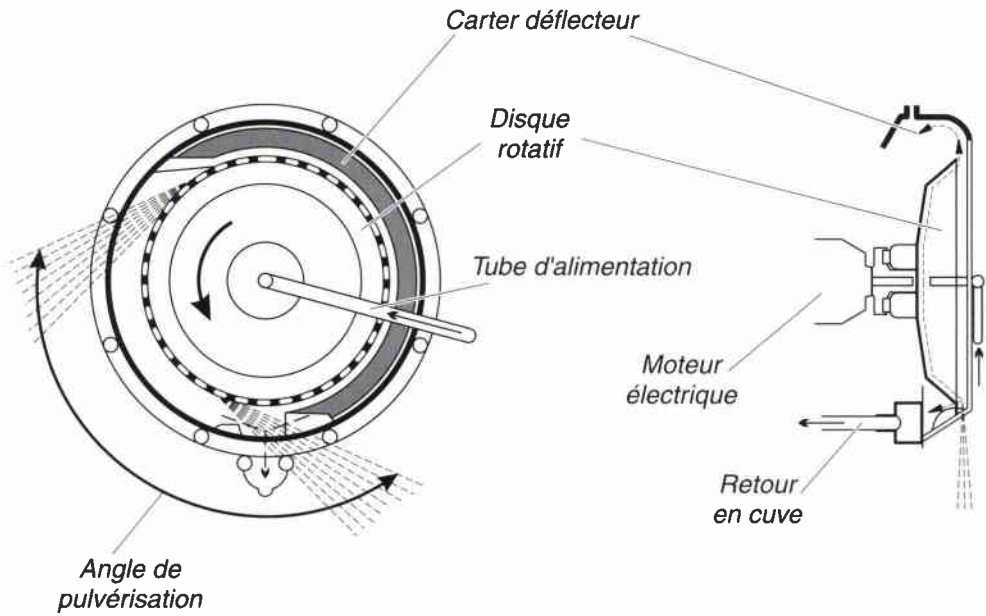


Fig. 183 - Schéma du système de buse centrifuge Girojet de Tecnomat (d'après document Tecnomat)

Ces buses sont constituées de disques, de broses ou, plus souvent, de cages cylindriques coaxiales en treillis métallique montées sur le même axe d'entraînement. Sous une pression d'environ 3 bars, le liquide parvient dans l'axe de rotation d'où il est projeté par la force centrifuge. Le pas réglable des hélices d'entraînement des buses permet de régler le débit en fonction de la vitesse d'avancement et donc du régime de rotation des buses. La pulvérisation est d'autant plus fine que le régime de rotation est plus élevé et le débit plus faible. Les buses centrifuges sont fixées sous l'intrados à une certaine distance du plan d'aile ou sur l'extrados à proximité des bords de fuite. On leur associe des systèmes de freinage hydraulique ou mécanique permettant l'arrêt des hélices pendant le vol.

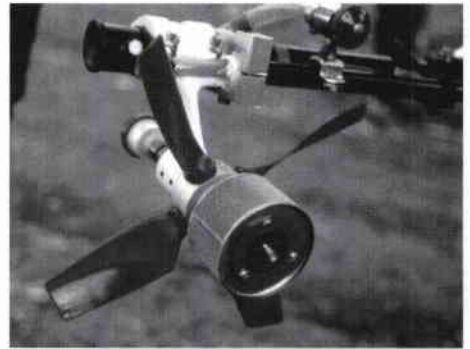


Fig. 184 - Vue d'une buse centrifuge (photo Cemagref)

• **Les buses pneumatiques par détente d'air sous pression :**

Ce mode de fragmentation utilisé de manière expérimentale en pulvérisation agricole est très répandu dans l'industrie. L'application la plus connue est celle du pistolet à peinture. Le liquide est acheminé par un gicleur, sous une pression de 0,2 à 0,3 bar. Une enveloppe d'air entoure le jet et se comporte comme une tuyère, avec une fragmentation du jet de liquide. La finesse des gouttes peut être réglée en agissant sur la pression d'air.

Typologie des pulvérisateurs pour cultures basses	243
– Les organes principaux des pulvérisateurs	243
– Les modes d'attelage et de déplacement des pulvérisateurs	243
– Les différents circuits de bouillie	246
– Les cuves des pulvérisateurs	248
– Les filtres	250
– L'incorporateur	250
Les pompes	252
– Les pompes volumétriques	252
– Les pompes centrifuges	259
La distribution	261
– Les vannes à commande manuelle	262
– Les électrovannes	263
– Les vannes motorisées	265
La régulation de pression	266
– La régulation à pression constante	267
– La régulation à débit proportionnel au régime moteur (DPM)	271
– La régulation à débit proportionnel à l'avancement (DPA)	275
– Les systèmes à régulation électronique	279
– Les principaux capteurs utilisés sur les pulvérisateurs	282
Les rampes	287
– Les différentes structures de rampes	287
– Les dispositifs de réglage de la hauteur des rampes	290
– Les dispositifs de stabilisation des rampes	291
– Le repliage des rampes	294
– Les canalisations et les porte-buses	295

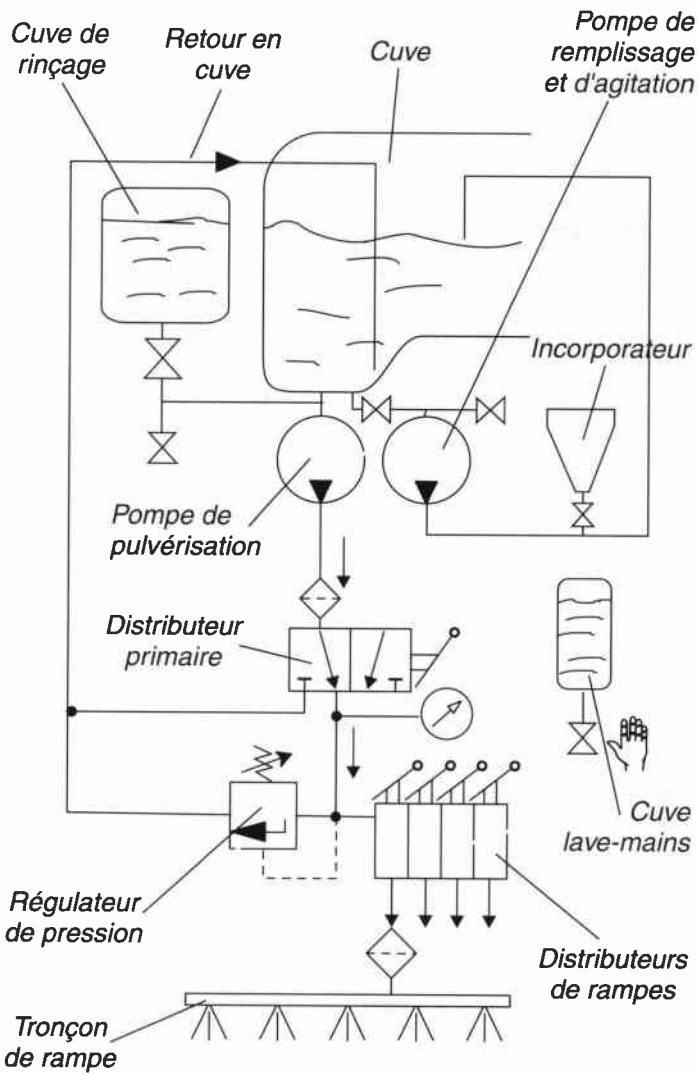


Fig. 185 - Schéma de principe d'un pulvérisateur classique

TYOLOGIE DES PULVÉRISATEURS POUR CULTURES BASSES

Les pulvérisateurs pour cultures basses sont des appareils de traitement à rampes horizontales. Leur mode de pulvérisation est généralement du type à pression de liquide à jet projeté.

La pulvérisation est le plus fréquemment assurée par des buses à fente montées seules ou sur un support porte-buses (fig. 186) à trois, à quatre ou à cinq positions, permettant l'emploi de buses de calibres ou de types différents sans démontage.

Selon les traitements, les rampes peuvent être équipées d'autres types de buses : à turbulence, à miroir, à filets ou, pour les applications à très bas volume, de buses ou de systèmes de pulvérisation centrifuge... (se reporter au chapitre 7 à la partie consacrée aux : « différents types de buses de pulvérisation »).

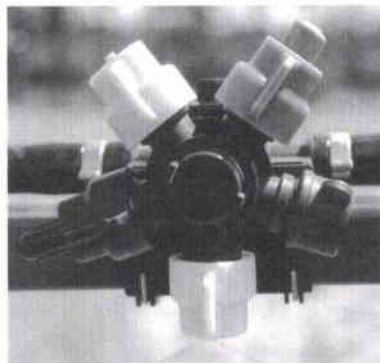


Fig. 186 - Porte-buses positionnable à cinq positions (photo Cemagref)

• LES ORGANES PRINCIPAUX DES PULVÉRISATEURS

Les pulvérisateurs sont constitués par l'association de différents organes et composants ; la configuration la plus courante comprend les éléments suivants (fig. 185) :

- une cuve principale,
- une pompe de pulvérisation,
- une pompe de remplissage et d'agitation,
- un régulateur de pression,
- des distributeurs,
- les rampes avec leur système de suspension et de positionnement,
- les filtres,
- un incorporateur,
- une cuve de rinçage,
- une cuve lave-mains.

Ces différents éléments, décrits dans les paragraphes suivants, peuvent être de conception différente selon le type d'appareil.

Outre leurs équipements de pulvérisation proprement dits, les pulvérisateurs se distinguent essentiellement par :

- leur mode d'attelage ou de déplacement,
- leur capacité de cuve (autonomie),
- le type de circuit de bouillie,
- leur mode de régulation,
- la largeur de rampes.

• LES MODES D'ATTELAGE ET DE DÉPLACEMENT DES PULVÉRISATEURS

Les pulvérisateurs peuvent être portés, traînés, automoteurs. Dans certains cas, les constructeurs proposent des pulvérisateurs configurés pour être intégrés à des tracteurs porte-outils.

• Les pulvérisateurs portés (fig. 187) :

Ces pulvérisateurs sont très couramment utilisés dans les petites et moyennes exploitations. Leur capacité de cuve varie de 200 à 1 500 litres pour des largeurs de rampes de 9, 12, 15, 16, 18, 20, 21 ou 24 mètres.

• Les pulvérisateurs traînés (fig. 188 et 189) :

Les pulvérisateurs traînés sont surtout utilisés dans les exploitations de moyennes et grandes superficies. Leur capacité de cuve varie de 800 à 3 000 litres pour des largeurs de rampes de 12, 15, 16, 18, 20, 21, 24, 28, 30, 36, voire 42 mètres.



Fig. 188 - Vue d'un pulvérisateur traîné
(photo Tecnomà)



Fig. 187 - Vue d'un pulvérisateur porté
(photo Berthoud)

Afin de réduire les dégradations des sols ou des cultures lors des virages et des demi-tours, les constructeurs proposent des timons articulés qui permettent de « superposer » les traces des roues du pulvérisateur avec celles du tracteur.

• Les pulvérisateurs automoteurs (fig. 190) :

Les pulvérisateurs automoteurs sont surtout utilisés de manière individuelle dans les exploitations de grande surface ou de manière collective par les entrepreneurs ou par des CUMA. Leur capacité de cuve varie de 1 500 à 4 000 litres pour des largeurs de rampes de 12, 15, 16, 18, 20, 21, 24, 28, 30 36, voire 42 mètres.

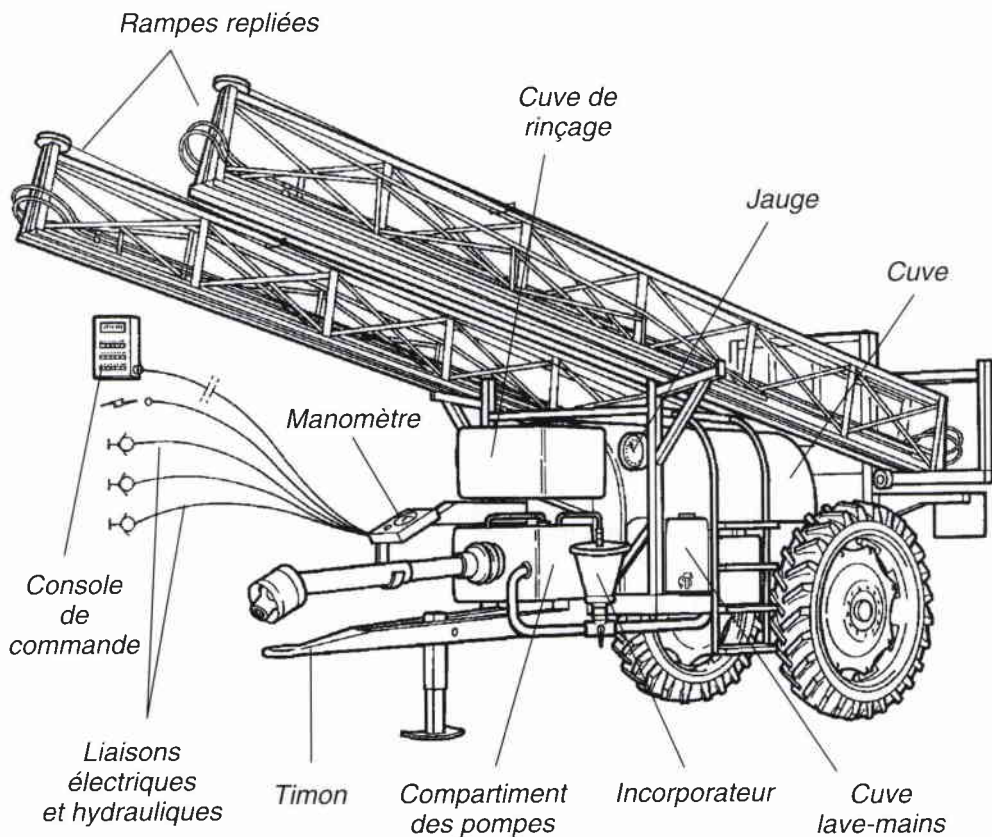


Fig. 189 - Schéma d'un pulvérisateur traîné



Fig. 190 - Vue d'un pulvérisateur automoteur
(photo Tecnomat)

• LES DIFFÉRENTS CIRCUITS DE BOUILLIE

Chaque type de pulvérisateur a été conçu selon un schéma déterminé de circulation de la bouillie ; les trois schémas pouvant être utilisés sont **les pulvérisateurs à circulation classique ou discontinue**, **les pulvérisateurs à circulation semi-continue** et **les pulvérisateurs à circulation continue**.

• La circulation classique (ou discontinue) :

Ce schéma classique est le plus répandu (fig. 191). Seule la fraction du débit de la pompe, correspondant au débit de pulvérisation, circule vers les buses. La régulation de pression et la distribution du liquide sont réalisées en amont des rampes ; le liquide dirigé dans les conduites des rampes ne peut s'écouler que par les buses. Toute coupure de la pulvérisation commandée sur un tronçon de rampe entraîne l'immobilisation du liquide dans les conduites correspondantes. Ce type d'installation présente l'avantage de simplifier le réseau de conduites. Généralement, chaque tronçon de rampe est alimenté au milieu.

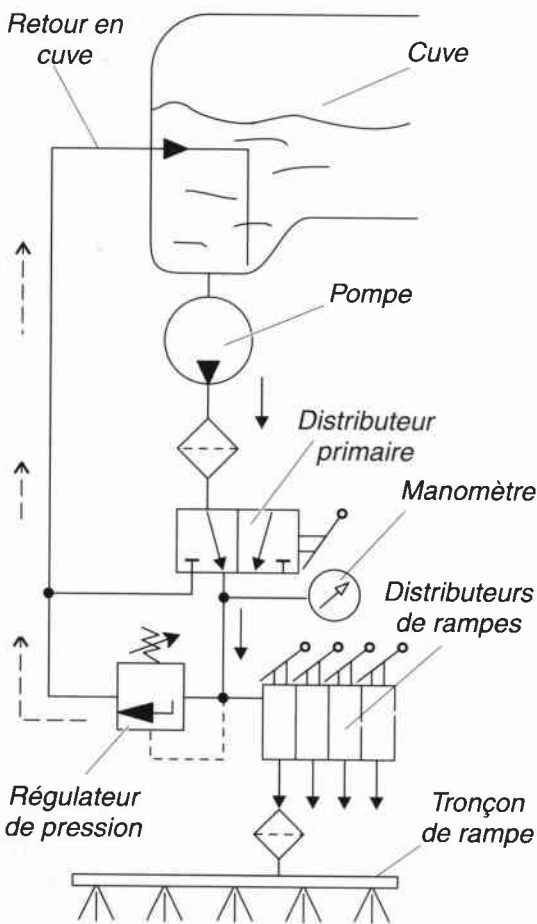


Fig. 191 - Principe des circuits d'un pulvérisateur à circulation classique de la bouillie

• La circulation semi-continue (fig. 192) :

La circulation semi-continue comprend une conduite aller et une conduite de retour pour chaque tronçon de rampe. La distribution s'effectue en amont des rampes et la régulation de pression s'effectue en amont et sur le retour des rampes.

Le débit de bouillie dans les rampes est plus élevé que le débit à pulvériser et circule en continu, seulement pendant la pulvérisation, d'où l'appellation de « circulation semi-continue ». Cette disposition limite les risques de sédimentation dans les conduites et le bouchage des buses, particulièrement lorsque le débit du pulvérisateur est faible et lorsque le produit à appliquer est chargé en particules non solubilisées. L'alimentation des tronçons s'effectue en série, d'une extrémité à l'autre.

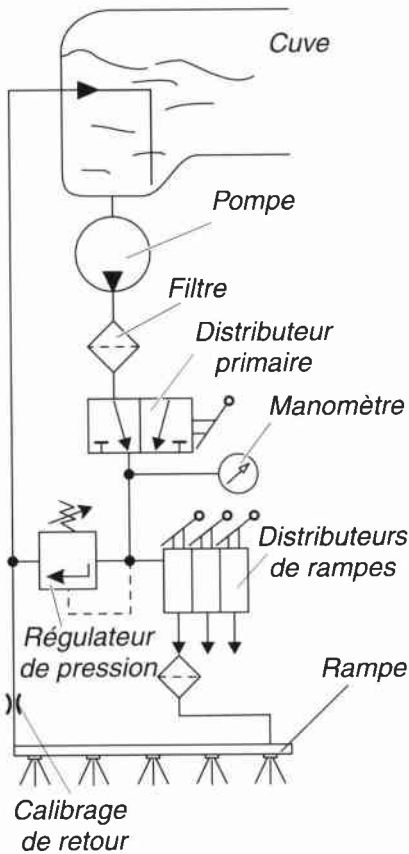


Fig. 192 - Principe des circuits d'un pulvérisateur à circulation semi-continue de la bouillie

tée par un circuit d'air comprimé (ou, le cas échéant, par une commande électromagnétique). Ce mode de distribution permet une circulation continue de la bouillie dans les conduites, que la pulvérisation soit établie ou coupée. La régulation de pression est assurée en aval et sur le retour des rampes. Cette disposition, plus coûteuse que les précédentes, présente néanmoins plusieurs avantages : réduction importante des risques de sédimentation (dépôts), maintien de l'homogénéité de la

• La circulation continue (fig. 193) :

La circulation continue comprend, d'une part, une conduite aller et une conduite de retour pour chaque tronçon de rampe et, d'autre part, une commande de pulvérisation multipoints, c'est-à-dire que l'ouverture et la fermeture de la pulvérisation s'effectuent au niveau de chaque buse grâce à un porte-buses à ouverture pilo-

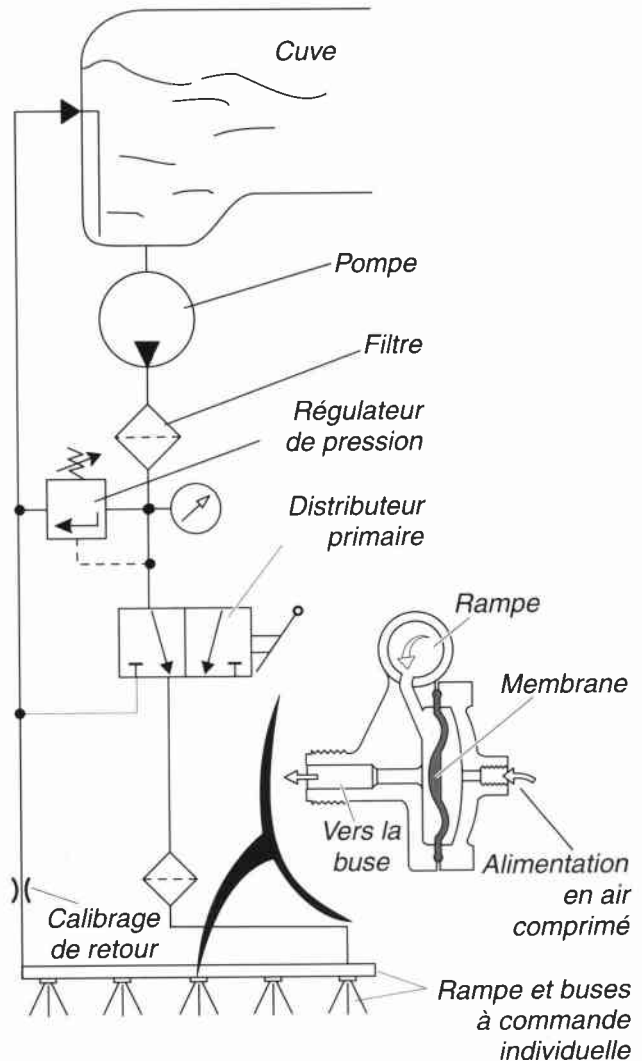


Fig. 193 - Principe des circuits d'un pulvérisateur à circulation continue de la bouillie

bouillie pendant les traitements, début de pulvérisation instantané sans délai de mise en pression. Précisons toutefois que, avec ce type de circulation, les conduites étant sous pression en permanence, il convient de veiller au bon état de celles-ci et à l'étanchéité des circuits. L'alimentation des tronçons s'effectue en série, d'une extrémité à l'autre.

• LES CUVES DES PULVÉRISATEURS

Les pulvérisateurs sont des matériels dont la conception nécessite des choix complexes d'intégration de tous les éléments afin d'optimiser l'encombrement, les longueurs de tuyauteries, le positionnement des composants et leur fixation (pompes, distributeurs...). Cette intégration nécessite souvent la fabrication d'un type de cuve spécifique pour chaque modèle de matériel dont les capacités varient de 200 à 3 000 litres. La capacité des cuves dépend des conditions moyennes de portance des sols ou, pour les appareils portés, de la capacité de relevage du tracteur et de la surface exploitable.

Les cuves étant amenées à contenir des produits chimiques de nature différente, leur forme doit être étudiée pour faciliter leur vidange totale et leur rinçage (absence d'arêtes ou de coins étroits), et leur construction doit être réalisée avec des matériaux résistant aux agressions chimiques, au rayonnement solaire, aux vibrations et aux chocs. Le matériau le plus souvent utilisé est le polyéthylène haute densité rotomoulé ou soufflé. Le polyéthylène a l'avantage de présenter des parois lisses peu adhérentes aux dépôts de produits et faciles à rincer. En cas de perforation accidentelle, leur réparation nécessite une intervention assez délicate par thermosoudage. Il existe aussi des cuves en polyester armé de fibres de verre ; ce matériau présente une résistance élevée aux chocs, mais sa mise en œuvre manuelle est plus coûteuse et peut nécessiter un enduit de lissage interne.

Les cuves de grande capacité comportent un cloisonnage pour limiter les effets d'inertie de la masse liquide. La zone d'aspiration de la pompe est placée à un point bas (fig. 194), au fond d'un puits pour éviter l'aspiration d'air par la pompe lors des déplacements de liquide en fin de cuve. Ce point bas constitue également le point de **vidange de la cuve**, fermé soit par une vanne, soit par un clapet commandé.

Les cuves doivent disposer d'une **jauge** visible depuis les postes de conduite et de remplissage. Selon les cas, cette jauge peut être soit du type à paroi transparente graduée, soit du type à tube gradué, soit du type à flotteur et cadran. Sur les pulvérisateurs équipés de contrôles électroniques et d'un **débitmètre de bouillie**, la jauge peut être complétée, en cabine, par un afficheur qui indique le volume pulvérisé et le volume restant en cuve.

Afin d'éviter les débordements et de contenir une éventuelle formation de mousse, les cuves doivent avoir un volume réel 5 % supérieur à leur volume nominal, annoncé par le constructeur.

Au terme du remplissage de la cuve, l'**homogénéité de la bouillie** est assurée par un dispositif d'**agitation** (fig. 194). Cette agitation est assurée par le **débit de retour** en cuve dérivé par le régulateur de pression. Très souvent, l'agitation est complétée soit par une **agitation hydraulique**, assurée par le fonctionnement en circuit fermé d'une **pompe centrifuge** spécifique ou servant aussi de **pompe de remplissage**, soit par un **agitateur mécanique** à

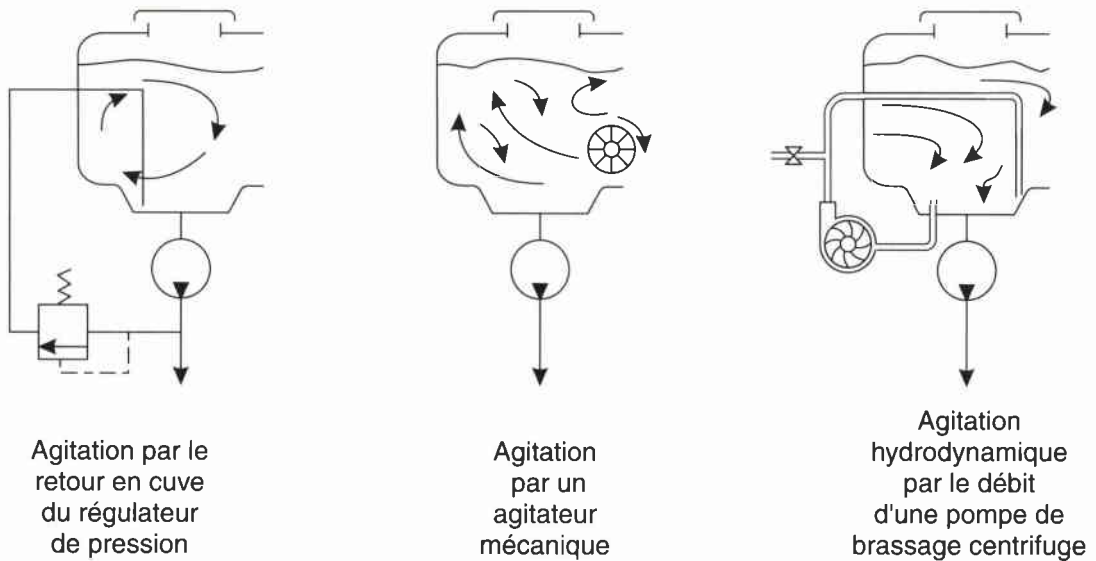


Fig. 194 - Différents systèmes d'agitation des pulvérisateurs

pales rotatives. Les pulvérisateurs, dont la régulation de débit est assurée par une pompe de pulvérisation à vitesse ou à cylindrée réglable (pas de retour en cuve), sont nécessairement équipés d'un dispositif d'agitation hydraulique ou mécanique. Pour éviter les formations de mousse, les retours en cuve du circuit de pulvérisation et de la pompe d'agitation doivent être retournés vers le fond de cuve et dirigés de haut en bas. Pour la même raison (risque de formation de mousse) et pour éviter les perturbations d'aspiration de la pompe principale, l'agitateur mécanique et la conduite d'aspiration de la pompe d'agitation sont placés à une hauteur telle que leur action cesse avant la fin de la vidange de la cuve.

Les pulvérisateurs sont dotés d'une **cuve principale**, qui vient d'être décrite, et de plus en plus souvent, d'une **cuve de rinçage** (fig. 189). La cuve de rinçage est une cuve annexe qui contient une quantité suffisante d'eau pour rincer la cuve principale et les circuits, diluer la bouillie résiduelle et l'épandre sur la parcelle en fin de traitement. Certains matériels sont équipés d'un circuit de rinçage sélectif, alimenté par la cuve de rinçage et destiné à rincer seulement les circuits terminaux des rampes pour prévenir les bouchages en cours de traitement ou entre les traitements utilisant le même produit sur des parcelles différentes. Bien entendu, le rinçage général demeure indispensable entre deux traitements mettant en œuvre des produits différents.

Depuis le 1^{er} Janvier 1995, les matériels doivent être munis d'une **cuve lave-mains** (fig. 189) d'au moins 15 L, indépendante des précédentes et permettant à l'opérateur de se rincer en cas d'éclaboussures.

• LES FILTRES

Les circuits des pulvérisateurs (fig. 195a et 195b) sont protégés par des filtres qui retiennent les différentes particules capables de gêner le fonctionnement des organes, de causer des colmatages et de boucher les buses. Selon les matériels, les filtres peuvent être localisés à différents niveaux :

- au niveau de l'orifice de remplissage supérieur de la cuve (tamis ou panier-filtre),
- au niveau de la conduite de remplissage, en amont de l'incorporateur et de la pompe de remplissage,
- au niveau de la conduite d'aspiration de la pompe de pulvérisation,
- au niveau de la conduite de refoulement de la pompe de pulvérisation, en amont des organes de distribution et de régulation de pression,
- au niveau des conduites d'alimentation des sections de rampe,
- au niveau des buses.

Les éléments filtrants sont souvent réalisés en treillis de matière plastique ou en métal inoxydable. Leur finesse de filtration varie selon leur emplacement ; à titre d'exemple, les filtres de remplissage peuvent présenter une finesse de filtration de 800 à 1 000 µm, les filtres d'aspiration, de 500 à 800 µm, les filtres de refoulement de pompe, de 300 à 500 µm, et les filtres de rampe, de 150 à 300 µm.

Pendant la période des traitements, les filtres doivent être nettoyés chaque jour et après chaque rinçage (se reporter à la notice d'instructions). Leur entretien conditionne, pour une large part, la fiabilité et la précision d'utilisation des pulvérisateurs.

• L'INCORPORATEUR

L'incorporateur permet le transfert des bouillies dans la cuve en réduisant le plus possible les manipulations des produits et en évitant à l'opérateur les risques pouvant résulter de l'introduction de la bouillie concentrée par l'orifice supérieur de remplissage de la cuve. L'appareil se présente sous la forme d'une trémie implantée au niveau d'un venturi, d'un couvercle et

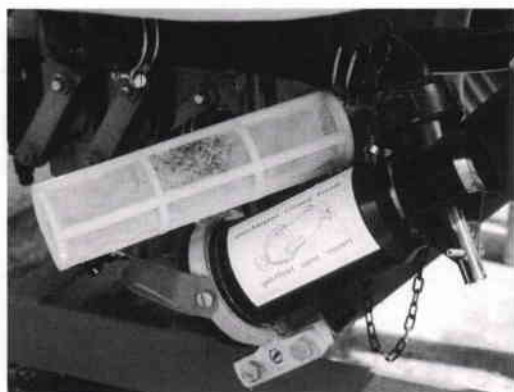


Fig. 195a - **Vue d'un filtre d'aspiration de pompe** (photo Cemagref)



Fig. 195b - **Vue d'un filtre de rampe** (photo Cemagref)

d'un circuit de rinçage (fig. 195c). L'incorporation est réalisée par hydro-aspiration du contenu de la trémie dans la conduite de remplissage de la cuve sous l'effet de la dépression présente au niveau du venturi.

L'introduction du produit est réalisée par l'opérateur, selon les instructions de la notice d'utilisation, en respectant les règles de protection individuelle (protection cutanée, protection respiratoire, protection des yeux...) et en observant scrupuleusement la dose de produit à incorporer en fonction de l'objectif de traitement et du taux de dilution recommandé.

Selon le type de matériel, l'incorporateur peut être monté sur un support articulé de manière à le mettre à portée de l'opérateur depuis le sol.

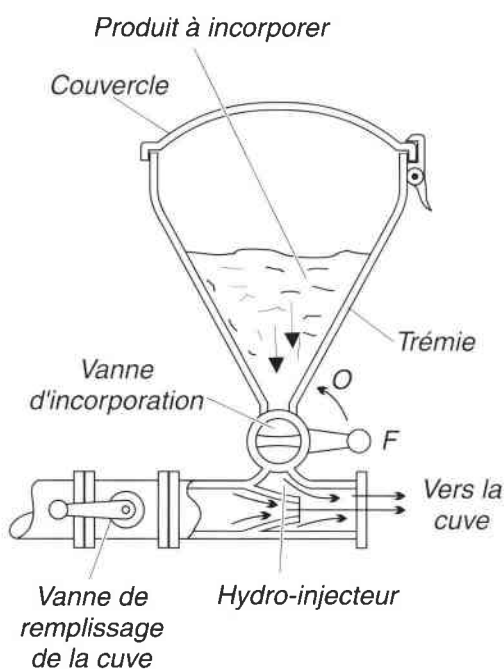


Fig. 195c - Principe d'un incorporateur

LES POMPES

Les pompes des pulvérisateurs sont conçues pour résister à la corrosion chimique des produits phytosanitaires et elles doivent être capables de générer un débit suffisant malgré les différentes pressions d'utilisation. Les circuits de bouillie des pulvérisateurs à pression de liquide sont souvent alimentés par une pompe volumétrique entraînée par prise de force, par moteur hydraulique ou, parfois, par une roue du pulvérisateur. Cette pompe est soit du type à pistons, soit du type à pistons-membranes. Les pulvérisateurs utilisent des pompes centrifuges pour assurer le remplissage et le brassage en cuve ; les pompes centrifuges sont également utilisées pour alimenter les circuits de pulvérisation, notamment sur les appareils à circulation continue de la bouillie.

• LES POMPES VOLUMÉTRIQUES

Une pompe volumétrique est une pompe dont le débit est proportionnel au volume de ses chambres internes de pompage et à son régime de rotation.

Parmi les différents modèles de pompes volumétriques utilisées sur les pulvérisateurs, citons les **pompes à pistons** et les **pompes à pistons-membranes**.

• Les pompes à pistons :

Les pompes à pistons peuvent être à simple effet (fig. 196) ou à double effet (fig. 197). Les pompes à simple effet réalisent le pompage avec une seule face du piston, tandis que les pompes à double effet utilisent successivement les deux faces du piston ; dans ce dernier cas, on obtient deux refoulements par cycle, le refoulement de la face postérieure du piston étant moins important que celui de la face frontale en raison de la présence de la tige de liaison. Les pompes à pistons possèdent, selon leur taille, de deux à six pistons disposés en ligne ou parfois en opposition.

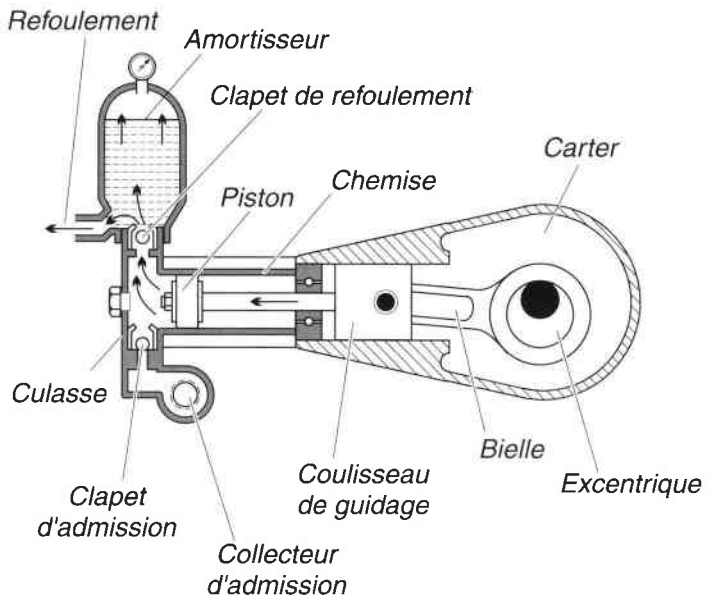


Fig. 196 - Principe d'une pompe à pistons à simple effet

La figure (fig. 196) montre le principe d'une pompe à pistons classique : le mouvement rotatif de l'arbre est transformé en mouvement alternatif grâce à un arbre vilebrequin ou à un excentrique solidaire de l'arbre, et à une bielle articulée au coulisseau de guidage. Le piston, relié par une tige rigide au coulisseau de guidage, glisse à l'intérieur du cylindre, appelé chemise lorsqu'il est amovible. Le cylindre est fermé par une culasse qui porte les soupapes d'admission et de refoulement.

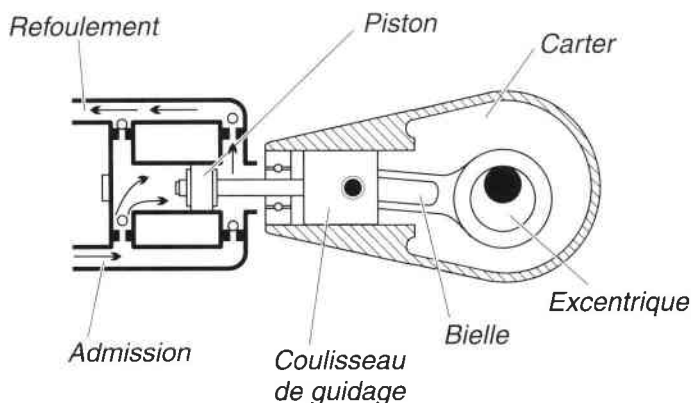


Fig. 197 - Principe d'une pompe à pistons à double effet

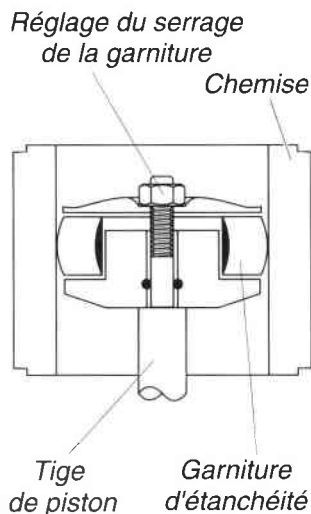


Fig. 198 - Exemple d'un dispositif d'étanchéité d'un piston

Le corps de pompe est un carter à bain d'huile en fonte ou en alliage d'aluminium ; la ou les **chemises** sont en acier inoxydable ou en acier revêtu intérieurement d'émail ou de céramique pour résister à la corrosion et à l'abrasion des produits.

Le piston (fig. 198) est constitué d'une **garniture étanche** (en matière synthétique ou en cuir) comprimée entre deux coupelles serrées par un écrou. L'étanchéité peut être entretenue régulièrement par le serrage de cet écrou qui provoque une expansion radiale de la garniture.

Les soupapes d'aspiration et de refoulement sont constituées d'un clapet circulaire contenu dans un corps ou une cage de guidage. Un ressort maintient le clapet fermé au repos contre son siège. Souvent, les soupapes d'aspiration et de refoulement sont identiques, leur fonction étant simplement dépendante de leur sens de montage. Les matériaux fréquemment utilisés sont l'acier inoxydable (ressorts, sièges, cages...) et/ou les matières plastiques.

Les pressions obtenues avec les pompes à pistons peuvent atteindre 40 bars, parfois plus selon les modèles. Les débits, pour un régime d'entraînement de 540 tr/min, varient selon la taille des pompes entre 20 et 350 L/min.

Il existe des pompes à pistons à cylindrée variable qui permettent le réglage de leur débit en fonction du débit de pulvérisation recherché. La figure (fig. 199) montre une pompe Berthoud dont la course des pistons est pré-réglée en modifiant le calage angulaire de deux excentriques.

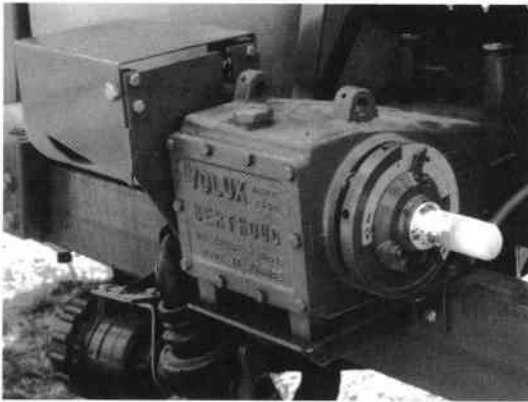


Fig. 199 - **Vue d'une pompe à pistons Berthoud à cylindrée réglable**
(photo Berthoud)

Le réglage est effectué au niveau du palier de la pompe en modifiant la position des deux flasques correspondant aux excentriques ; un secteur gradué permet à l'opérateur de sélectionner le débit recherché.

• **Les pompes volumétriques à pistons-membranes :**

On appelle ainsi des pompes dans lesquelles l'aspiration et le refoulement sont provoqués par la déformation d'une membrane sous l'action du mouvement alternatif d'un piston.

Les déformations des membranes souples dues aux déplacements alternatifs de faible amplitude d'un piston provoquent l'aspiration et le refoulement du liquide au travers de clapets ou de soupapes.

Cette disposition permet :

- de réduire au maximum la surface de contact entre la bouillie et les parois métalliques de la pompe,
- de réduire très sensiblement les usures par friction des pistons contre les cylindres,
- d'obtenir une séparation totalement étanche entre les parties traversées par la bouillie et les mécanismes d'entraînement.

Par rapport aux pompes à pistons classiques, les pompes à pistons-membranes se distinguent par une faible course (environ de 8 à 20 mm au centre de la membrane) et un grand alésage (de 50 à 100 mm par exemple). Selon le débit nominal, le nombre d'éléments pistons-membranes varie de deux à six. Les pompes à deux éléments (fig. 200) sont généralement à pistons-membranes en opposition (calés à 180°) tandis que

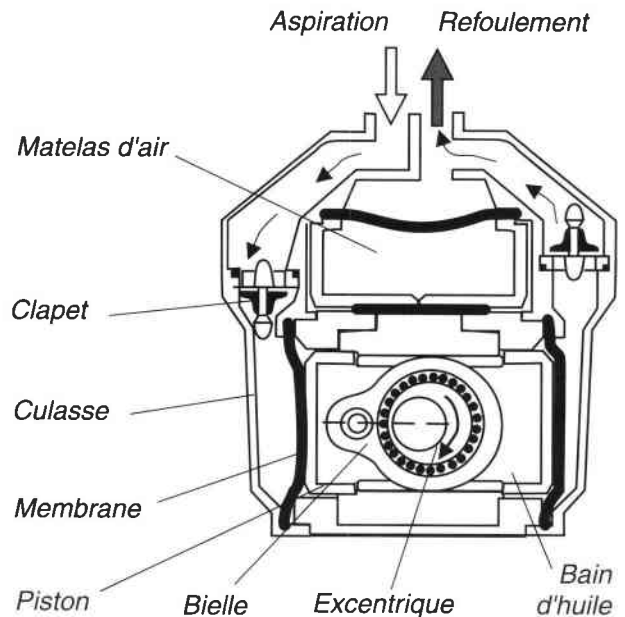


Fig. 200 - **Pompe à pistons-membranes à deux éléments** (d'après document Tecnomax)

les pompes à plus de deux éléments (fig. 201) sont disposées en étoile : trois éléments calés à 120°, ou quatre éléments calés à 90°, ou cinq éléments calés à 72°, ou six éléments calés à 60°.

Les principaux éléments constitutifs de ces pompes sont (fig. 202) le corps de pompe, les membranes, les pistons, les culasses, les soupapes et le mécanisme d'entraînement.

– **le corps de pompe** est un carter en alliage d'aluminium plastifié ou anodisé, ou en matière synthétique. Il supporte les cylindres (s'il en existe), les paliers de l'arbre à excentrique et le mécanisme d'entraînement des pistons-membranes (bielles, roulements...). Il contient un bain d'huile pour la lubrification des parties mobiles.

Des collecteurs d'admission et de refoulement permettent de connecter les orifices d'admission et de refoulement des différents éléments ;

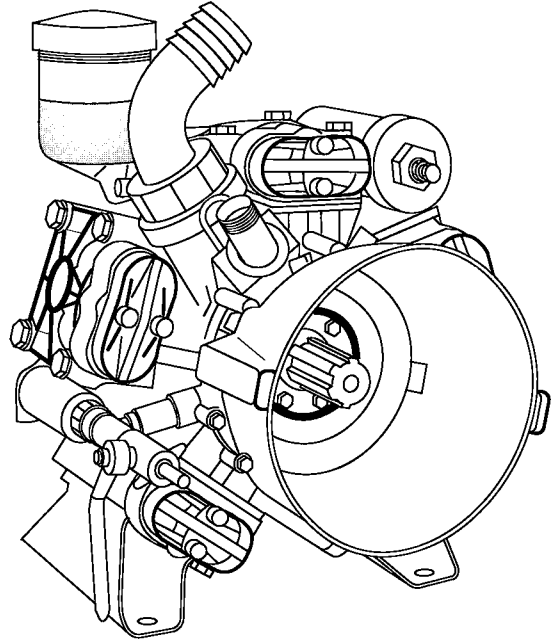


Fig. 201 - **Vue d'une pompe à cinq pistons-membranes**
(d'après document Annori Reverberi)

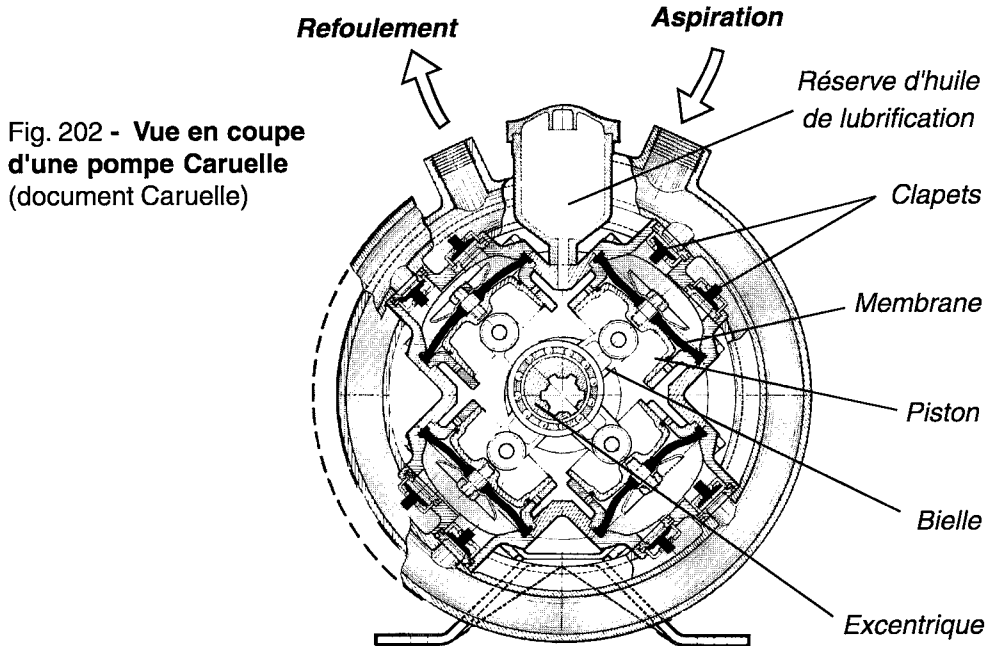


Fig. 202 - **Vue en coupe d'une pompe Caruelle**
(document Caruelle)

– **les membranes**, parfois appelées « **diaphragmes** », sont généralement des disques en matière caoutchoutée ou synthétique souple et présentant un profil d'épaisseur variable selon les conceptions. Leur périphérie est insérée entre le corps de pompe et la culasse de chaque élément. Selon les modèles de pompes, la membrane peut être simplement en contact contre le piston sans solidarité mécanique mais, le plus souvent, la liaison est assurée au centre par un système de vis-écrou et une coupelle de protection. La coupelle de protection peut être soit en contact avec le centre de la membrane (fig. 203), soit en contact près de sa périphérie pour la soustraire en partie à la contrainte de pression (fig. 203). La paroi de la membrane n'est pas tendue, mais plutôt en forme de cuvette souple de manière à limiter l'extension et la fatigue de son matériau pendant les phases d'aspiration et de refoulement ;

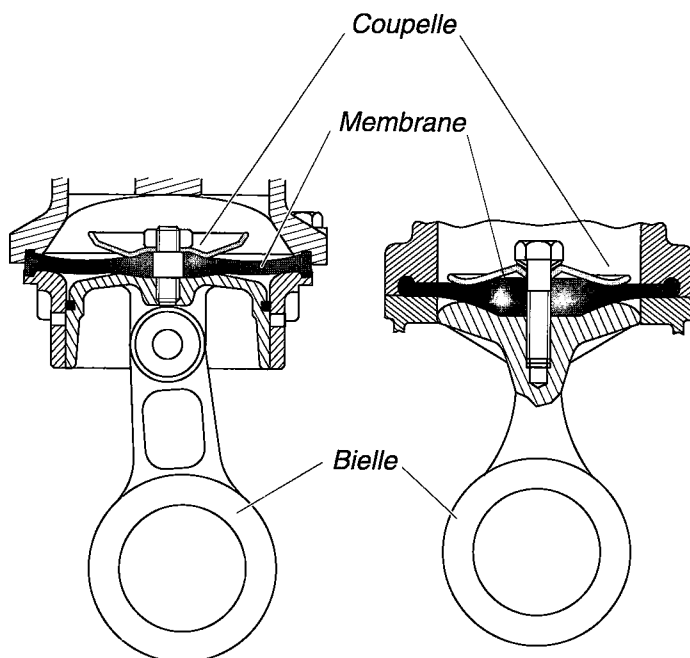


Fig. 203 - Deux exemples de montage de pistons-membranes

– **les pistons** se présentent de manière différente selon les fabrications. Pour les pompes à deux pistons opposés, chaque piston coulisse dans un cylindre et est animé par une bielle ou un cadre-bielle, lui-même actionné par un excentrique central.

Pour les pompes en étoile, les pistons coulissent aussi dans un alésage, mais ils sont reliés à l'excentrique central par une bielle individuelle et leur forme dépend du type de liaison avec la membrane : piston cylindrique creux relié à la membrane par une tige filetée et un écrou, piston en forme de champignon avec une surface de tête convexe pour accompagner la membrane dans ses déformations (fig. 203). Rappelons que, dans ce type de pompe, les pistons n'ont pas de rôle d'étanchéité, par conséquent leur coulissement n'a qu'un rôle de guidage et, dans certains cas, ils ne touchent pas le corps de pompe. Les pistons sont en acier ou en alliage léger ;

– **les culasses** (fig. 201 et 202) sont fixées au corps de pompe par des goujons ou des vis. Chaque culasse porte une soupape d'aspiration et une soupape de refoulement. La face

extérieure des culasses est souvent renforcée par des nervures. Les matériaux utilisés sont des matières synthétiques ou des alliages d'aluminium plastifiés ou anodisés ;

– **les soupapes d'aspiration et de refoulement** (fig. 202) sont constituées d'un clapet circulaire contenu dans un corps ou une cage de guidage. Un ressort maintient le clapet fermé au repos contre son siège. Souvent, les soupapes d'aspiration et de refoulement sont identiques, leur fonction étant simplement dépendante de leur position : siège de la soupape côté chambre de pompe pour le refoulement et siège de la soupape côté sortie pour l'aspiration, par exemple.

Les matériaux fréquemment utilisés sont l'acier inoxydable (ressorts, sièges, cages...) et/ou les matières plastiques ;

Les pressions maximales obtenues avec les pompes à pistons-membranes varient entre 20 et 40 bars, parfois plus selon les modèles. Les débits, pour un régime d'entraînement de 540 tr/min, varient selon la taille des pompes entre 10 et 45 L/min par élément : de 20 à 90 L/min pour deux éléments, de 30 à 135 L/min pour trois éléments... et jusqu'à 270 L/min pour six éléments.

• **Les caractéristiques des pompes volumétriques :**

Les caractéristiques d'une pompe volumétrique sont sa **cylindrée**, son **débit**, son **rendement**, sa **puissance** et sa **pulsation** :

– **la cylindrée** exprime le volume théoriquement débité par la pompe à chaque tour de son arbre d'entraînement. Selon les cas, les pompes sont à cylindrée fixe ou variable. La cylindrée s'exprime par exemple en cm^3/tr ou en L/tr .

– **le débit** est le produit de la cylindrée par le régime de rotation de la pompe. Prenons l'exemple d'une pompe ayant une cylindrée de 0,211 L/tour tournant à 540 tr/min, son débit théorique est égal à $0,211 \times 540 = 114 \text{ L}/\text{min}$. Ce débit théorique correspond à un rendement volumétrique de 100 % ; en fait, le débit réel tend à baisser lorsque la pression de refoulement augmente. La valeur du débit réel des pompes de pulvérisateurs est un paramètre très important lors de l'achat du matériel ; il convient en effet que le débit de pompe soit supérieur d'au moins 10 % au débit de pulvérisation pour que le régulateur de pression puisse fonctionner correctement. A ce débit minimal, il convient, pour les pulvérisateurs où l'agitation est assurée par les retours en cuve, de prévoir un supplément de débit de pompe de 5 % du volume de la cuve pour assurer un brassage suffisant de la bouillie. Notons toutefois qu'un débit trop élevé peut entraîner une formation de mousse à cause des courants importants de retour en cuve et un fonctionnement incorrect du régulateur de pression. Dans tous les cas, il convient de se référer aux courbes de débit des constructeurs et de respecter impérativement le régime de prise de force prescrit par le fabricant (540 tr/min ou parfois 1 000 tr/min).

Le rendement d'une pompe exprime les pertes qu'elle subit pendant son fonctionnement. On distingue le rendement volumétrique et le rendement global. Le rendement volumétrique caractérise la variation de débit en fonction de la pression de refoulement, pour une vitesse de rotation et une viscosité du liquide données. Cette baisse de débit ne correspond pas, en

principe, à des fuites internes, mais plutôt aux temps de réaction des clapets d'aspiration et de refoulement. Le rendement global (rg) prend en compte le rendement volumétrique (rv) et le rendement mécanique (rm) c'est-à-dire les pertes par frottements : $rg = rv \times rm$.

– **la puissance** fournie par une pompe s'exprime par le produit de sa pression et de son débit. Ainsi, une pompe ayant un débit réel (Q) de 180 L/min sous une pression (P) de 6 bars fournit une puissance hydraulique de $180 \times 6 / 600 = 1,8$ kW, soit 2,44 ch (le nombre 600 est une constante d'homogénéisation des unités). Si son rendement global est de 76 %, la puissance nécessaire à son entraînement est égale à $1,8/0,76 = 2,36$ kW, soit 3,2 ch.

Prenons un exemple, pour un pulvérisateur ayant une cuve de 800 litres appelé à traiter à un volume (Q) de 320 L/ha, le débit de pulvérisation (D) est donné par la relation :

$$D = \frac{Q \times L \times V}{600}$$

Q : volume/hectare en L/ha
L : largeur des rampes en mètres,
V : vitesse d'avancement en km/h.

Avec une largeur de travail de 24 mètres et une vitesse d'avancement de 8 km/h $D = (320 \times 24 \times 8)/600 = 102,4$ L/min. Le débit minimal de la pompe doit être de $102,4 \times 1,10 = 112,6$ L/min et, si l'agitation est assurée par le retour en cuve, le débit de pompe doit être au moins de $112,6 \times (800 \times 0,05) = 142,6$ L/min, ce qui correspond, dans les gammes des constructeurs, à une pompe de 145 ou de 150 L/min.

– **la pulsation** n'est pas à proprement parler une caractéristique, mais plutôt une conséquence du pompage alternatif. Sans entrer dans le détail des phénomènes hydromécaniques, la pulsation définit les variations de débit d'une pompe pendant un tour de son arbre ; une pompe à pistons radiaux multiples (pistons en étoile) a un débit plus régulier qu'une pompe à quatre pistons en ligne ou, *a fortiori*, qu'une pompe mono-piston. Plus la pulsation d'une pompe est grande, plus son débit est fluctuant, plus les conduites et les raccords sont sollicités et plus on risque des anomalies de pulvérisation. Ces inconvénients sont en grande partie évités par l'action de l'amortisseur pneumatique placé sur le refoulement des pompes. Cet amortisseur est en fait un accumulateur à membrane (fig. 204) ; l'une des faces de la membrane est au contact de la bouillie, l'autre est en contact avec un volume d'air comprimé introduit par une valve de gonflage. La pression de gonflage de l'amortisseur est indiquée dans la notice d'instructions (elle est d'environ de 30 à 50 % de la pression de travail).

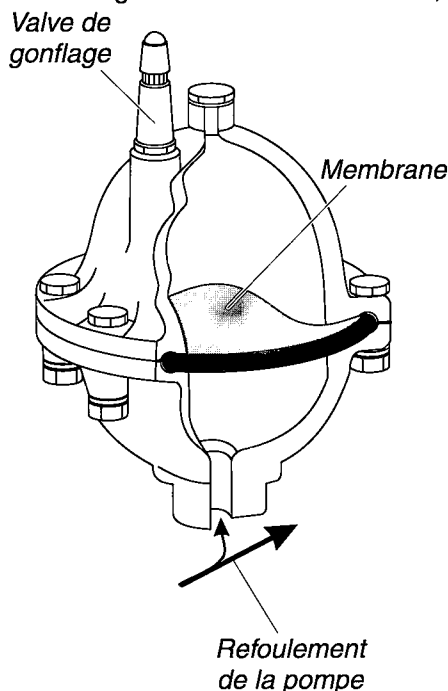


Fig. 204 - Accumulateur pneumatique à membrane

• LES POMPES CENTRIFUGES

Les pompes centrifuges utilisées sur les pulvérisateurs présentent le même principe que les pompes centrifuges des groupes de pompage d'eau, seuls les matériaux utilisés diffèrent pour résister à la corrosion et à l'abrasion des produits de traitement et des engrais liquides. Elles sont constituées (fig. 205) d'une **roue à aubes** latérales (appelée aussi **turbine**), placée dans un **corps de pompe** de forme circulaire muni d'un orifice d'entrée axial et d'un orifice de refoulement tangential. La roue à aubes est réalisée en acier inoxydable ou en résine de synthèse et le corps est en alliage d'aluminium traité ou en fonte. La vitesse d'entraînement est relativement élevée (de 1 000 à 3 000 tr/min)..

Les pompes centrifuges peuvent être utilisées pour différentes fonctions des pulvérisateurs :

- **le remplissage** des cuves (pompe de chargement ou de remplissage) ;
- **l'agitation** de la bouillie. Selon les cas, la même pompe peut assurer le remplissage et l'agitation ;
- **l'alimentation** des circuits de pulvérisation de certains pulvérisateurs, et notamment ceux à circulation continue de bouillie.

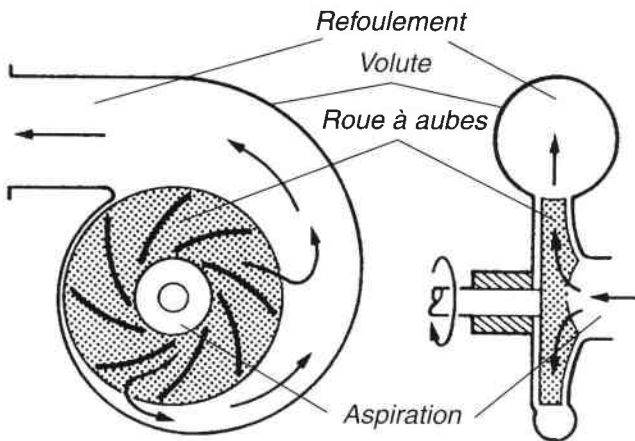


Fig. 205 - Principe d'une pompe centrifuge

Il existe des pompes centrifuges biturbine (pulvérisateurs Berthoud par exemple) : l'une des turbines alimente le circuit de pulvérisation (fig. 206) et l'autre, les circuits de remplissage et d'agitation.

Le débit d'une pompe centrifuge varie avec son régime de rotation et varie en théorie avec le cube du diamètre de son rotor, tandis que la pression varie avec le carré de la vitesse du rotor et avec le carré de son diamètre. En pratique, les pompes centrifuges permettent des débits très importants (de 300 à 1 200 L/min par exemple) sous une pression maximale limitée à 7 ou à 8 bars. Les pompes centrifuges ne sont pas volumétriques, cela implique des variations sensibles de débit en fonction de la vitesse d'entraînement et de la pression de refoulement. Il est donc indispensable de prendre connaissance de leur courbe de débit et de respecter la vitesse d'entraînement prescrite, notamment pour les pompes alimentant les circuits de pulvérisation.

Les pompes centrifuges de remplissage et de pulvérisation sont entraînées par prise de force, par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesses. Leur coût de fabrication est moins élevé que celui des pompes à pistons ; leur entretien est réduit et elles sont moins sensibles aux liquides abrasifs.

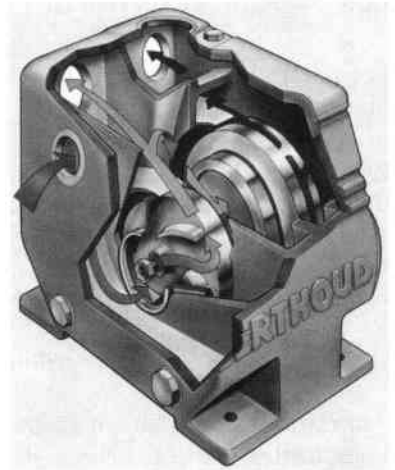


Fig. 206 - **Vue d'une pompe centrifuge Berthoud à deux corps de pompage séparés**
(photo Berthoud)

LA DISTRIBUTION

Le terme distribution désigne les éléments qui contrôlent la circulation de la bouillie d'un pulvérisateur. Le système de distribution comprend une commande primaire et des commandes secondaires, appelées aussi distributeurs de sections (ou de tronçons). Ces fonctions sont assurées par des vannes commandées soit manuellement, soit par un électro-aimant, soit par un moteur électrique.

L'ensemble des éléments de distribution (fig. 207) est généralement associé aux éléments de régulation de pression ou de débit de retour en cuve. Lorsque les distributeurs sont à commande manuelle, leur implantation est localisée vers l'avant du pulvérisateur afin de pouvoir les atteindre, directement ou par l'intermédiaire de commandes flexibles, depuis le poste de conduite ; pour des raisons de sécurité, ces organes de commande sont protégés pour éviter toute projection vers l'opérateur en cas de fuite. Dans le cas de commandes électriques, les électrovannes ou les vannes motorisées peuvent être regroupées à l'arrière du pulvérisateur afin de simplifier et de raccourcir la longueur des conduites des circuits de pulvérisation.

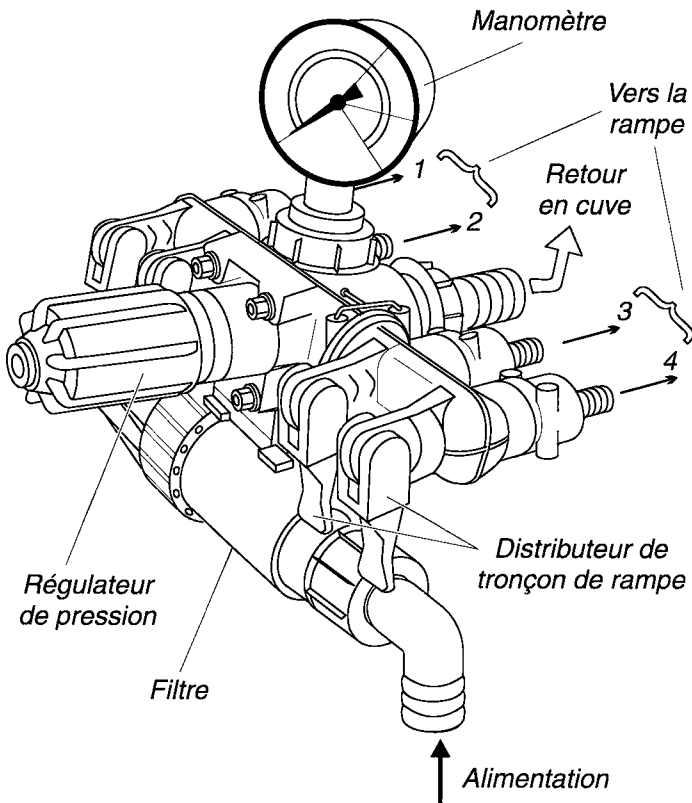


Fig. 207 - Vue d'un ensemble de distribution à commande manuelle

• LES VANNES À COMMANDE MANUELLE

Le plus souvent, les éléments de distribution comprennent une vanne primaire et autant de vannes secondaires que de tronçons de rampes. La commande primaire permet l'alimentation et la coupure générale des rampes et les commandes secondaires actionnent l'ouverture et la fermeture individuelle des tronçons de rampes.

Selon les cas, il s'agit soit de vannes à clapet (fig. 208), soit de vannes à membrane, soit encore de vannes à boisseau sphérique (fig. 209).

Les éléments de distribution sont généralement de conception modulaire (fig. 207) : un module régulateur de pression, un module constitué de la vanne primaire et des modules de vannes secondaires empilables, dont le nombre dépend de celui des tronçons de rampes.

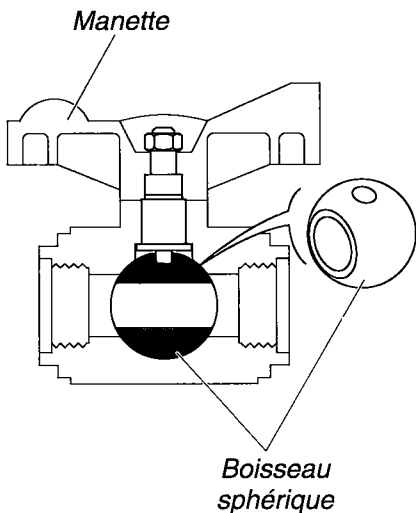


Fig. 209 - Vanne à boisseau sphérique

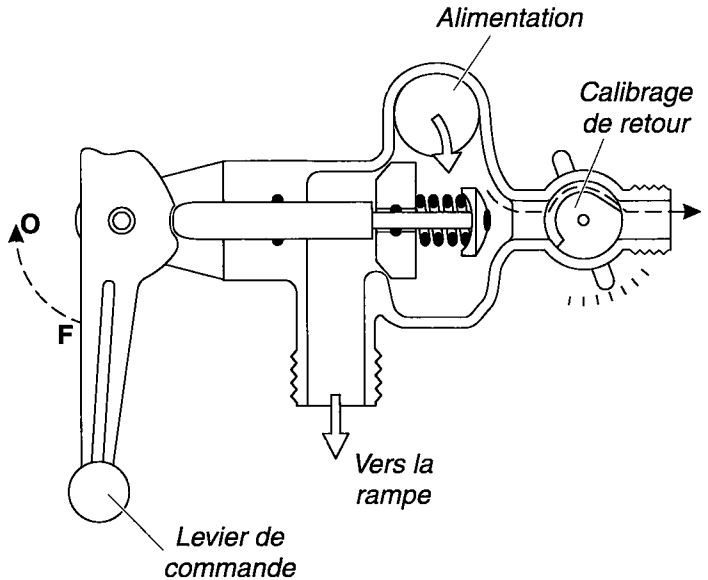


Fig. 208 - Principe d'un distributeur à clapet à commande manuelle

Le corps de ces éléments est généralement réalisé en matériau synthétique moulé, résistant aux produits chimiques et au rayonnement solaire. Les sièges des clapets peuvent être en résine de synthèse, en acier inoxydable ou en céramique.

Les éléments de distribution des sections de rampes sont, le cas échéant, associés à une mise en dérivation calibrée des circuits de retour afin de permettre la fermeture des sections de rampe sans modifier la pression aux buses (fig. 208 et 210). A chaque fermeture d'un tronçon de rampe, le distributeur correspondant dérive le débit destiné aux buses vers la cuve au travers d'un orifice calibré qui évacue un débit équivalent à celui des buses de ce tronçon ; cet orifice est cons-

titué soit d'une pastille calibrée interchangeable, soit d'une petite vanne de retour réglable (fig. 208). Un clapet de décompression rapide peut être intégré au distributeur afin d'obtenir, à la fermeture du tronçon de rampe, une coupure instantanée de la pulvérisation (fig. 210).

• LES ÉLECTROVANNES

Une électrovanne est une vanne commandée par un électroaimant ; cette définition banale nous conduit à préciser les caractéristiques d'un électroaimant et ses limites d'utilisation sur des matériels mobiles disposant d'une tension de 12 volts. Dès qu'il est alimenté en courant continu, un électroaimant a une action pratiquement instantanée et l'intensité qu'il absorbe est importante et reste constante quel que soit le travail qu'il doit accomplir.

Or, si l'on considère que l'électro-aimant est au repos (non alimenté) lorsque la pulvérisation est coupée, ce dernier est constamment sous tension pendant la pulvérisation. Dans ces conditions, les constructeurs utilisent la commande électromagnétique directe seulement sur des distributeurs à faible énergie de commande (course et effort de commande limités) de manière à ne pas dépasser un courant de commande de 2 à 4 ampères par électro-aimant. Afin de limiter la consommation de courant au minimum, il existe des électrovannes à action étagée ou à pilotage interne, dans lesquelles le rôle de l'électro-aimant se limite à commander un circuit de commande hydraulique de pilotage de la vanne.

Les électrovannes à action directe sont souvent de conception comparable aux vannes à commande manuelle à membranes ou à clapets (fig. 211). La fermeture de la pulvérisation est assurée par un ressort et l'ouverture par l'action directe de l'électro-aimant. Selon les modèles, la commande manuelle est conservée afin de pouvoir intervenir lorsque l'alimentation électrique n'est pas branchée ou en cas de panne.

Les électrovannes à actions étagées sont généralement du type à membrane. La figure 212 montre le principe d'une électrovanne Tecnomat qui comprend :

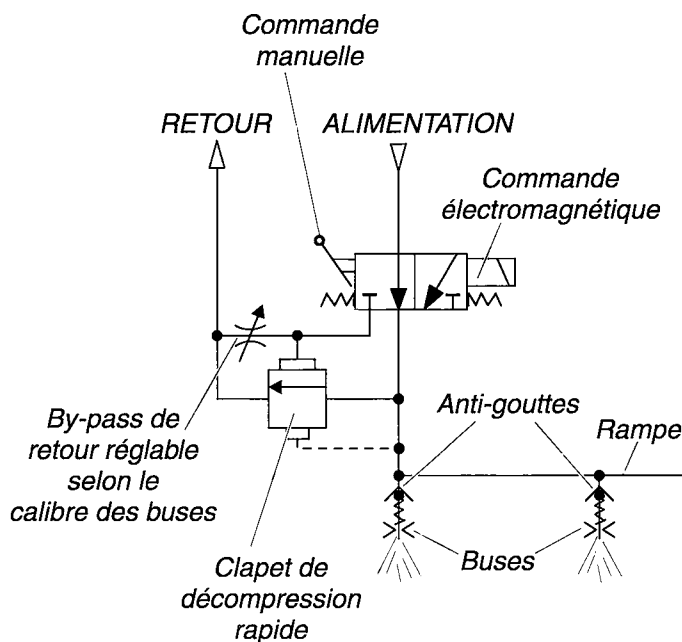


Fig. 210 - Schéma d'un élément de distribution muni d'un calibre de retour

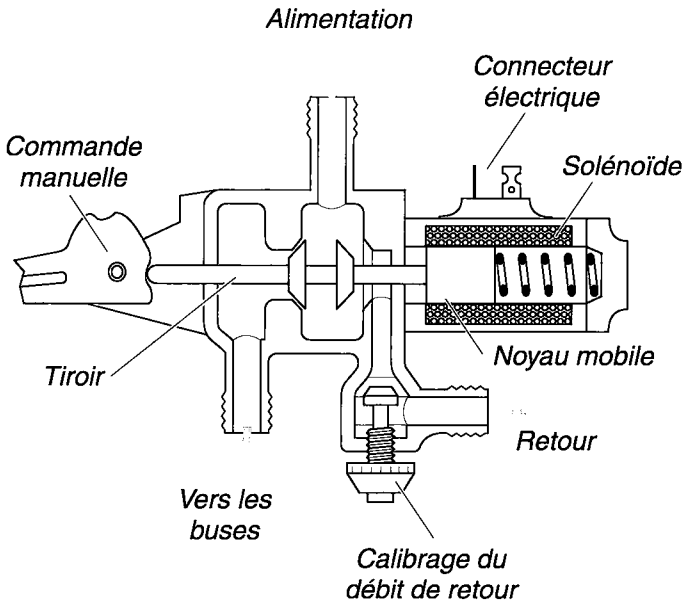


Fig. 211 - Principe d'un distributeur à clapet à commande électromagnétique

Dès que l'on alimente l'électro-aimant, ce dernier soulève le clapet pilote avec une section d'ouverture nettement plus grande que l'orifice calibré ; la membrane, immédiatement déséquilibrée par la chute de pression sur sa face supérieure, soulève le clapet central et alimente le circuit de pulvérisation.

Dès que l'on cesse d'alimenter l'électro-aimant, le clapet pilote revient sur son siège, la pression supérieure croît et la membrane referme le clapet central et le circuit de pulvérisation.

L'intérêt de cette technique de pilotage est que, avec une faible énergie électrique, il est possible de commander des vannes de toutes tailles.

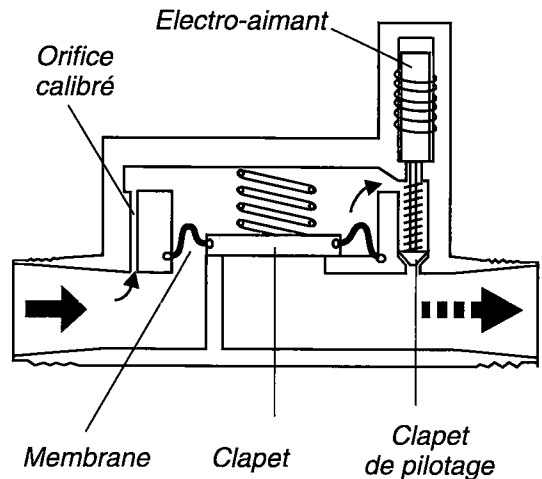


Fig. 212 - Principe d'une électrovanne à membrane à action étagée (d'après document Tecnomat)

- une membrane associée à un clapet central, fermé au repos par un ressort,
- un clapet de pilotage fermé au repos par un ressort et qui peut s'ouvrir sous l'action d'un petit électro-aimant.

Lorsque la pulvérisation est coupée, la membrane est soumise sur ses deux faces à la pression de refoulement de la pompe ; la mise en communication des deux chambres est assurée par un orifice calibré. Dans cette situation, la membrane plaque le clapet central sur son siège car, à l'action du ressort, s'ajoute l'action de la pression sur la face supérieure de la membrane, dont la surface active est plus grande au-dessus qu'en dessous.

• LES VANNES MOTORISÉES

Les vannes motorisées sont des vannes commandées par un moteur électrique alimenté seulement pendant la manœuvre. Elles peuvent être appelées aussi servo-vannes lorsque leur ouverture peut être fractionnée selon une certaine loi de commande, ce qui est, par exemple, le cas des vannes motorisées de régulation du débit de retour en cuve.

Généralement, il s'agit de vannes à papillon ou à boisseau sphérique (fig. 213), commandées par un moteur électrique associé à un réducteur mécanique. L'action du moteur est à double effet : l'ouverture et la fermeture s'obtiennent par inversion de la rotation du moteur.

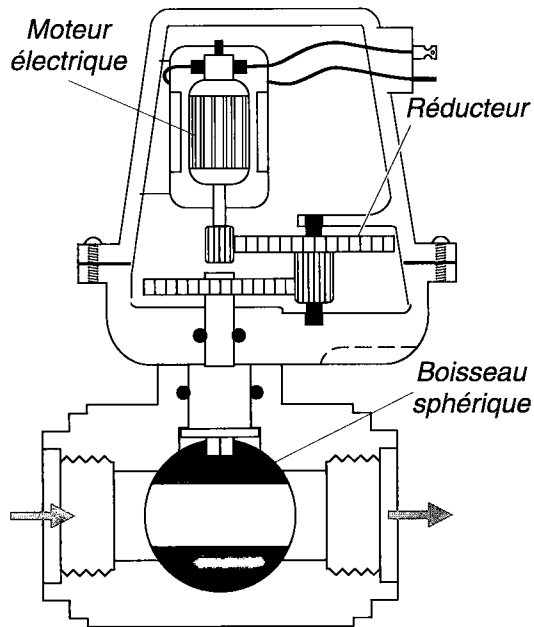


Fig. 213 - Vanne motorisée à boisseau sphérique

LA RÉGULATION DE PRESSION

Les pulvérisateurs à pression de liquide à jet projeté réalisent la pulvérisation en présentant le liquide sous pression devant des buses ; les paramètres principaux du traitement sont :

- le volume/ha (Q) en L/ha,
- la largeur de travail (L) en m,
- la vitesse d'avancement (V) en km/h,
- le débit de pulvérisation (D) en L/min.

Ces paramètres étant liés entre eux par la relation :

$$D = \frac{Q \times L \times V}{600}$$

Le débit de pulvérisation (D) représente la somme des débits de toutes les buses (q1 + q2 + q3 + q4 +...) : $D = nq$.

Pour que chaque buse débite la quantité (q) voulue, il convient que ces buses soient alimentées sous une pression (P) identique bien définie telle que $q = k\sqrt{p}$. Pour un type de buse donné, le débit pulvérisé étant directement dépendant de la pression, on règle finalement ce débit en agissant sur la pression.

Les différentes configurations de pulvérisateurs font appel à des systèmes de régulation qui permettent de maîtriser le débit et la pression selon la vitesse d'avancement et le volume/hectare souhaité.

Avant d'étudier ces systèmes, observons les remarques suivantes :

– pour un type de buse et un contexte de traitement donnés, si les paramètres **D** (débit de pulvérisation), **Q** (volume à appliquer par hectare) et **V** (vitesse d'avancement) sont **constants**, la dépendance arithmétique de ces valeurs montre que, de toute évidence, la pression doit rester constante pendant tout le traitement pour respecter l'objectif de volume/hectare. Dans ce cas, on comprend facilement la nécessité d'une **régulation à pression constante** pour régler la pression en fonction des différents types de traitements et pour la maintenir à une valeur de consigne la plus constante possible malgré les irrégularités ponctuelles de fonctionnement (ouverture et fermeture des circuits, variation du régime de pompe...).

– dans un contexte de traitement où le volume/hectare (Q) est défini et doit rester constant pendant tout le traitement – ce qui est le cas général –, si la vitesse d'avancement (V) varie en raison des fluctuations de régime moteur ou du patinage des roues motrices, il convient d'ajuster le débit de pulvérisation en conséquence.

Prenons l'exemple d'un traitement dont les paramètres initiaux sont :

- volume/ha (Q) = 300 L/ha,
- largeur de travail (L) = 18 m,
- vitesse d'avancement (V) = 8 km/h,
- pression de pulvérisation (P) = 3 bars,
- débit de pulvérisation (D1) = (300 x 18 x 8)/600 = 72 L/min.

Si au travail, la vitesse baisse à 7 km/h (baisse de 12,5 % ou 1/8), le débit de pulvérisation doit également baisser de 1/8 et devenir $D_2 = (72/8) \times 7 = 63$ L/min. Pour respecter le volume/hectare et ce nouveau débit (D_2), il faut réduire la pression (P_1) à une valeur (P_2) donnée par la loi débit-pression suivante :

$$P_2 = P_1 \times \frac{Q_2^2}{Q_1^2} = 3 \times \frac{63^2}{72^2} = 2,3 \text{ bars}$$

Cette intervention, pour réduire la pression, peut être non automatique, auquel cas l'opérateur doit agir sur le régulateur de pression pour effectuer la correction nécessaire. Bien sûr, cette action manuelle est assez utopique dans la mesure où il faudrait d'abord que le conducteur soit informé de la nature de la variation et de la nouvelle valeur de pression à adopter, tout cela dans un espace de temps très court car, à tout moment, une autre variation peut survenir dans le même sens ou en sens inverse !

Pour parvenir à une utilisation contrôlée des pulvérisateurs en fonction des variations de vitesse au travail, les constructeurs proposent en série ou en option des équipements de régulation automatique de pression pilotés soit par les variations de régime moteur (DPM), soit par les variations de vitesse d'avancement (DPA).

Les trois principaux systèmes de régulation des pulvérisateurs sont la **régulation à pression constante**, la **régulation DPM** et la **régulation DPA**.

• LA RÉGULATION À PRESSION CONSTANTE

La régulation à pression constante constitue la ressource minimale indispensable pour la maîtrise de la pression dans les circuits de pulvérisation. Dans le cas le plus fréquent des pulvérisateurs sans circulation continue de bouillie, la régulation de pression est assurée par un **régulateur de pression** (fig. 214 et 215) situé à l'entrée du bloc de distribution.

Le régulateur de pression comprend trois orifices (fig. 215 et 216) :

- un orifice d'entrée de la bouillie en provenance de la pompe (via un filtre),
- un orifice de sortie de la bouillie vers les circuits de pulvérisation,
- un orifice de retour en cuve du débit excédentaire dévié par le régulateur.

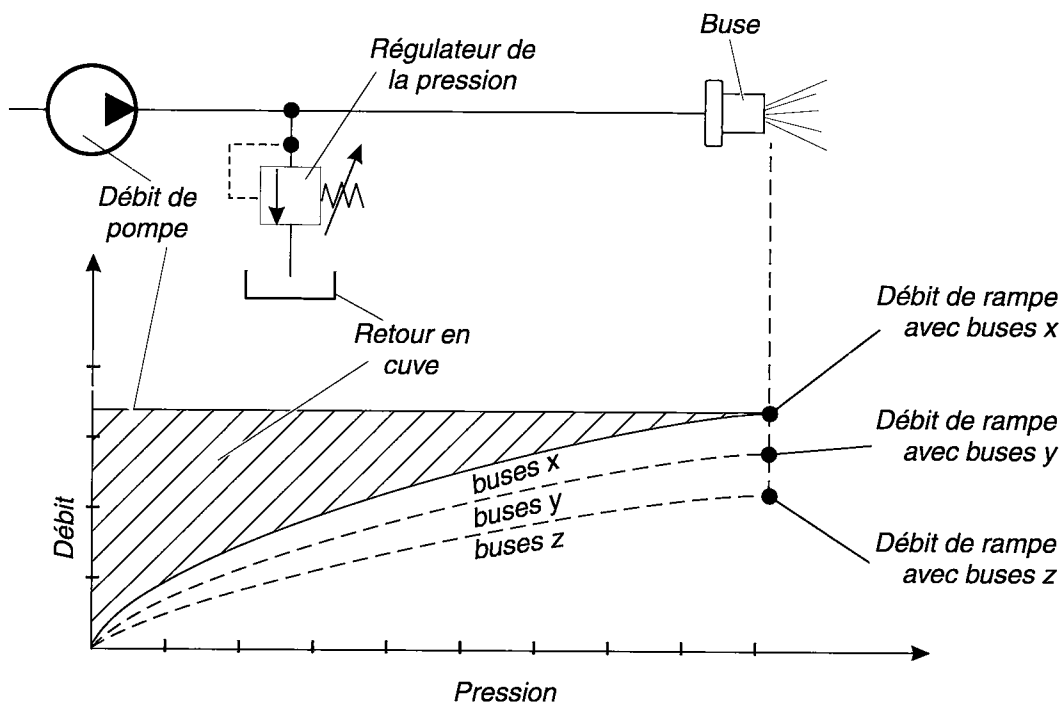


Fig. 214 - Le rôle du régulateur de pression

Le principe de fonctionnement est très simple (fig. 215) : au repos, le circuit de retour est fermé par le clapet du régulateur. Ce dernier est plaqué contre son siège par un ressort dont la tension est réglée par un système vis-écrou à partir d'une manette ou d'une molette. Le clapet est donc soumis à deux forces antagonistes : d'un côté, la force mécanique (F_m) de compression du ressort et, de l'autre, la force hydraulique (F_h) résultant de l'action de la pression (P) de la bouillie sur la surface du clapet : $F_h = P \times S$. Lorsque la force hydraulique devient supérieure à l'action du ressort, le clapet s'ouvre en comprimant le ressort jusqu'à trouver un nouvel équilibre $F_h = F_m$.

Lorsque l'on ouvre le circuit de pulvérisation, le débit de pompe est immédiatement freiné par les orifices calibrés des buses et il en résulte une montée rapide en pression jusqu'à l'ouverture du régulateur qui dérive la partie excédentaire du débit vers le retour en cuve. Pour un réglage de tension du ressort et une pression de consigne donnés, les régulateurs de pression présentent une précision et une stabilité de fonctionnement variables selon leur conception et selon les variations de débit. Lorsque le débit amont tend à augmenter (vitesse de prise de force plus grande) ou lorsque le débit aval tend à diminuer (fermeture au travail de sections de rampes par exemple), la pression tend à augmenter en raison du plus grand débit de retour qui entraîne une plus grande ouverture du clapet et une plus grande compression du ressort. Ces **régulateurs de pression** sont les plus simples, leur précision peut être accrue en utilisant un ressort à pas différencié ou deux ressorts de tension différente.

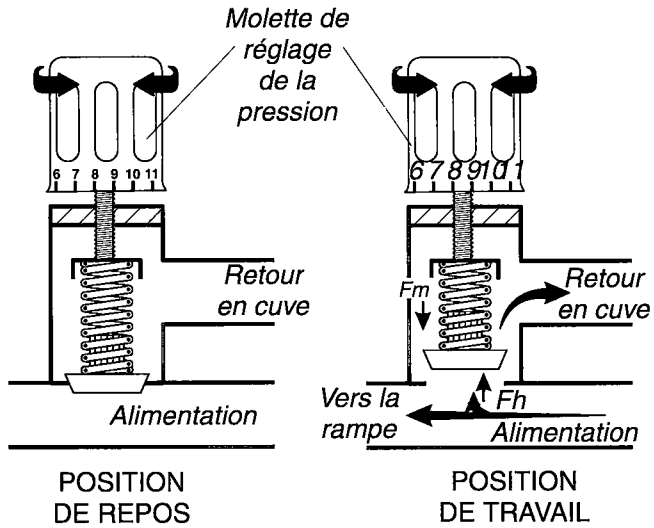


Fig. 215 - Principe de fonctionnement d'un régulateur de pression simplifié

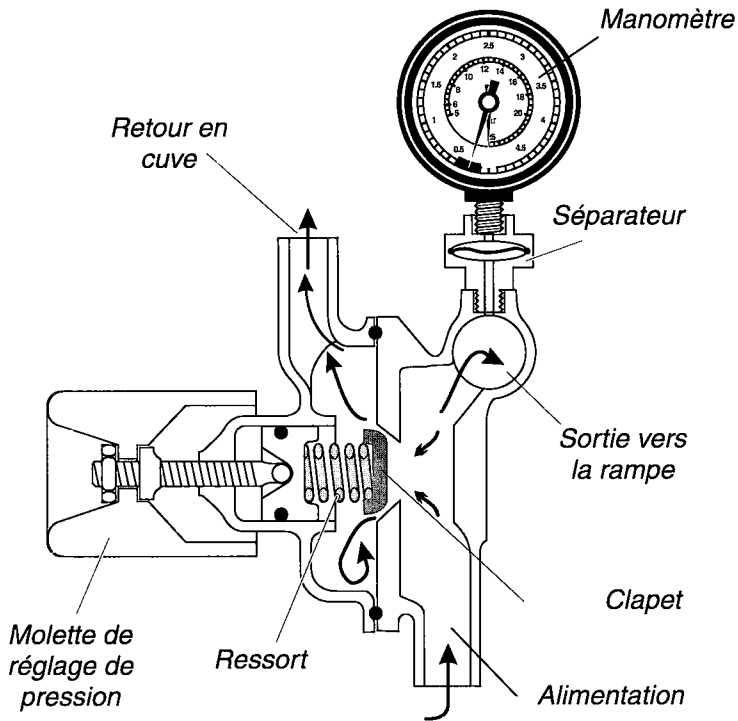


Fig. 216 - Vue d'un régulateur de pression

Un autre moyen pour contrôler la plage d'ouverture du clapet du régulateur de pression consiste à remplacer l'action antagoniste du ressort métallique par une chambre à air comprimé, c'est le cas du système *Régulair* de Tecnomat. Par rapport à un ressort métallique, le « ressort pneumatique » permet une plus grande amplitude de compression (plage de débit de retour en cuve plus large) sans variation sensible de la pression aux buses. La modification de la consigne de pression de régulation est obtenue en ajustant la pression d'air de la chambre.

La pression de pulvérisation, appelée pression de consigne, est donc réglée au niveau du régulateur et sa valeur est indiquée par un **manomètre** (fig. 217) placé en dérivation du circuit de pulvérisation. Le manomètre est l'instrument de base du réglage des pulvérisateurs ; il doit être particulièrement fiable et résister aux chocs, aux vibrations et aux agressions chimiques. Un **séparateur à membrane** (fig. 216) permet d'isoler son circuit interne du circuit de bouillie ; le mécanisme du manomètre est immergé dans un bain de glycérine qui joue le rôle d'amortisseur pour les pulsations de pression de la pompe et lors des ouvertures et fermetures des circuits. Il est recommandé d'utiliser des manomètres dont le diamètre de cadran est d'au moins 100 mm, avec deux échelles de lecture différenciées (avec une ou deux aiguilles selon les modèles). Précisons que la plage d'utilisation d'un manomètre se limite aux trois quarts de son échelle, au-delà, la précision est aléatoire et on risque une déformation définitive du tube interne (tube de Bourdon).

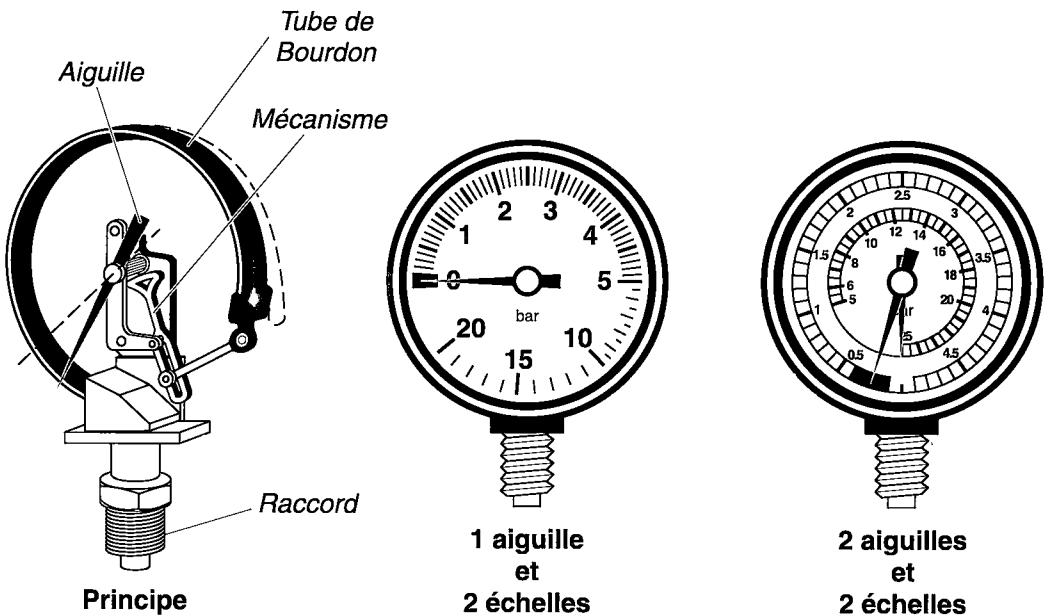


Fig. 217 - Manomètres utilisés sur les pulvérisateurs

• LA RÉGULATION À DÉBIT PROPORTIONNEL AU RÉGIME MOTEUR (DPM)

La régulation à débit proportionnel au régime moteur (DPM) s'applique aux circuits alimentés par des **pompes volumétriques**, elle permet seulement de compenser les variations de vitesse d'avancement pouvant résulter des variations de régime du moteur, pour un rapport donné de la boîte de vitesses. Le régime du moteur tend à croître dans les descentes et à diminuer dans les montées. Or, si la vitesse du moteur augmente, la vitesse de la prise de force augmente aussi dans les mêmes proportions ; le débit de pompe augmente ainsi que la vitesse d'avancement. Si le régime du moteur diminue, le régime de la pompe et la vitesse d'avancement diminuent. Le rôle du système DPM est donc de modifier le réglage de la pression de pulvérisation de manière à adapter le débit de pulvérisation en fonction des variations de régime moteur (et de la vitesse d'avancement correspondante) afin de respecter l'objectif de volume/hectare souhaité, selon la relation :

$$D = \frac{Q \times L \times V}{600}$$

Dans tous les cas, l'action de cette régulation est prévue pour répondre à des variations d'amplitude limitées (variation de vitesse moteur comprise entre + ou - 10 % par exemple) en raison de l'influence très sensible de la pression sur la taille des gouttes. A cet égard, pour un objectif de traitement donné, il convient de toujours choisir les buses à partir de la pression qui correspond le mieux à la finesse de pulvérisation recherchée et en intégrant la variation éventuelle de pression pouvant être apportée par le système de régulation.

Parmi les différentes techniques de DPM, citons les **systèmes DPM à retour calibré constant** et les **systèmes DPM à débit de retour régulé**.

• **Les systèmes DPM à retour calibré constant (fig. 218) :**

Les systèmes DPM à retour calibré constant sont les plus courants ; leur principe consiste à placer, en dérivation du circuit de pulvérisation, une vanne de contrôle du retour en cuve (fig. 219) dont on peut régler avec précision la position d'ouverture. Le fonctionnement d'un système DPM est fondé sur le raisonnement suivant (fig. 220) : le débit de

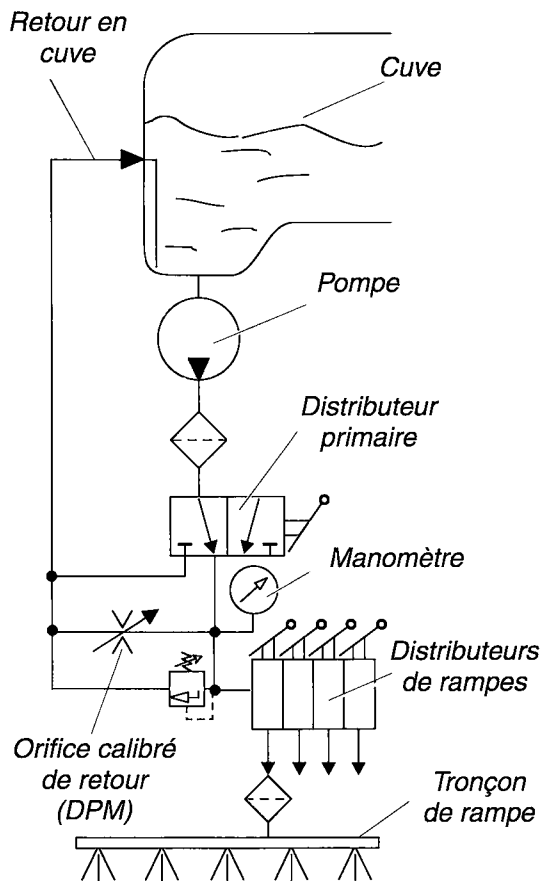


Fig. 218 - Principe d'un système DPM

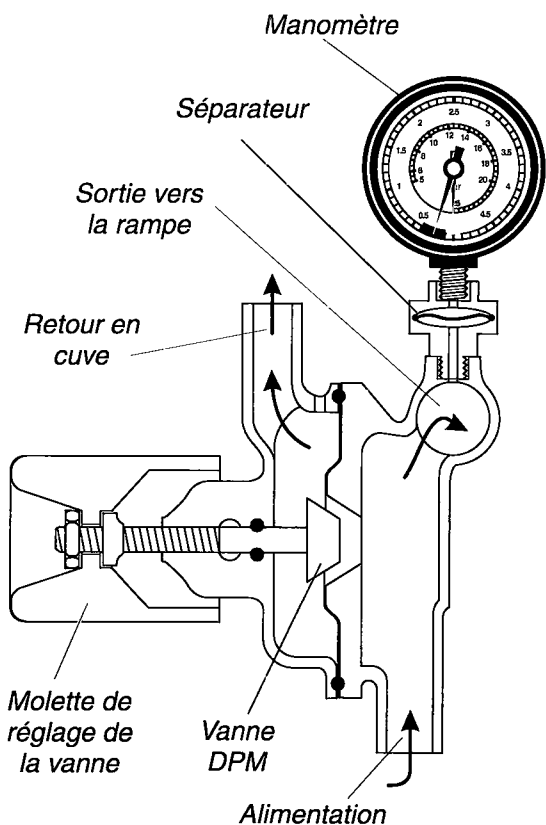


Fig. 219 - Dispositif de réglage du retour sur une régulation DPM

générale, les pompes sont surdimensionnées dans le dessein d'obtenir un retour en cuve pour le brassage hydraulique de la bouillie.

Pour un débit (D_p) d'une pompe volumétrique tournant à 540 tr/min, on a à la rampe un débit (D) tel que $D < D_p$; le recyclage dans la cuve (Dr) est égal à $D_p - D$; son importance dépend du calibrage de retour. En exprimant le tout en pourcentage, on peut écrire : $(D/D_p \times 100) + (Dr/D_p \times 100) = 100 \%$ Pour une valeur de $D_p = 80$ L/min, la pompe tournant à 540 tr/min et le moteur à 2 100 tr/min, et $D = 60$ L/min, sous une pression de 2,5 bars, le recyclage dans la cuve est $Dr = 20$ L/min.

la pompe volumétrique (D_p) est la somme du débit total des buses (D) et du débit de retour en cuve (Dr), $D_p = D + Dr$. Pour une vitesse de pompe et un calibre de buses donnés, la pression de pulvérisation souhaitée est obtenue en calibrant le débit de retour en cuve à une certaine valeur en ajustant l'ouverture ou la fermeture d'une vanne. Lorsque ce réglage est acquis, on obtient une division du débit de la pompe selon une certaine proportion. Si, au travail, la vitesse de la pompe augmente, il en résulte une augmentation de son débit ; or, le dimensionnement des buses et de l'orifice de la vanne de retour étant constant, il en résulte une augmentation générale de pression devant la vanne de retour et devant les buses ainsi qu'un accroissement des débits selon le même rapport de division. En définitive, on obtient une proportionnalité du débit de pulvérisation avec la vitesse du moteur tout en conservant une valeur constante du volume/ha de bouillie.

Avec les systèmes DPM, il est indispensable que le débit de la pompe soit supérieur au débit maximal de la rampe. D'une façon

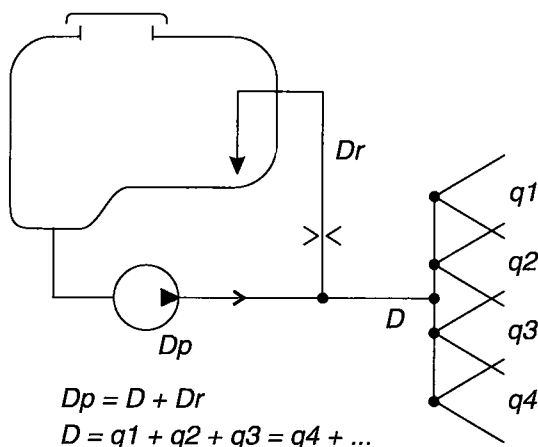


Fig. 220 - Le débit de rampe et le débit de retour

On a $(60/80 \times 100) + (20/80 \times 100) = 75 \% + 25 \% = 100 \%$ et $Dr = 20/60 = 0,33$.

Le volume/ha à appliquer est de 250 litres avec une rampe de 18 mètres se déplaçant à 8 km/h.

Examinons ce qui se passe lorsqu'il y a une variation de la vitesse d'avancement due à une variation du régime du moteur, le rapport de boîte choisi étant inchangé.

Supposons que la vitesse d'avancement diminue de 10 %, c'est-à-dire qu'elle passe à 7,2 km/h pour un régime moteur de 1 890 tr/min. La prise de force tourne alors à $(540/2 \times 100) \times 1 890 = 486$ tr/min, le débit de la pompe (Dp) chute à $(80/540) \times 486 = 72$ L/min, le débit de la rampe (D) est alors de 54 L/min et le retour en cuve (Dr) de 18 L/min.

La vérification suivante : $(54/72 \times 100) + (18/72 \times 100) = 75 \% + 25 \%$ nous montre que la diminution de vitesse ne change donc pas le rapport Dr/D et, selon la vérification suivante, le volume/hectare reste constant :

$$Q = \frac{600 \times Dr}{L \times Vr} = \frac{600 \times 54}{18 \times 7,2} = 250 \text{ L/min}$$

La pression aux buses diminue de 32 % environ car, selon la loi débit-pression, la pression varie avec le rapport des carrés des débits :

$$p' = \frac{54^2}{60^2} \times 2,5 = 2,025 \text{ bars}$$

Supposons maintenant que la vitesse d'avancement augmente de 10 %, c'est-à-dire qu'elle passe à 8,8 km/h, le moteur tournant à 2 310 tr/min. La prise de force tourne à $(540/2 \times 100) \times 2 310 = 594$ tr/min; le débit de la pompe devient $Dp = (80/540) \times 594 = 88$ L/min; le débit de la rampe (D) passe à 66 L/min et le retour en cuve (Dr) est de 22 L/min.

La vérification qui suit $(66/88 \times 100) + (22/88 \times 100) = 75 \% + 25 \%$ nous montre que la diminution de vitesse ne change pas le rapport Dr/D et nous permet de démontrer que le volume/hectare reste toujours constant :

$$Q = \frac{600 \times 66}{18 \times 8,8} = 250 \text{ L/min}$$

La pression aux buses devient 3,025 bars et augmente donc de 21 % par rapport à la valeur normale :

$$p' = \frac{66^2}{60^2} \times 2,5 = 3,025 \text{ bars}$$

Bien entendu, ce processus n'est valable que si l'on ne modifie pas le rapport de la boîte de vitesses et le calibre des buses.

En principe, le réglage de la vanne de retour peut s'effectuer lors d'un test de débit : pour un type de buses donné, il suffit de faire tourner la pompe à son régime nominal et de régler la position de la vanne de retour pour obtenir la pression de référence, en cohérence avec les paramètres de travail : objectif de volume/hectare, vitesse d'avancement...

Afin de ne pas perturber la bonne proportion des débits de retour et de rampes, et donc la valeur de pression, lors de la fermeture de sections de rampes, les constructeurs prévoient, pour chaque tronçon de rampe, des circuits de retour (by-pass) secondaires avec un calibrage équivalent à la somme des débits des buses du tronçon concerné.

Bien qu'ils soient de conception relativement simple, les systèmes DPM ont bénéficié de certaines améliorations parmi lesquelles on peut citer la fiabilité de leur mise en œuvre. A l'origine, le réglage s'effectuait d'après les indications présentées sous forme d'un tableau pour chaque équipement de buses du pulvérisateur, ce qui rendait l'opération fastidieuse. Désormais, sur la plupart de ces systèmes, les constructeurs fournissent des tables ou des abaques qui indiquent la position précise de la vanne de retour selon les paramètres du traitement et les choix des buses. Certaines réalisations sont pourvues d'une console de commande dotée d'une fonction de calcul qui définit le réglage à appliquer en fonction des paramètres de traitement connus.

• Les systèmes DPM à débit de retour réglé :

Les systèmes DPM à débit de retour réglé sont constitués d'un régulateur de débit placé sur le circuit de retour en cuve qui assure la proportionnalité du débit de rampe avec la vitesse d'avancement tout en maintenant la pression de rampe constante lors de l'ouverture et de la fermeture de tronçons de rampes en cours de travail. Prenons l'exemple du régulateur « Bermatic » de Berthoud (fig. 221).

Ce système se compose :

- d'une vanne de pilotage qui laisse passer tout le débit refoulé par la pompe volumétrique actionnée par la prise de force. Cette vanne est réglable de manière à modifier la section de passage du liquide en fonction du calibre et du nombre de buses, du volume/hectare et de la vitesse d'avancement ;

- d'un clapet piloté constitué d'une tubulure profilée de retour en cuve, portée par une membrane souple.

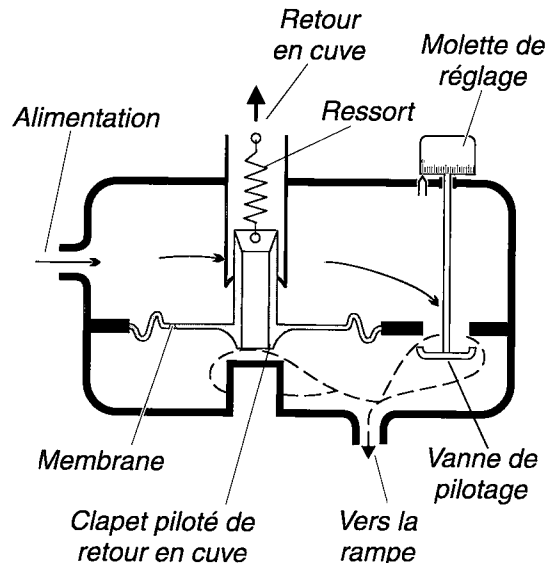


Fig. 221 - Régulateur DPM « Bermatic » de Berthoud (d'après document Berthoud)

L'association de la vanne avec le clapet piloté à membrane est réalisée de manière à créer une perte de charge contrôlée (10 % de la pression aux buses) entre l'amont et l'aval de la membrane. L'amont de la membrane est soumis à la pression du liquide refoulé par la pompe tandis que l'aval est soumis à la pression de la rampe.

Plus la vanne de pilotage s'ouvre, plus la perte de charge est faible, plus la membrane est attirée par son ressort, plus le retour en cuve est important et plus le débit de la rampe est faible. Inversement, le retour en cuve est faible lorsque la vanne est refermée (perte de charge et pression amont plus grandes).

La fermeture d'un ou de plusieurs éléments de rampe déséquilibre momentanément la membrane qui, si aucune variation du régime du moteur n'intervient, reprend une nouvelle position d'équilibre en augmentant le retour en cuve.

En cours de travail, pour un réglage de la vanne et un rapport de la boîte de vitesses donnés, une augmentation ou une diminution du régime du moteur se traduit par une variation proportionnelle, dans le même sens, du régime de la pompe volumétrique et, donc, de son débit. Cette variation de débit se répercute au niveau de la vanne et conduit la membrane à réduire en conséquence le retour en cuve et à augmenter le débit à la rampe selon la même proportion que le régime du moteur.

Le réglage du volume/hectare en fonction de la vitesse d'avancement, la prise de force tournant à 540 tr/min, se fait en agissant sur la vanne en se référant aux indications du constructeur.

• LA RÉGULATION À DÉBIT PROPORTIONNEL À LA VITESSE D'AVANCEMENT (DPA)

La régulation DPA permet la proportionnalité entre le débit aux buses et un seul paramètre, la vitesse d'avancement. Ce mode de régulation permet donc de maintenir le volume/hectare défini malgré les variations pouvant résulter soit de variations du régime moteur, soit de variations de patinage des roues motrices (sous réserve que le signal de vitesse ne soit pas pris au niveau d'une roue motrice). Parmi les diverses solutions, citons les systèmes DPA à **régulation du débit de pompe** et les systèmes DPA à **régulation du débit de retour en cuve**.

• Les systèmes DPA à régulation du débit de pompe :

Les systèmes DPA à régulation du débit de pompe s'appliquent à des pulvérisateurs équipés de pompes volumétriques. La variation de débit est obtenue soit par un dispositif de réglage de la cylindrée de la pompe, soit en agissant sur sa vitesse de rotation. Dans les deux cas, les fonctions de remplissage et de brassage en cuve doivent être assurées par une autre pompe, généralement du type centrifuge.

– **les systèmes DPA à régulation de la cylindrée de la pompe** nécessitent l'emploi de pompes spécialement conçues pour permettre une variation de leur cylindrée, à l'arrêt ou en cours de travail. Le principe de la variation de débit par modification de la cylindrée peut être illustré par le système Volux proposé par la société Berthoud. Ce système est constitué d'une

pompe volumétrique à pistons entraînée par une roue du pulvérisateur, par l'intermédiaire d'une transmission à renvoi d'angle, une boîte de vitesses à deux rapports et un embrayage. La pompe est du type à cylindrée variable par réglage de la course des pistons (fig. 200). La synchronisation de l'entraînement de la pompe avec une roue du pulvérisateur assure la proportionnalité de son débit avec la vitesse d'avancement. Le réglage de la cylindrée de la pompe permet l'ajustement du volume/hectare en fonction de l'objectif de traitement et du type de buses utilisé.

Selon les cas, le réglage de la cylindrée de la pompe peut s'effectuer soit par une intervention manuelle, soit par une action automatique :

- dans le cas d'un réglage manuel, l'opérateur peut intervenir soit avant le traitement en agissant sur le calage des **excentriques**, soit depuis le poste de conduite par l'intermédiaire d'une **console** et une **commande électrique** ou **hydraulique** ;

- dans le cas d'une action automatique, une **unité électronique** assure la fonction de Débit Proportionnel Electronique (DPE) en agissant sur l'actionneur du débit de pompe à partir de la valeur de consignes du volume/hectare entrée par l'opérateur et des informations transmises par des **capteurs** de vitesse d'avancement, de débit ou de pression...

– les systèmes DPA à régulation de la vitesse de rotation de la pompe s'appliquent à des pompes volumétriques à cylindrée fixe dotées d'une transmission à modification du rapport d'entraînement. La modification du rapport d'entraînement s'opère soit par l'intermédiaire d'une transmission à variation continue (variateur à courroie) pouvant être réglée à l'arrêt ou pendant le travail, soit par l'intermédiaire d'une transmission par boîte de vitesses ou par poulies étagées réglées à l'arrêt avant le travail.

Certains pulvérisateurs (surtout des automoteurs) sont dotés d'une fonction DPA par entraînement de la pompe de pulvérisation par un moteur hydraulique à vitesse variable (fig. 222). L'alimentation du moteur hydraulique, et donc sa vitesse, sont contrôlées par une unité électronique qui prend en compte la consigne de volume/hectare entrée par l'opérateur et les informations transmises par des capteurs de vitesse d'avancement et de débit afin de régler en permanence cette vitesse, et donc le débit, de manière proportionnelle à la vitesse d'avancement.

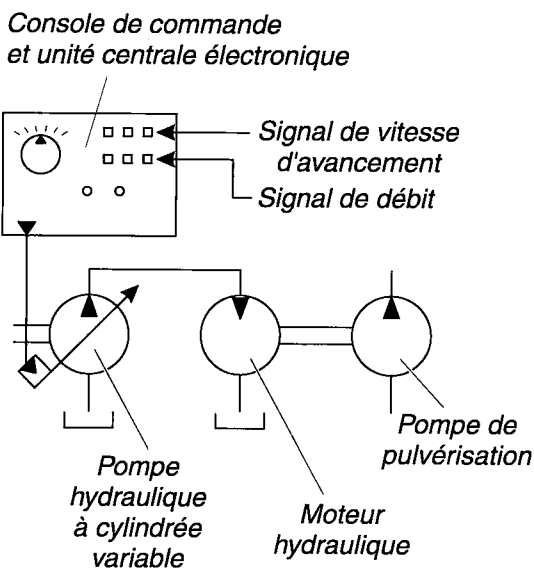


Fig. 222 - Principe d'un système DPA avec une pompe de pulvérisation animée par un moteur hydraulique à vitesse variable

• **Les système DPA par régulation du débit de retour en cuve :**

Les régulations DPA agissant sur le débit de retour en cuve sont des configurations très fréquentes. Leur fonctionnement implique l'utilisation d'une pompe dont le débit est toujours supérieur au débit de pulvérisation. La proportionnalité du débit de pulvérisation avec la vitesse d'avancement est obtenue par un dispositif de contrôle du débit de retour en cuve. Pour un débit de pompe et un calibre de buses donnés, plus la vitesse d'avancement tend à diminuer, plus on ouvre le retour en cuve afin de réduire en conséquence le débit de pulvérisation et maintenir finalement le volume/hectare recherché ; si la vitesse d'avancement tend à augmenter, le système agit en sens inverse.

Cette action a pour conséquence une variation de pression aux buses : la pression de pulvérisation diminue quand la vitesse d'avancement décroît et inversement. Cette remarque permet d'évoquer les limites d'action des systèmes DPA (et DPM aussi d'ailleurs) qui doivent être utilisés dans une fourchette de pression compatible avec la qualité de pulvérisation recherchée. Rappelons qu'une pression trop faible entraîne la formation de grosses gouttes et un nombre réduit d'impacts au cm² tandis qu'une pression trop élevée accroît la proportion de gouttes fines et les risques de dérive.

Toute utilisation d'un système DPA en dehors de la fourchette de pressions optimales révèle un mauvais choix de buses ou une incohérence des paramètres de travail (vitesse d'avancement, volume/hectare...).

Selon les constructeurs et les modèles de pulvérisateurs, la régulation du débit de retour en cuve peut être réalisée de différentes manières. Parmi les nombreuses réalisations, citons la **régulation mécanique centrifuge**, la **régulation hydraulique** et la **régulation électronique**.

– la **régulation mécanique centrifuge** est utilisée sur des pulvérisateurs traînés. Elle consiste à entraîner un régulateur centrifuge à masselottes rotatives par une roue du pulvérisateur (fig. 223) ; ce régulateur agissant sur l'ouverture et la fermeture du clapet de contrôle du retour en cuve. A chaque vitesse d'avancement correspond une position du régulateur et du clapet de

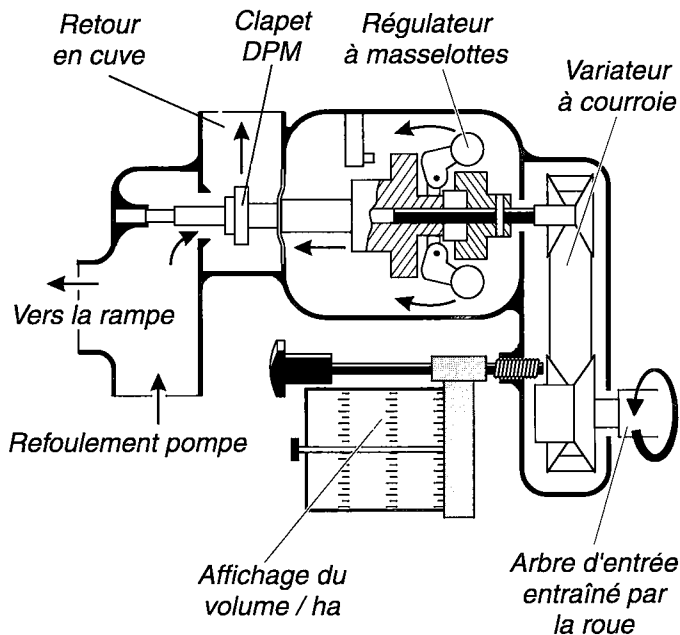


Fig. 223 - **Système DPA à régulation mécanique centrifuge « Volustat » de Caruelle** (d'après document Caruelle)

telle manière que le débit de pulvérisation soit proportionnel à la vitesse d'avancement (ouverture progressive du retour en cuve lorsque la vitesse de travail diminue et inversement si la vitesse augmente). Le régulateur à masselottes est entraîné par un variateur à courroie dont le rapport de transmission est réglable en fonction du volume/hectare recherché et du type de buses utilisé.

– **la régulation hydraulique** (fig. 224) est utilisable sur les pulvérisateurs portés (roue tachymétrique roulant contre une roue motrice arrière du tracteur) et sur les pulvérisateurs traînés (roue tachymétrique roulant sur le sol ou contre une roue du pulvérisateur). Cette roue tachymétrique entraîne une petite pompe hydraulique volumétrique dont le débit est freiné par un limiteur. Les variations de vitesse d'avancement se traduisent par des variations de pression hydraulique qui agissent sur le clapet de retour en cuve : plus la vitesse diminue, plus la pression de pilotage diminue, et plus le clapet ouvre le retour et inversement si la vitesse augmente. Précisons toutefois que la proportionnalité du débit, avec la vitesse d'avancement, n'est pas réelle lorsque le signal est pris sur une roue motrice du tracteur, et si cette dernière a un taux de patinage variable.

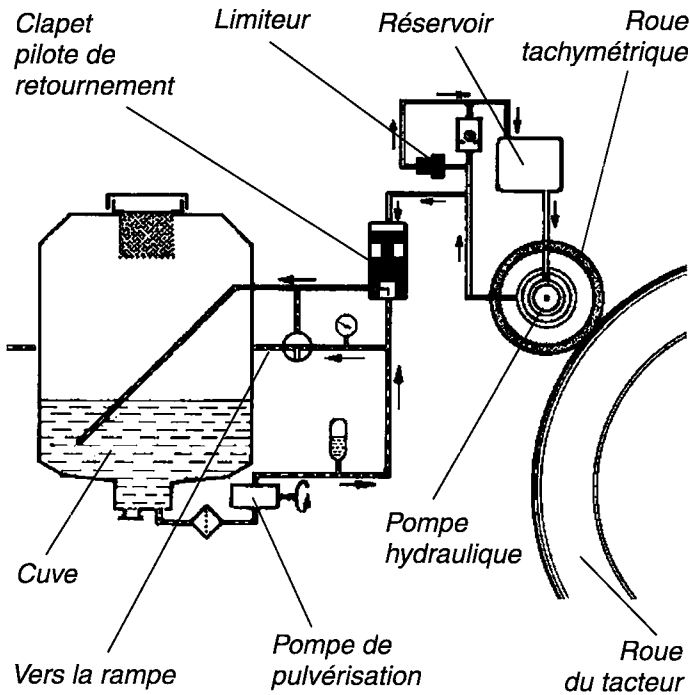


Fig. 224 - **Système DPA à régulation hydraulique Tecnomat**
(d'après document Tecnomat)

• LES SYSTÈMES À RÉGULATION ÉLECTRONIQUE

Les systèmes à régulation électronique appelés aussi DPE (Débit Proportionnel Electronique) consistent à contrôler le retour en cuve par une vanne généralement à boisseau sphérique ou à papillon, commandée par un moteur électrique (fig. 213). L'ensemble constitué par la vanne et son moteur est appelé vanne motorisée ou servo-vanne. Selon les besoins, le moteur de cette vanne est périodiquement alimenté dans un sens ou dans l'autre (ouverture ou fermeture) par une unité électronique qui compare sans cesse la valeur de consigne du volume/hectare entrée par l'opérateur avec l'état des paramètres de traitement mesurés par des capteurs.

Le principe d'une régulation électronique (DPE) peut être résumée de la manière suivante :

Le conducteur entre les paramètres de base sur la console placée dans la cabine (fig. 226 et 227) ; au travail, le système est informé par des capteurs (fig. 225) de vitesse d'avancement, de débit et/ou de pression. En permanence, les grandeurs de débit (et/ou de pression) et de vitesse d'avancement sont mesurées afin que l'unité électronique puisse corriger, pratiquement en temps réel, la position de la vanne de retour. Si la vitesse d'avancement diminue, le système ordonne rapidement l'ouverture de la vanne, ou inversement si la vitesse augmente, afin de maintenir constante la valeur de volume/hectare. L'indication de vitesse d'avancement est mesurée soit par un capteur de roue, soit par un radar :

– dans le cas d'un capteur de roue, ce dernier mesure la vitesse de rotation d'une roue non motrice du tracteur (cas des appareils portés), ou d'une roue du pulvérisateur (cas des appareils traînés). Le dispositif doit alors être configuré en fonction du diamètre de la roue de référence.

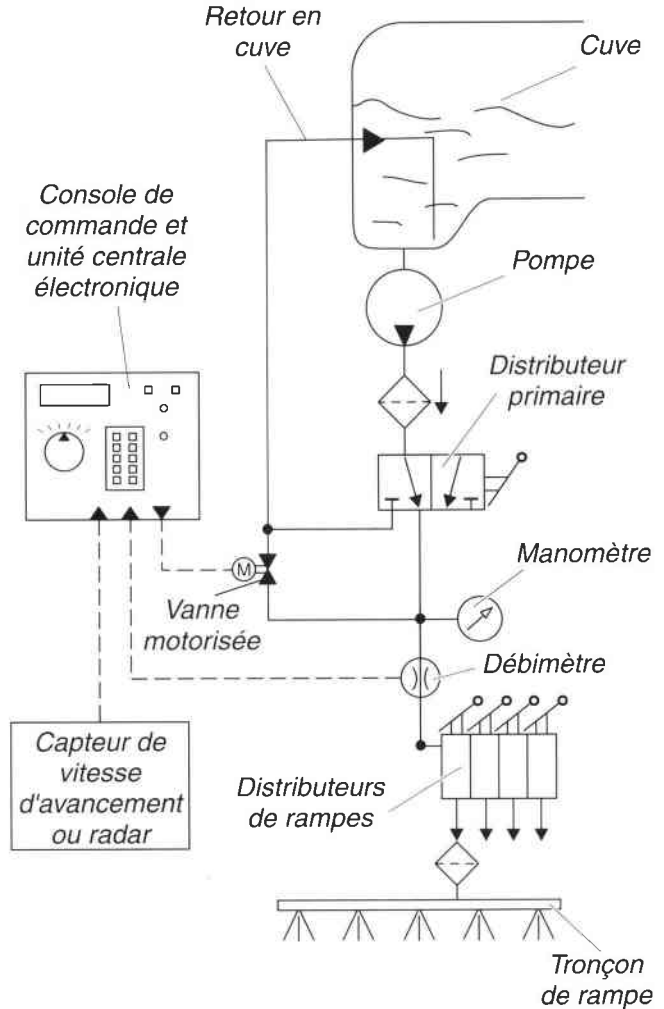


Fig. 225 - Système DPA à régulation électronique (DPAE)

– **dans le cas d'un radar**, l'information obtenue correspond à la valeur réelle de vitesse d'avancement mesurée selon le principe de l'effet Doppler (se reporter dans ce chapitre à la partie consacrée aux capteurs). L'appareil est installé soit sur le tracteur, soit sur le pulvérisateur quand ce dernier est traîné ou automoteur.

Les systèmes de régulation électronique sont le plus souvent accompagnés d'un traitement global des informations et fonctions nécessaires au travail (fig. 226 et 227) : calcul des paramètres de traitement, calcul des données de chantier (surface traitée, cumul des volumes appliqués...).



Fig. 226 - Console de commande Variotec de Tecnomat (photo Tecnomat)



Fig. 227 - Console Gestronic de Berthoud pour la commande des pulvérisateurs et la mémorisation des paramètres de gestion (photo Berthoud)

Selon les équipements, la détermination de la valeur du débit est assurée soit par la mesure de pression, soit par la mesure du débit de pulvérisation.

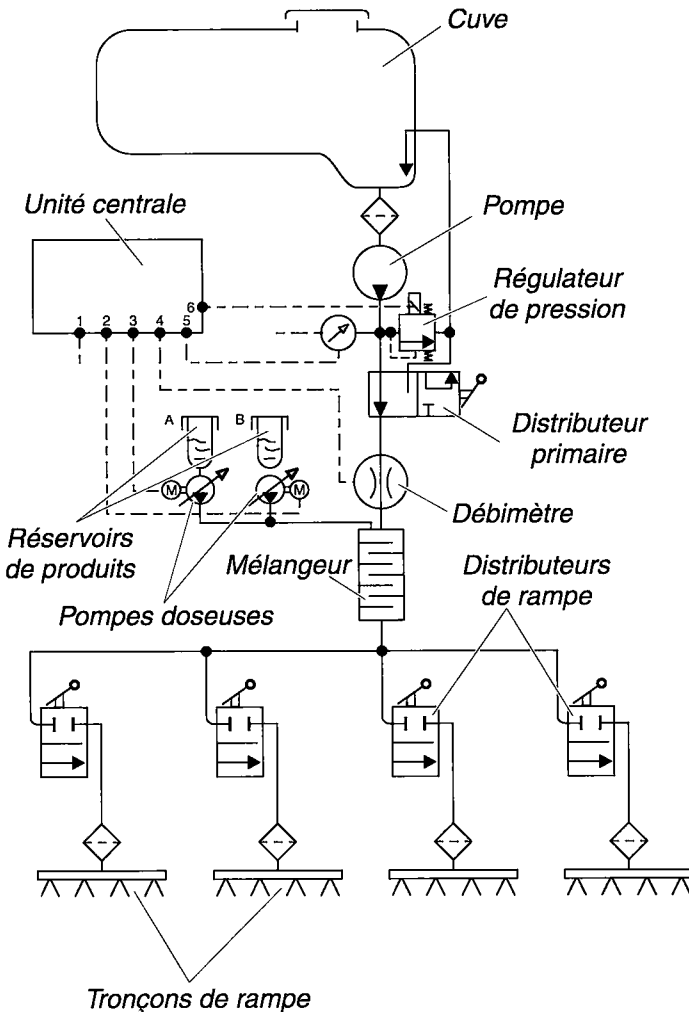
– **Le pilotage de la régulation par la mesure de la pression** est informé par un capteur de pression. La valeur de pression mesurée par ce capteur est convertie en débit en prenant en compte la loi débit/pression des buses utilisées. Ce mode de pilotage se prête mal à la détection du bouchage de buses ou de leur usure ; de plus, il nécessite un étalonnage en fonction de la densité du produit et du type de buses.

– **Le pilotage de la régulation par la mesure du débit** repose sur un capteur de débit placé sur la conduite principale d'alimentation des rampes. Le pilotage de la régulation par le débit présente l'intérêt d'une mesure réelle du débit, en principe indifférente de la densité de la bouillie et capable de détecter un bouchage de buses.

Comme pour les systèmes DPM, l'action de la régulation DPA n'est intéressante que pour répondre à des variations d'amplitude limitées (variation de vitesse d'avancement de + ou – 10 % par exemple) en raison de l'influence très sensible de la pression sur la finesse des

gouttes. Le fait de posséder un appareil équipé d'une régulation DPA ou DPE ne dispense absolument pas l'utilisateur de procéder au choix le plus judicieux possible du calibre des buses dans une fourchette de pression la plus favorable à la qualité de pulvérisation recherchée.

Les fonctions courantes assurées par les consoles de commandes sont le réglage du volume/hectare, les commandes des circuits de rampe, les commandes de repliage et de positionnement des éléments de rampe... Des fonctions de gestion à la parcelle peuvent également être incluses et enregistrées : surface à traiter, volume en cuve, jour et heure, température...



La figure 228 présente de manière schématique l'organisation d'un système de pulvérisation à « **concentration proportionnelle à l'avancement** » (CPA). Cette technique, pas encore répandue en France, consiste à injecter le produit formulé dans l'eau du circuit de pulvérisation, en amont d'un **mélangeur** lui-même situé avant l'alimentation des rampes. La régulation électronique pilote le débit de produit formulé en fonction des variations de vitesse d'avancement.

La gestion différenciée de l'eau et du produit formulé permet de faire varier le volume/hectare de bouillie ou/et sa concentration en fonction de paramètres préalablement programmés. Pour les utilisations collectives (entrepreneurs, CUMA...), ce concept peut aussi faciliter la procédure de changement de produit (rincage) d'une parcelle à une autre, à partir de la réserve d'eau de la cuve.

Fig. 228 - Schéma de principe d'un dispositif de pulvérisation à concentration proportionnelle à l'avancement (CPA)

• LES PRINCIPAUX CAPTEURS UTILISÉS SUR LES PULVÉRISATEURS

Les équipements de pulvérisation font appel à des systèmes électroniques plus ou moins sophistiqués destinés à :

- aider les utilisateurs à définir les paramètres de traitement avec le plus de précision possible,
- informer les utilisateurs, pendant le travail, des conditions de traitement,
- assurer automatiquement le respect du volume/hectare par des fonctions DPM ou DPA.

L'étude détaillée de ces systèmes électroniques dépasse largement le cadre de cet ouvrage ; néanmoins, il est intéressant de connaître le principe des capteurs utilisés afin de mieux comprendre l'utilisation des matériels. Les principaux capteurs équipant les pulvérisateurs peuvent être classés en quatre groupes : **les capteurs de rotation, les capteurs de vitesse d'avancement, les capteurs de débit, les capteurs de pression.**

• Les capteurs de rotation :

La mesure ou la détection des mouvements de rotation peut être réalisée à partir de phénomènes physiques différents ; les plus courants sont les interrupteurs à lame souple, la réluctance variable, les courants de Foucault et l'effet Hall.

– **les capteurs à interrupteur magnétique à lame souple (ILS)** (fig. 229) sont constitués d'une ampoule en verre, contenant un gaz inerte et enveloppant une lame flexible servant d'interrupteur. A chaque fois qu'un aimant mobile passe à proximité de l'« ILS », la lame est attirée et le contact se ferme. L'application la plus classique des interrupteurs à lame souple est la détection d'organes mobiles tournants ou à mouvements alternatifs lorsqu'une liaison sans contact est nécessaire : indicateur de position, contrôleurs de rotation d'arbres ou de roues (des aimants sont fixés sur la jante d'une roue du tracteur ou celle du pulvérisateur).

– **les capteurs inductifs à réluctance variable** (fig. 230) sont placés à proximité d'organes ferromagnétiques mobiles (roue dentée en fer ou en acier par exemple) ; ils sont constitués simplement d'un aimant permanent et d'un bobinage non alimenté. Pendant la rotation de la roue dentée, les variations de flux magnétique dans la bobine créent des courants induits. Très simples et peu coûteux, ces capteurs sont très souvent utilisés comme capteurs de rotation d'arbres.

– **les capteurs inductifs à courants de Foucault** (fig. 231), appelés aussi détecteurs de proximité inductifs, sont utilisés comme capteurs de position ou de vitesse de rotation. Ils se composent essentiellement d'un oscillateur et de bobinages qui génèrent un champ magnétique alternatif. Lorsqu'un écran métallique est placé devant la face sensible du capteur, les courants de Foucault, induits dans l'écran, déséquilibrent l'oscillateur. Après mise en forme de cette information, un circuit de commutation interne délivre un signal de sortie équivalent à un contact à fermeture ou à ouverture. L'avantage des détecteurs inductifs est qu'ils permettent de détecter la présence ou le passage d'une pièce réalisée avec n'importe quel type de métal (aluminium, cuivre, fer...). On trouve des capteurs inductifs pour mesurer des vitesses d'avancement (placé à proximité d'une roue non motrice, le capteur « compte » les boulons de la jante et donne l'information de la vitesse théorique d'avancement), ou pour mesurer la vitesse des turbines de capteurs de débit.

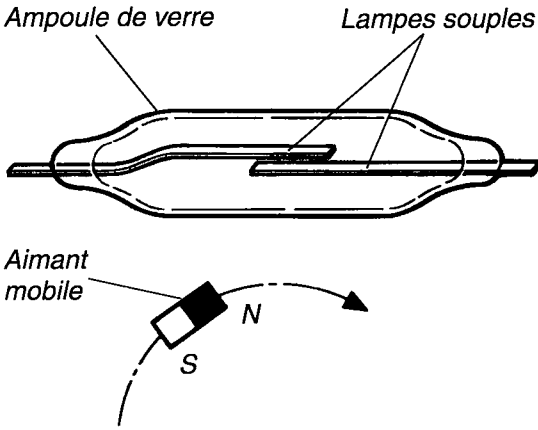


Fig. 229 - Capteur à lame souple

Fig. 230 - Capteur à réluctance variable

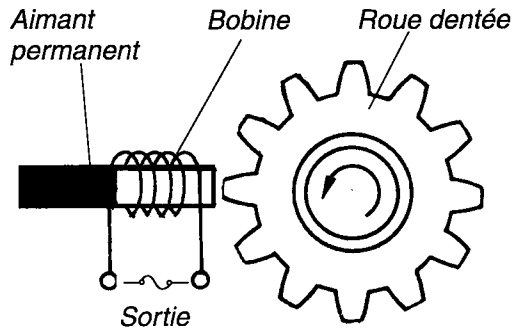
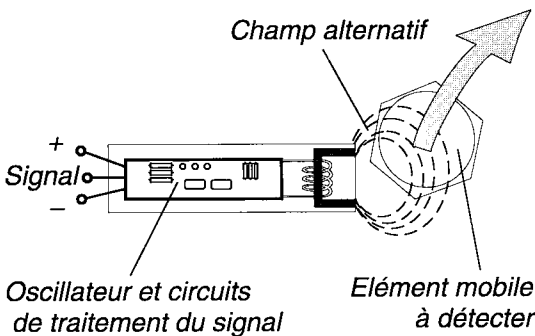


Fig. 231 - Principe d'un capteur inductif à courants de Foucault



– les capteurs à effet Hall (fig. 232) doivent leur nom au physicien qui a observé l'effet correspondant à l'apparition d'une tension perpendiculaire au sens du courant, sur une plaquette semi-conductrice placée dans un champ magnétique. Cette tension est proportionnelle au produit du champ magnétique par le courant. Habituellement utilisé pour mesurer les champs magnétiques, l'effet Hall peut servir à l'élaboration de capteurs capables de détecter des plots magnétiques mobiles fixés sur des organes tournants : voile de roue, arbre de transmission...

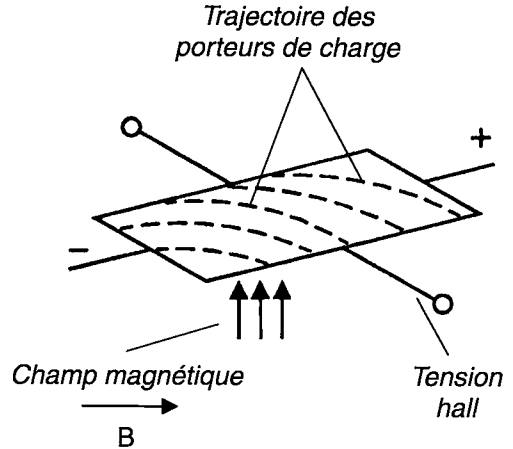


Fig. 232 - Principe de l'effet Hall

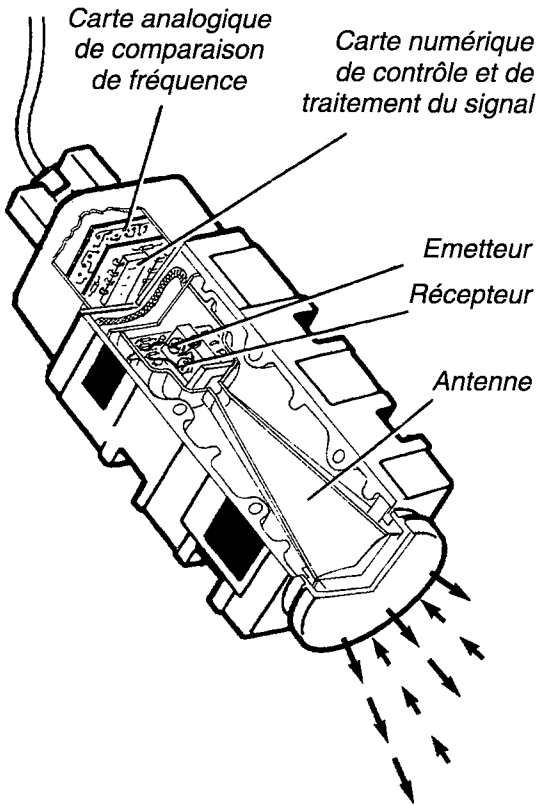


Fig. 233 - Principe d'un radar à effet Doppler Dickey-John

• **Les capteurs de vitesse d'avancement :**

Les capteurs de vitesse de déplacement sont, dans le cas le plus simple, des capteurs de rotation tels que ceux qui sont décrits ci-dessus, qui mesurent par exemple la vitesse de déplacement d'un véhicule en comptant la rotation des roues des tracteurs ou des pulvérisateurs. Ces capteurs sont seulement capables de donner une indication de vitesse d'avancement théorique, dans la mesure où le système qui analyse leurs signaux doit être informé du diamètre de roulement de la roue surveillée et que cette roue ne patine pas. Pour la mesure des vitesses réelles d'avancement, les constructeurs équipent les tracteurs ou les engins automoteurs de **radar à effet Doppler** (fig. 233). La mesure des vitesses par radar est obtenue par l'émission continue d'ondes hyperfréquence. Le phénomène utilisé pour cette mesure est fondé sur l'effet Doppler-Fizeau qui peut se résumer de la manière suivante : s'il existe un mouvement relatif entre un émetteur d'onde et un observateur, la fréquence de l'onde perçue est différente de la fréquence

émise. Après un traitement électronique adéquat, la comparaison de ces fréquences est traduite en vitesse d'avancement. La figure 233 montre la coupe d'un radar Dickey-John très utilisé sur les tracteurs et fonctionnant à une fréquence de 24,125 GHz. Il est constitué d'une section radio-fréquence qui comporte une antenne en forme de cornet et un émetteur récepteur micro-ondes. Tous les composants de l'émetteur et les différents circuits sont logés dans un moulage étanche, non accessibles à l'utilisateur.

• **Les capteurs de débit :**

Les capteurs de débit des pulvérisateurs sont utilisés sur le circuit de pulvérisation pour mesurer le débit des rampes et parfois sur la conduite de remplissage de la cuve pour mesurer le volume de chargement. Ces capteurs de débit sont généralement constitués (fig. 234) d'une petite **turbine** axiale mise en rotation par le liquide. La vitesse de rotation de cette turbine est fonction du débit ; elle est mesurée soit par un capteur à inductance variable (cas d'une turbine en métal ferromagnétique revêtue de Téflon par exemple), soit par un capteur inductif à courants de Foucault (cas d'une turbine en Inox). Ces débitmètres sont des organes de précision qu'il convient de traiter avec soin ; pour résister à l'abrasion et aux agressions chimiques, les axes peuvent être en acier allié au tungstène et les paliers en céramique.

• **Les capteurs de pression :**

Les capteurs de pression peuvent être basés sur des phénomènes physiques très divers. Parmi les différents capteurs de pression utilisés sur les pulvérisateurs, citons **les capteurs piézo-électriques et les capteurs à jauges de contraintes.**

– **les capteurs piézo-électriques** fonctionnent selon le principe du « cristal piézo-électrique » : certains cristaux (quartz par exemple) soumis à une contrainte mécanique ont la particularité de générer une charge électrique (fig. 235). Plus la contrainte de pression agissant sur l'armature-support est élevée, plus le « signal » électrique de détection est grand.

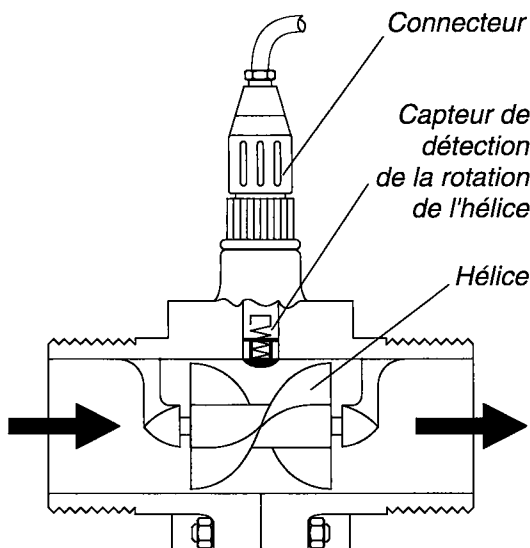


Fig. 234 - Principe d'un capteur de débit

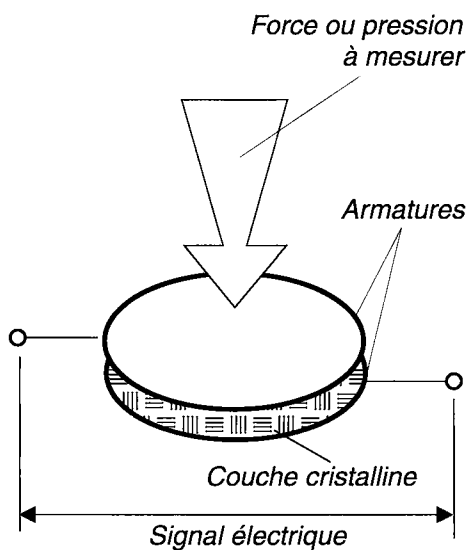


Fig. 235 - Principe d'un capteur piézo-électrique

– les capteurs à jauges de contraintes (fig. 236) sont basés sur le principe suivant : une pièce mécanique soumise à des contraintes (sous l'effet d'une force ou d'un couple) se déforme faiblement. On appelle jauge de contrainte le dispositif qui permet de mesurer ces très faibles déformations. Une jauge de contrainte élémentaire à fil résistant est constituée d'un fil conducteur électrique, placé sur la pièce parallèlement à la contrainte (F). L'allongement du fil suit les variations de longueur (ΔL) de la pièce, et la résistance (R) est proportionnelle à la longueur du fil de la jauge, selon la relation :

$$R = \sigma \frac{L}{S}$$

σ : résistivité
 L : longueur
 S : section

La variation de la résistance (ΔR) est aussi proportionnelle à la variation de longueur (ΔL) de la jauge :

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad \text{et} \quad F = k \frac{\Delta R}{R} = k.K \frac{\Delta L}{L}$$

La mesure de $\frac{\Delta R}{R}$ se fait par un pont de Wheatstone.

En pratique, une jauge de contrainte comprend quatre résistances de mesures montées en pont de Wheatstone et collées sur la structure à étudier (fig. 236).

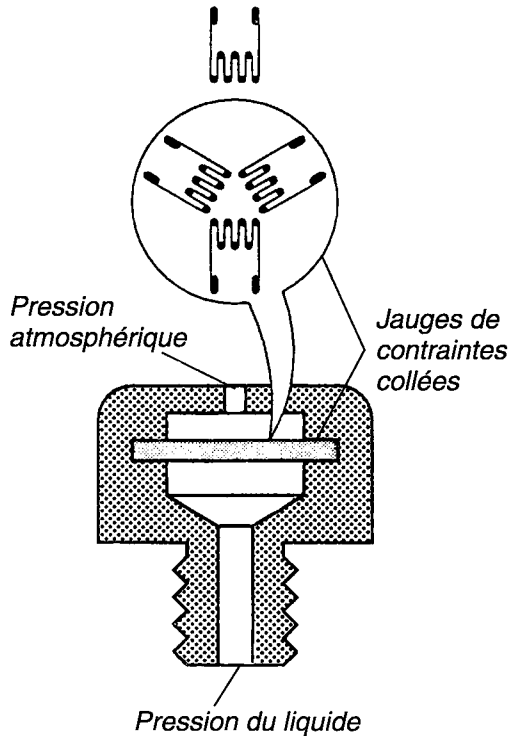


Fig. 236 - Principe d'un capteur de pression à jauges de contraintes

LES RAMPES

Dans le langage courant, le terme rampe définit l'ensemble comprenant les conduites où sont raccordées les porte-buses et la structure repliable qui leur sert de support.

La figure 237 montre le schéma simplifié d'un montage de rampe sans dispositif de stabilisation qui comprend :

- un **portique** fixe, dont les montants verticaux sont solidaires du châssis,
- un **cadre-support** qui peut coulisser verticalement contre le portique,
- le **bâti central** de la rampe avec les articulations latérales qui constituent l'axe de repliage des demi-rampes.

Pour plus de clarté, nous retiendrons quatre niveaux de description : **les différentes structures de rampes, les dispositifs de réglage de la hauteur, les dispositifs de stabilisation des rampes, les canalisations et les porte-buses.**

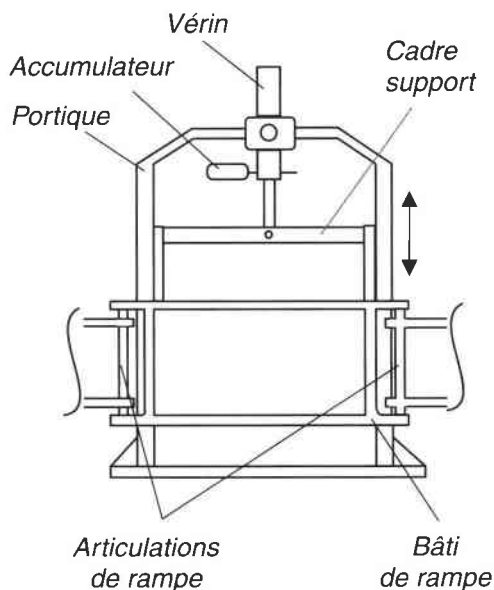


Fig. 237 - Exemple d'un montage de rampe sans dispositif de stabilisation

• LES DIFFÉRENTES STRUCTURES DE RAMPES

La largeur des rampes est en relation avec le relief du terrain, la surface des parcelles et la largeur de travail des équipements de semis. L'utilisation des rampes de grande largeur (plus de 24 mètres) est, en principe, réservée aux grandes parcelles de plaine.

Les principales préoccupations des concepteurs de rampes de pulvérisation peuvent être résumées de la manière suivante :

- réaliser des rampes dont la stabilité verticale et horizontale soit la meilleure possible afin d'éviter les variations de répartition transversale et longitudinale de la pulvérisation. Une mauvaise stabilité ou une trop grande flexibilité conduit, par exemple, à des mouvements aléatoires, préjudiciables à une bonne répartition de la pulvérisation ;
- adopter une structure et des matériaux susceptibles de limiter le poids, surtout sur les matériels portés : une rampe en acier de 18 mètres peut, par exemple, peser plus de 350 kg ;

- parvenir à une résistance suffisante pour éviter les déformations permanentes pouvant résulter de chocs au cours du travail. Les rampes peuvent être munies, à chaque extrémité, d'une béquille ou d'un patin de protection qui évite leur contact (et celui des buses) avec le sol ;
- disposer d'une protection contre les chocs en cas de contact avec un obstacle (clôture, haie, poteau...). Les éléments terminaux des rampes disposent souvent d'un système d'effacement ;
- permettre un positionnement précis des supports de buses et maintenir les conduites.

Bien entendu, ces exigences sont d'autant plus difficiles à tenir que la largeur des rampes est importante. Parmi les nombreuses variantes de conception des structures, citons les rampes à structure en acier, les rampes à structure en alliage léger et les rampes à structure en matériaux composites.

• Les rampes à structure en acier :

Les rampes en acier sont les plus courantes. A l'exception des petites rampes (moins de 12 mètres) qui sont généralement constituées d'une barre horizontale soutenue par un tirant métallique ou un câble, les rampes sont réalisées par assemblage mécano-soudé d'éléments profilés divers (carrés, rectangles, tés, U, cornières...) ou de tubes. Malgré l'adoption de structures triangulées pour assurer une rigidité suffisante avec le moins possible d'éléments lourds, les rampes en acier peuvent atteindre un poids important : de 120 à 200 kg pour une largeur de 12 m, de 200 à 230 kg pour une largeur de 16 m, de 600 à 750 kg pour une largeur de 24 m, de 1350 à 1650 kg pour une largeur de 36 m...

Comme pour les autres éléments métalliques des pulvérisateurs, les rampes sont protégées contre la corrosion par des revêtements et des peintures résistant aux agressions chimiques. Cela dit, la durée de vie de ces revêtements dépend de leur entretien qui consiste à laver les matériels régulièrement pour éviter l'accumulation de produits corrosifs, surtout pendant les périodes de remisage.

• Les rampes à structure en alliage léger :

Les rampes en alliage léger peuvent remplacer les rampes en acier sur les matériels de grande largeur et les pulvérisateurs automoteurs. Elles sont constituées d'un assemblage triangulé de tubes (fig. 238) ou de profilés soudés. L'utilisation d'alliages d'aluminium anodisés permet de fabriquer des rampes dont le poids est environ la moitié plus faible que celui des rampes en acier. L'anodisation est un traitement électrolytique qui améliore la résistance des surfaces à l'oxydation et aux agressions chimiques. Comme tous les organes des pulvérisateurs, les rampes en alliage léger doivent être lavées régulièrement pour limiter l'action des produits corrosifs.

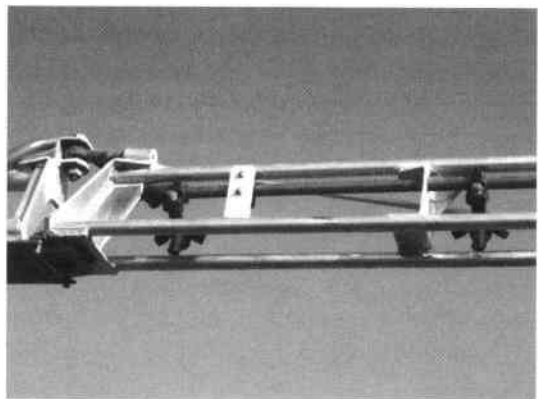


Fig. 238 - Vue partielle d'une rampe en alliage léger (photo Cemagref)

- **Les rampes à structure en matériaux composites :**

Les rampes à structure en matériaux composites ont été utilisées par certains constructeurs. Il s'agit de structures en forme de caissons ou de treillis creux à base de résines synthétiques armées de fibres de carbone...

- **Les rampes de pulvérisation à assistance d'air :**

Certains matériels sont équipés de rampes à assistance d'air de la pulvérisation. Ces rampes, équipées de buses à pression de liquide, portent des **manches souples** ou des **conduites** qui apportent l'air destiné à assister la pulvérisation lors de son trajet buse-plante.

La pulvérisation à jet projeté dirigé par un courant d'air est apparue vers la fin des années 80 pour réduire les difficultés de pulvérisation qui peuvent résulter d'une dérive des gouttelettes fines à cause d'une vitesse d'avancement élevée et/ou d'un vent ambiant important.

La structure du pulvérisateur reçoit un ventilateur à très grand débit et des manches souples (en toile plastifiée) qui canalisent le flux d'air sous pression en formant un rideau d'air derrière les jets de pulvérisation. Ce rideau d'air canalise les fines gouttelettes vers la végétation et agite les feuillages en augmentant la pénétration des gouttes.

Parmi les matériels existants, citons le « Sleeve Boom » de Degania, le « Twin » de Hardi (fig. 239 et 240) et le système « Air Plus » de RAU (fig. 241).

Il existe aussi des rampes munies de buses pneumatiques à tuyères comme celles que l'on rencontre sur les appareils pneumatiques utilisés en viticulture. La veine d'air réalise alors la fragmentation des gouttes et favorise le trajet buse-plante. Ce concept est proposé en France par les sociétés Danfoil et Buisset (Robot-Car).

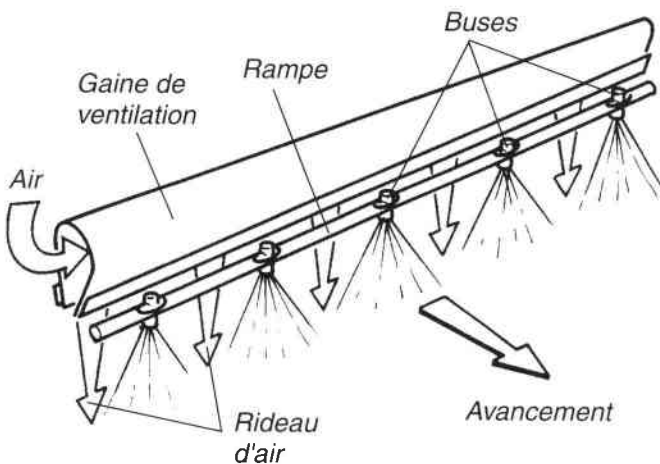


Fig. 239 - Principe du système « Twin » de Hardi



Fig. 240 - Vue partielle d'une rampe « Twin » de Hardi (photo Hardi)

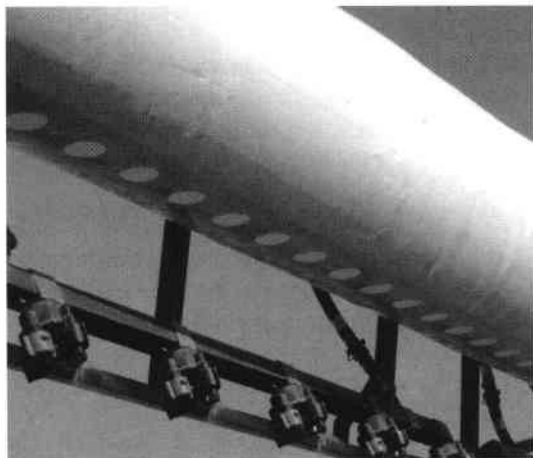


Fig. 241 - Vue partielle du système de rampe « Air Plus » de RAU (photo Cemagref)

• LES DISPOSITIFS DE RÉGLAGE DE LA HAUTEUR DES RAMPES

Les pulvérisateurs doivent s'adapter aux différents modes de traitement et aux différents stades d'intervention sur les cultures. Cette adaptabilité indispensable nécessite de disposer d'un système de réglage de la hauteur des rampes par rapport au sol (ou par rapport au plan-cible de la culture à traiter).

Le réglage de la hauteur des rampes peut être assuré à l'aide d'un treuil manuellement, ou d'un vérin hydraulique.

• Le réglage manuel par treuil :

Le réglage manuel par treuil à manivelle est le plus souvent réservé au réglage des rampes de largeur inférieure à 15 mètres. Le treuil est fixé sur le cadre-support. Celui-ci est suspendu au portique par l'intermédiaire d'un câble ancré sur le portique et enroulé sur le moyeu du treuil. Selon les cas, le guidage du câble peut être assuré par une ou plusieurs poulies. Lorsque l'utilisateur agit sur la manivelle du treuil pour relever la rampe, le point d'ancrage reste fixe et l'ensemble treuil-cadre se soulève. Souvent un ressort amortisseur est inséré entre l'extrémité du câble et le point d'ancrage afin d'amortir les secousses verticales. Des broches-butées permettent de limiter la course descendante du cadre. Le mécanisme doit être conçu de manière à ce que l'effort de commande ne dépasse pas 250 N.

Attention ! L'accès au treuil et sa manœuvre présentent une zone dangereuse de cisaillement des mains et des bras de l'utilisateur. Les treuils doivent comporter un cran anti-retour et un frein de repos. Veiller au bon état du treuil, du câble et de ses points d'ancrage.

• Le réglage de la hauteur des rampes par vérin hydraulique :

Le réglage de la hauteur des rampes par vérin hydraulique (fig. 242) est une formule très répandue. Le vérin, commandé depuis le poste de conduite, est très souvent associé à un accumulateur oléo-pneumatique (fig. 242) qui joue le rôle d'amortisseur.

Selon les cas, le vérin est inséré soit directement entre le cadre et le bâti central des rampes, soit indirectement par l'intermédiaire d'un câble et d'une ou deux poulies de renvoi, soit encore dans un parallélogramme déformable. La suspension verticale peut aussi être assurée mécaniquement par un système de ressort.

Certains pulvérisateurs peuvent être équipés d'un **contrôle automatique de la hauteur**. Dans ce cas, le **vérin de relevage** de la rampe est alimenté par un **électro-distributeur**, lui-même commandé par une **unité électronique** qui compare la valeur de consigne de hauteur entrée par le conducteur avec les informations émises par des **capteurs à ultra-sons** (fig. 244). Ces capteurs, fixés de chaque côté de la rampe, sont configurés pour mesurer la distance qui les sépare du sol. Cet automatisme est généralement associé à un système de stabilisation active de la rampe.

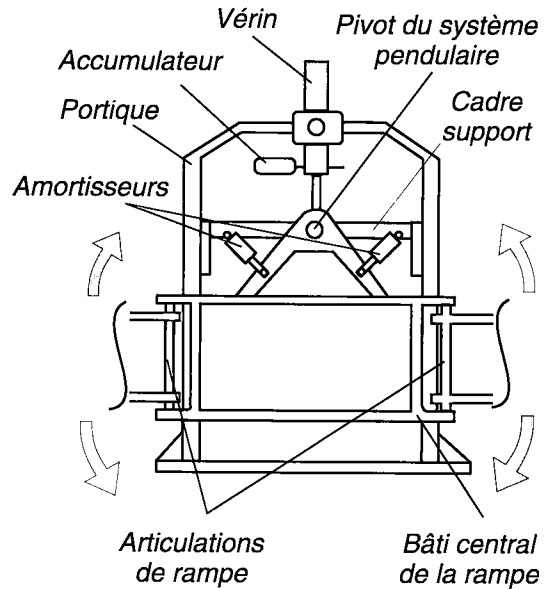


Fig. 242 - Dispositif de stabilisation pendulaire d'une rampe

• LES DISPOSITIFS DE STABILISATION DES RAMPES

Lors des traitements, les pulvérisateurs sont soumis aux irrégularités du terrain, aux effets d'inertie causés par les changements de trajectoire et les mouvements du liquide dans la cuve. De plus, pour les appareils traînés, les mouvements de la rampe sont influencés par ceux du timon et de l'essieu dont la voie des roues est étroite par rapport à la largeur de la rampe.

Compte tenu de leur largeur relativement importante de part et d'autre de l'axe d'avancement des pulvérisateurs, et de leur flexion, les rampes amplifient les à-coups verticaux et transversaux. Ces mouvements de plus ou moins grande amplitude présentent deux inconvénients importants :

- ils génèrent une pulvérisation irrégulière et mal répartie (transversalement et longitudinalement),
- ils sont la source de contraintes importantes qui fatiguent les rampes, les articulations et leur fixation, à tel point qu'il peut y avoir, à terme, des déformations permanentes ou des risques de ruptures.

Pour ces raisons, la fixation des rampes comprend généralement un dispositif d'**amortissement** et de **stabilisation** et, le cas échéant, une commande de **correction de dévers** qui permet de conserver le parallélisme des rampes par rapport au sol lors des traitements en dévers. Le rôle de ces dispositifs est d'autant plus crucial que la tendance est à l'accroissement des vitesses d'avancement au travail.

La stabilisation des rampes consiste à amortir les secousses et à limiter les oscillations sur les plans vertical et transversal, et dans le sens de l'avancement.

Pour les pulvérisateurs traînés et automoteurs, des constructeurs se sont engagés vers de nouvelles solutions basées sur des pulvérisateurs dotés d'une **suspension** entre les roues et le châssis.

• **L'amortissement :**

L'amortissement est essentiellement assuré, dans l'axe vertical, par un mécanisme de suspension soit intégré au système de réglage de hauteur (ressort, accumulateur hydraulique...), soit obtenu par des butées élastiques à ressorts, Silentbloks, coussins pneumatiques...

• **La stabilisation verticale et transversale :**

La stabilisation des rampes est réalisée, selon les constructeurs, par des mécanismes très variés faisant souvent appel à diverses astuces mécaniques qu'il n'est pas possible de décrire ici de manière exhaustive. Les réalisations les plus courantes peuvent être classées en trois catégories : **les systèmes de stabilisation pendulaires, les systèmes à biellettes et les systèmes à stabilisation active.**

– **les systèmes de stabilisation pendulaires (fig. 242)** sont conçus de manière à ce que le bâti central de la rampe soit suspendu au cadre-support par une articulation supérieure centrale. La position angulaire de la rampe (par rapport au châssis) est alors indépendante des oscillations transversales du pulvérisateur au travail, avec néanmoins un déport latéral de celle-ci par rapport à l'axe d'avancement du pulvérisateur. Les mouvements de la rampe sont amortis par un amortisseur hydraulique comparable aux amortisseurs des suspensions d'automobiles.

La stabilisation pendulaire est donc caractérisée par l'autopositionnement angulaire de la rampe à la position horizontale ; cela est dû au fait que le centre de gravité de la rampe, situé très en dessous de son point de pivotement, tend à rester dans un plan vertical.

Pour les traitements en dévers, le système de stabilisation est verrouillé ou corrigé soit par des butées latérales actionnées hydrauliquement, soit en déplaçant la position de l'articulation par un vérin hydraulique.

– **les systèmes de stabilisation à biellettes** simples ou doubles (fig. 243), appelés aussi à trapèzes déformables, sont des mécanismes souvent utilisés. Dans le cas le plus simple, le bâti central est suspendu au cadre-support par deux biellettes inclinées en position divergente (divergence vers le bas) ou convergente. Sur les terrains sans dévers, ce montage atténue la transmission des oscillations du châssis du pulvérisateur vers la rampe et favorise

le rappel de la rampe en position normale. Lors des à-coups transversaux, ce processus de stabilisation se traduit par un déport momentané (de 5 à 15 cm environ) de la rampe par rapport au portique. Pour les traitements en dévers, le parallélisme de la rampe avec le sol ne peut être obtenu qu'en verrouillant le mécanisme ou en modifiant la position des biellettes pour empêcher leur débattement. Certains montages utilisent le principe de la stabilisation à biellettes sur deux étages (fig. 243) ; cette disposition permet d'obtenir une plus grande amplitude de débattement de la rampe et d'absorber des inclinaisons plus importantes au cours du travail. Les rampes à biellettes peuvent être montées sur un système pendulaire. Cette disposition permet de combiner les caractéristiques des deux systèmes.

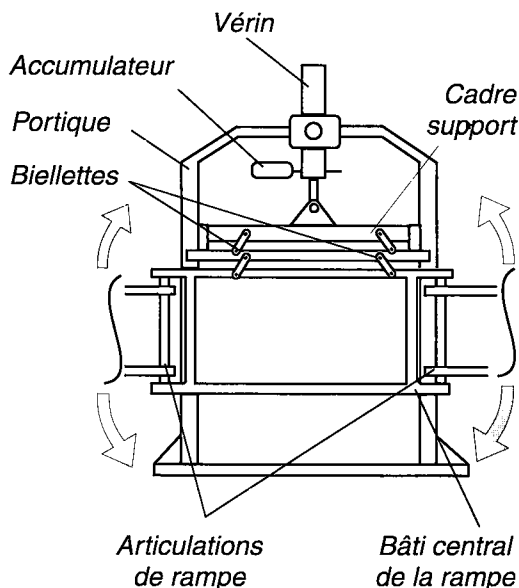


Fig. 243 - Dispositif de stabilisation d'une rampe par deux niveaux de biellettes

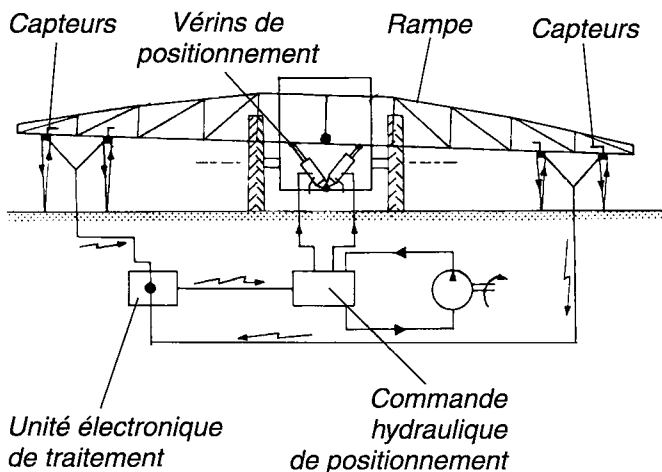


Fig. 244 - Principe d'un système de correction automatique

– les systèmes à correction active (fig. 244).:

Il s'agit de systèmes qui maintiennent automatiquement la rampe dans une position parallèle au sol. Dans ce cas, la rampe est maintenue en position par des vérins alimentés par des **électro-distributeurs** commandés par une **unité électronique** qui reçoit les informations fournies par des **capteurs à ultrasons**. Ces capteurs, fixés de chaque côté de la rampe, permettent au système électronique de comparer en permanence les variations de hauteur gauche-droite et d'ordonner l'alimentation du ou des vérins de compensation de manière à corriger l'os-

cillation transversale qui est à l'origine de la différence de hauteur détectée. Selon les cas, en plus **du pilotage de la position de rampe** en fonction des débattements transversaux du pulvérisateur, ce système peut permettre une **correction automatique du dévers** et un **contrôle automatique de la hauteur** de la rampe au travail.

- **La limitation des mouvements dans le sens de l'avancement :**

La limitation des mouvements dans le sens de l'avancement est parfois adoptée pour des pulvérisateurs équipés de rampes lourdes et de grande largeur afin d'amortir les débattements des rampes dans le plan horizontal et pour réduire les contraintes mécaniques sur les châssis des pulvérisateurs. Parmi les systèmes utilisés, citons les amortisseurs hydrauliques, les amortisseurs élastiques du type Silentbloc et les amortisseurs pneumatiques.

- **Les systèmes de suspension des pulvérisateurs :**

Les systèmes de suspension des pulvérisateurs présentent l'avantage de limiter la transmission des oscillations des roues vers l'ensemble du pulvérisateur et donc vers les rampes. Les suspensions utilisées sur les pulvérisateurs traînés et automoteurs sont généralement des suspensions à ressorts hélicoïdaux ou des ensembles vérins-accumulateurs hydrauliques. La particularité des mécanismes de suspension des pulvérisateurs est qu'**il est indispensable de maintenir la hauteur des rampes par rapport à la végétation, quel que soit le poids de bouillie contenu dans la cuve**. La figure 245 montre le dispositif Axair de Tecnoma ; dans ce système, l'essieu du pulvérisateur est relié au châssis par l'intermédiaire de ressorts à lames. A l'une de leur extrémité, ces lames de ressort s'appuient contre un coussin pneumatique à volume réglable. La hauteur de chaque coussin pneumatique est mesurée par une tringlerie qui commande une valve de mise à niveau. Cette valve de mise à niveau module le volume d'air comprimé dans les coussins de manière à assurer une hauteur constante du châssis, malgré les variations de charge de la cuve. L'air comprimé, fourni par un petit compresseur électrique, est stocké dans un réservoir.

- **LE REPLIAGE DES RAMPES**

Compte tenu des largeurs de traitement (de 9 à 42 mètres), les rampes des pulvérisateurs sont toujours repliables afin de permettre les déplacements sur route. Parmi les différentes solutions de repliage, citons le repliage arrière et le repliage latéral :

– **le repliage arrière** concerne généralement les rampes de moins de 15 mètres. Il s'effectue le plus souvent manuellement.

– **le repliage latéral** est fréquemment utilisé pour les rampes de 15 à 42 mètres. Selon les cas, le repliage des éléments s'effectue dans un plan horizontal ou dans un plan oblique. Le repliage latéral est généralement actionné par des vérins hydrauliques commandés depuis le poste de conduite. Afin d'éviter des contraintes excessives sur les supports de rampes, les opérations de repliage et de dépliage nécessitent en principe le verrouillage préalable du dispositif de stabilisation et la commande simultanée des éléments droit et gauche.

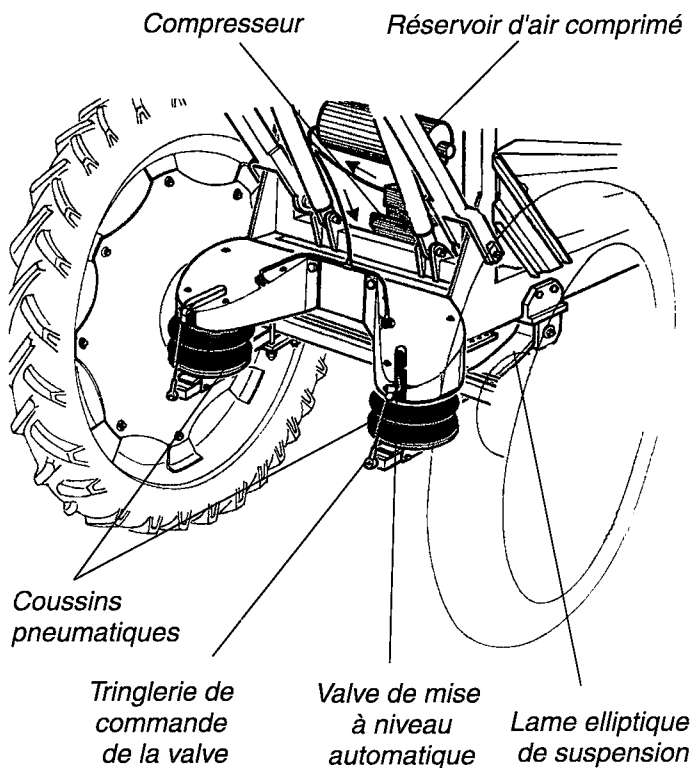


Fig. 245 - Principe de la suspension Axair de Tecnomatix (d'après document Tecnomatix)

Certaines rampes à repliage latéral sont constituées d'éléments télescopiques.

Avec les appareils à repliage des rampes dans le plan vertical, il convient de ne jamais réaliser le dépliage ou le repliage à proximité des lignes électriques basse, moyenne ou haute tension.

• LES CANALISATIONS ET LES PORTE-BUSES :

Les porte-buses de pulvérisation sont raccordés à des conduites maintenues et protégées par la structure de la rampe. Ces conduites sont parfois en matière plastique souple ou, le plus souvent, en matériau synthétique rigide, en alliage d'aluminium ou en acier inoxydable. Les conduites en plastique sont relativement bon marché, mais leur résistance mécanique est limitée ; les conduites métalliques ont une résistance mécanique plus grande, mais sont plus coûteuses : les alliages d'aluminium ont l'avantage d'être légers tandis que l'acier inoxydable, plus lourd, est pratiquement insensible aux agressions chimiques.

Les conduites sont divisées en sections ou tronçons de rampe alimentés séparément par un élément du système de distribution. Cette division de la rampe en tronçons permet de réduire les effets des pertes de charge (pression également répartie sur toute la largeur) et de modifier les largeurs de pulvérisation lors des traitements en bordures. A chaque articulation des éléments de la rampe, les conduites de pulvérisation sont raccordées par des tuyaux flexibles qui permettent les opérations de pliage et de dépliage des éléments de rampe. La figure 246 montre deux dispositifs antigoutte. Ces dispositifs permettent une coupure franche de la pulvérisation sans risque de vidange du volume de bouillie contenu dans les conduites en amont des buses.

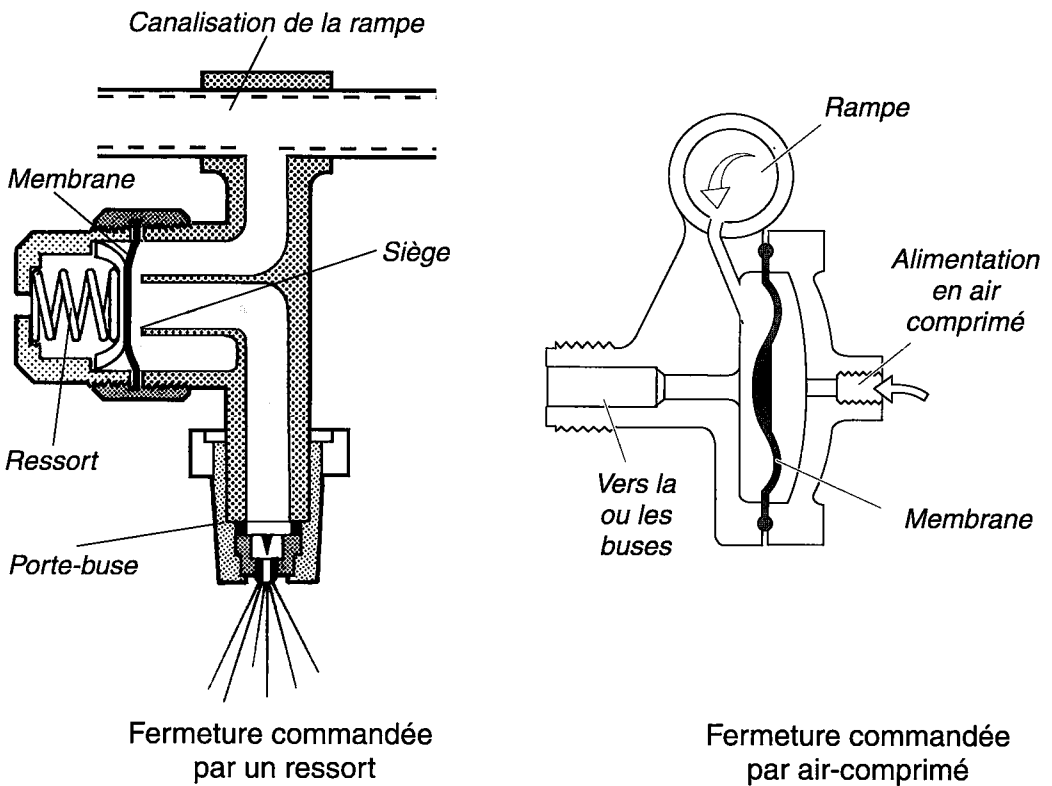


Fig. 246 - Dispositifs antigoutte

Typologie des différentes structures végétales et des modes de pulvérisation	298
Les pulvérisateurs à jet projeté	299
Les pulvérisateurs à jet porté	301
– À flux radial	304
– À flux radial et à flux descendant	304
– À flux tangentiel	305
– À flux orientable et/ou adaptable	305
Les pulvérisateurs pneumatiques	306

• TYPOLOGIE DES DIFFÉRENTES STRUCTURES VÉGÉTALES ET DES MODES DE PULVÉRISATION

Les équipements adaptés à la viticulture et à l'arboriculture se distinguent des appareils utilisés en grande culture par la structure différente des végétaux à traiter.

– **en grande culture**, la pulvérisation des bouillies est généralement appliquée en couverture généralisée (couverture totale) sur le sol ou sur la végétation. On utilise des pulvérisateurs à rampes horizontales, à pression de liquide et à jet projeté (se reporter au chapitre 8 à la partie consacrée aux *pulvérisateurs à jet projeté à rampes...* ;

– **en viticulture**, la pulvérisation est dirigée vers une structure végétale verticale, en lignes plus ou moins hautes (de 1 à 2 mètres selon la conduite pratiquée : vignes en gobelets, vignes palissées...). L'espacement entre rangs permet soit de circuler entre les lignes avec des tracteurs et des **pulvérisateurs portés** ou **traînés**, soit de chevaucher les lignes avec des **tracteurs enjambeurs** ou des **porte-outils** servant aussi de base à des machines à vendanger, soit avec des **pulvérisateurs automoteurs**. Les techniques de pulvérisation utilisées, selon les cas, sont :

– **à jet projeté** : la fragmentation de la bouillie est réalisée par la pression du liquide dans des buses et le transport des gouttes est assuré par leur énergie cinétique propre,

– **à jet porté** : la fragmentation de la bouillie est obtenue par pression du liquide dans des buses et le transport des gouttes est assuré par un courant d'air,

– **pneumatique** : la fragmentation de la bouillie est obtenue par friction du liquide avec une veine d'air à grande vitesse qui assure aussi le transport.

La pulvérisation à jet projeté est surtout utilisée lorsque la distance qui sépare les buses de la structure végétale est inférieure à 0,60 m environ avec une faible épaisseur de végétation. Lorsqu'un "mouillage" important du feuillage est nécessaire ou lorsque la distance de la cible végétale est plus éloignée, on utilise la pulvérisation à jet porté ou la pulvérisation pneumatique.

– **en arboriculture**, on distingue les vergers conduits en haies fruitières de ceux qui sont constitués d'arbres de hautes tiges (cerisiers, pruniers, pommiers...) ou de très hautes tiges qui peuvent être des essences fruitières (noyers...), des essences sylvicoles (peupliers, conifères...) ou des essences ornementales. L'espacement entre rangs permet soit de circuler entre les lignes avec des tracteurs et des pulvérisateurs portés ou traînés, soit, plus rarement, avec des engins automoteurs. Les techniques de pulvérisation utilisées peuvent être résumées de la manière suivante :

– **pour les haies fruitières**, la pulvérisation **à jet projeté** peut être utilisée si la distance qui sépare les buses de la structure végétale est inférieure à 0,60 m environ avec une faible épaisseur de végétation. La pulvérisation à jet porté ou la pulvérisation pneumatique sont très fréquemment utilisées ;

– **pour les arbres de hautes tiges** (de 3 à 6 mètres), la pulvérisation à jet porté et la pulvérisation pneumatique sont les plus couramment utilisées ;

– **pour les arbres de très hautes tiges**, étant donné la hauteur des arbres (de 6 à 10 mètres par exemple), on utilise la pulvérisation à jet porté avec des appareils équipés de diffuseurs spécifiques.

Pour les traitements des vergers à petits fruits (groseilliers, framboisiers...), on utilise souvent les mêmes équipements que pour la vigne avec, le cas échéant, des systèmes de localisation adaptés à la taille des plants.

D'une manière générale, les vignes et les arbres ont une surface foliaire importante et, lors de traitements avec des produits agissant par contact et/ou lorsqu'une **densité d'impact** importante est recherchée, il est nécessaire de faire appel à des techniques de pulvérisation qui favorisent la **pénétration des gouttes** au cœur du système végétal. Cette nécessité conduit à l'utilisation de systèmes mettant en œuvre des jets d'air plus ou moins violents qui transportent les gouttes et agitent les feuillages pour favoriser leur pénétration.

Sans entrer dans une étude complexe, on peut toutefois préciser que la résistance à la pénétration des feuillages par les flux pulvérisés dépend de l'architecture des sujets à traiter et de la direction du flux d'air. En pratique, l'orientation jet/feuille est déterminante, mais il s'agit d'une notion très locale qui varie d'un point à un autre du feuillage. Retenons seulement deux situations extrêmes :

- un flux de pulvérisation orienté perpendiculairement au plan extérieur général des feuilles tend à plaquer les feuilles les unes contre les autres, à atteindre seulement leur face externe et à fermer l'accès au cœur du système végétal,
- un flux de pulvérisation dirigé vers un feuillage selon un axe oblique par rapport au plan extérieur général des feuilles tend à soulever les feuilles, à atteindre leur face inférieure et à pénétrer plus profondément dans le système foliaire.

• LES PULVÉRISATEURS À JET PROJETÉ

Les pulvérisateurs à pression de liquide et à jet projeté utilisés en viticulture disposent de rampes verticales, appelées « pendentifs » (fig. 247), afin que l'axe des jets des buses soit horizontal. Selon les cas, les rampes peuvent être orientées soit perpendiculairement à la surface végétale, soit de manière oblique (avec, par exemple, un angle de 20° vers l'avant dans un plan horizontal) pour mieux pénétrer le feuillage. Ces équipements de pulvérisation localisée sont adaptés soit à des pulvérisateurs portés ou traînés entre les rangs par des tracteurs, soit à des tracteurs enjambeurs. Ils comprennent les mêmes composants principaux que les pulvérisateurs de grande culture sans circulation continue de bouillie : cuve, système d'agitation, pompe volumétrique, distribution, régulation à pression constante... (se reporter à la description de ces composants dans le chapitre 8).

Les trois modes de traitement les plus fréquents sont :

- **circulation dans chaque interligne** : dans ce cas, une rampe verticale est placée de

chaque côté de l'avancement, pulvérisant les faces végétales latérales intérieures à l'interligne. Le traitement de l'autre face des rangs est effectué lors des passages suivants ;

– **circulation dans un interligne sur deux** (fig. 247) : les deux rangs latéraux à l'avancement sont traités sur les deux faces simultanément, chacun par un jeu de deux double-rampes pendulaires opposées ;

– **circulation en chevauchant un rang avec un tracteur enjambeur** : le tracteur enjambeur dispose de deux rampes opposées au centre et, selon l'équipement, de deux rampes simples ou doubles sur les côtés. Dans le premier cas, l'enjambeur chevauche un rang sur deux et, dans le second, un rang sur trois.

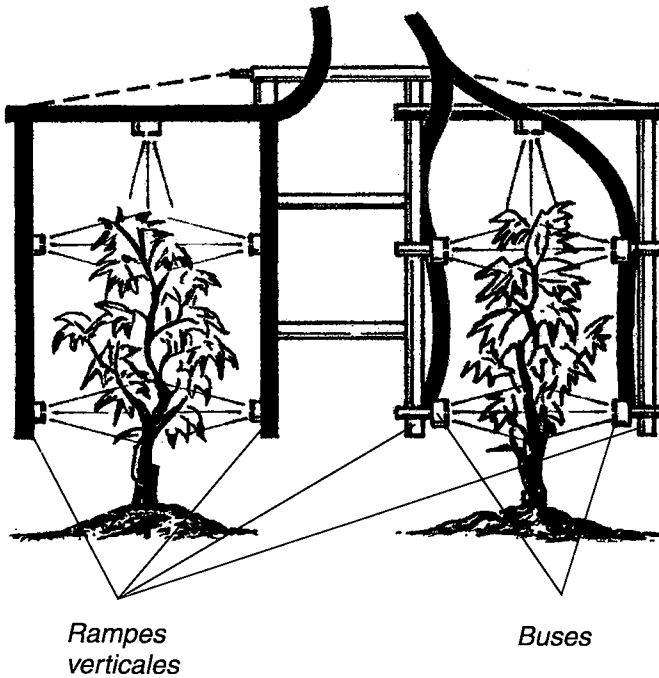


Fig. 247 - Pulvérisation à jet projeté avec des rampes verticales

Afin de limiter les pertes de produit et les conséquences environnementales liées au ruissellement sur le sol, les appareils peuvent être équipés de **panneaux récupérateurs de bouillie** (fig. 248), placés verticalement, de l'autre côté du rang, en vis-à-vis des rampes. Les gouttes, qui traversent la végétation sans être arrêtées par le feuillage, sont recueillies sur le panneau du récupérateur et ruissellent sur ce dernier en s'écoulant dans une gouttière. La bouillie contenue dans cette gouttière est recyclée par une pompe ou un hydro-injecteur vers la cuve, après filtration.

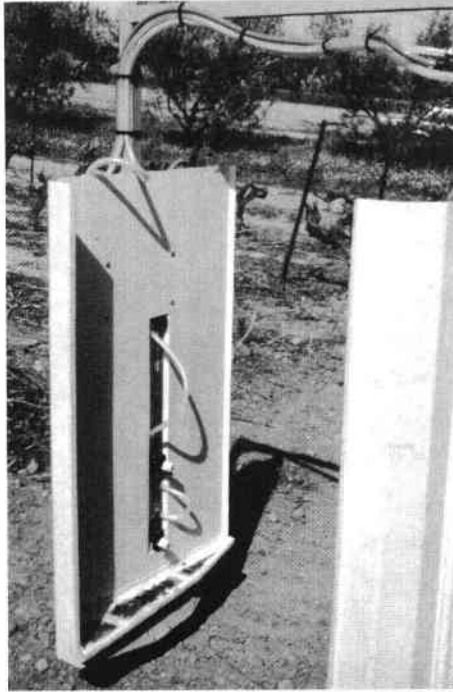


Fig. 248 - **Panneaux récupérateurs de bouillie** (photo Cemagref)

• **LES PULVÉRISATEURS À JET PORTÉ** (Fig. 249 et 250)

Ces pulvérisateurs portés, traînés et, plus rarement, automoteurs, sont fréquemment utilisés en arboriculture. Leur conception est en générale compacte et basse afin de pouvoir circuler dans les vergers en accrochant le moins possible les branches.

Les pulvérisateurs portés sont équipés de cuves de 300 à 800 litres, les modèles traînés ont des capacités de cuve variant de 600 à 2 000 litres.

Le circuit de bouillie comprend une pompe volumétrique, des distributeurs, un régulateur de pression, plusieurs niveaux de filtration (se reporter à la description de ces composants dans le chapitre 8) et des rampes placées en arc de cercle sur la périphérie de refoulement d'un puissant **ventilateur axial**, appelé aussi **turbine**, et absorbant de 15 à 40 kW selon les matériels. Les rampes portent au total de douze à seize raccords porte-buses pouvant être utilisés en totalité ou en partie selon l'objectif recherché et la hauteur de la zone végétale à atteindre.

Le **ventilateur** est réalisé en alliage léger ou, parfois, en matière synthétique et son diamètre varie entre 0,60 et 1 mètre. Il est logé à l'intérieur d'un carénage circulaire en forme de **tuyère** qui transforme la trajectoire axiale de l'air aspiré par l'arrière en un ou deux flux angulaires

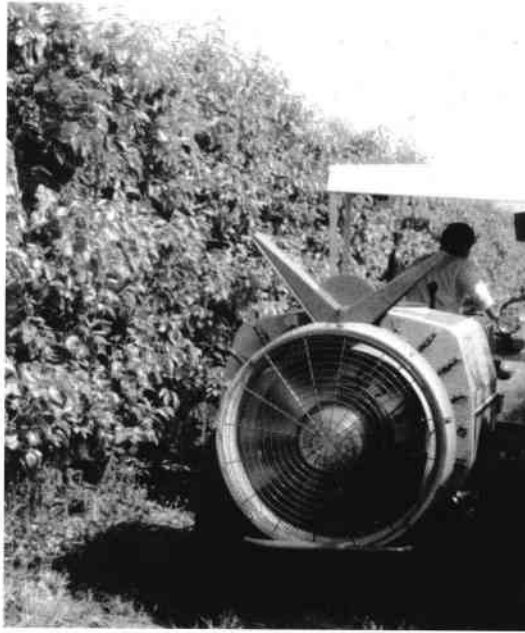


Fig. 249 - Pulvérisateur à jet porté au travail (photo Berthoud)

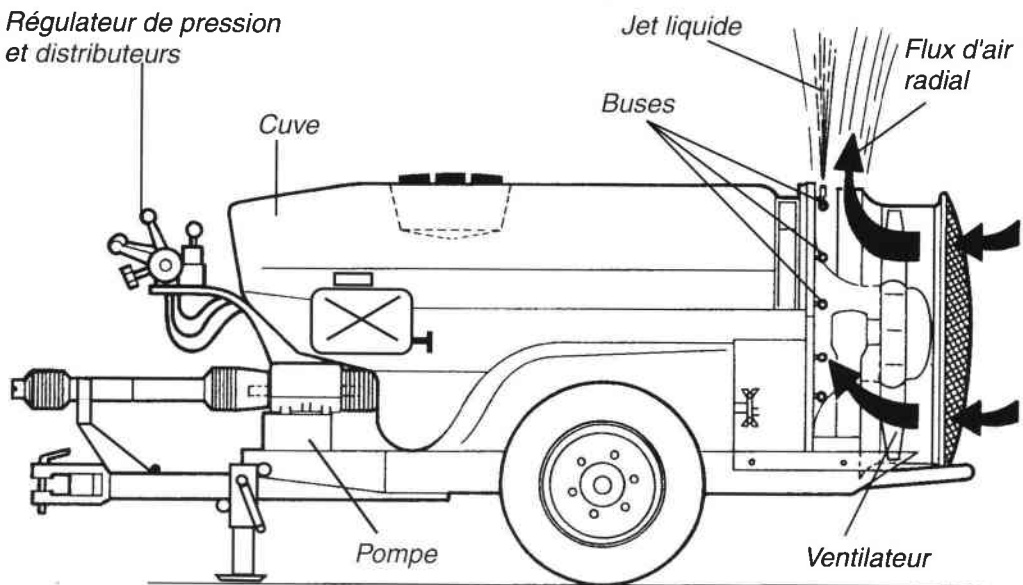


Fig. 250 - Principe d'un pulvérisateur à jet porté

latéraux réglables, pouvant couvrir au total un angle de 240°. Les pales en matière synthétique peuvent être rapportées.

L'entraînement est assuré par la prise de force du tracteur par l'intermédiaire d'une transmission à multiplicateur et à renvois d'angle, comprenant un point mort et, dans certains cas, un embrayage centrifuge. Le débit d'air du ventilateur peut être réglé en agissant sur sa vitesse (de 1 600 à 2 500 tr/min, à l'aide d'une boîte de vitesses), en faisant varier le nombre de pales ou en modifiant le **pas des pales**.

Le principe de fonctionnement est simple (fig. 251) : la bouillie est d'abord fragmentée en gouttelettes par la pression de liquide au niveau des buses ; dès leur sortie des buses, les gouttes sont prises en charge et entraînées par le courant d'air du ventilateur qui les transporte vers le feuillage à traiter. Selon les matériels, le débit d'air varie de 3 à 20 m³/s et sa vitesse périphérique à la sortie du ventilateur peut varier de 30 à 60 m/s (de 108 à 216 km/h) selon le débit et le réglage de la section de sortie. Ce mode de fonctionnement est commun à tous les pulvérisateurs classiques à jets portés placés en sortie de turbine.

Afin de faciliter la tâche de l'opérateur et d'éviter les pulvérisations en dehors des lignes de végétation, les appareils de traitement peuvent comporter un automatisme de fermeture des circuits par des « capteurs de zone » (concept Détecta de Tecnomat par exemple). Il s'agit de

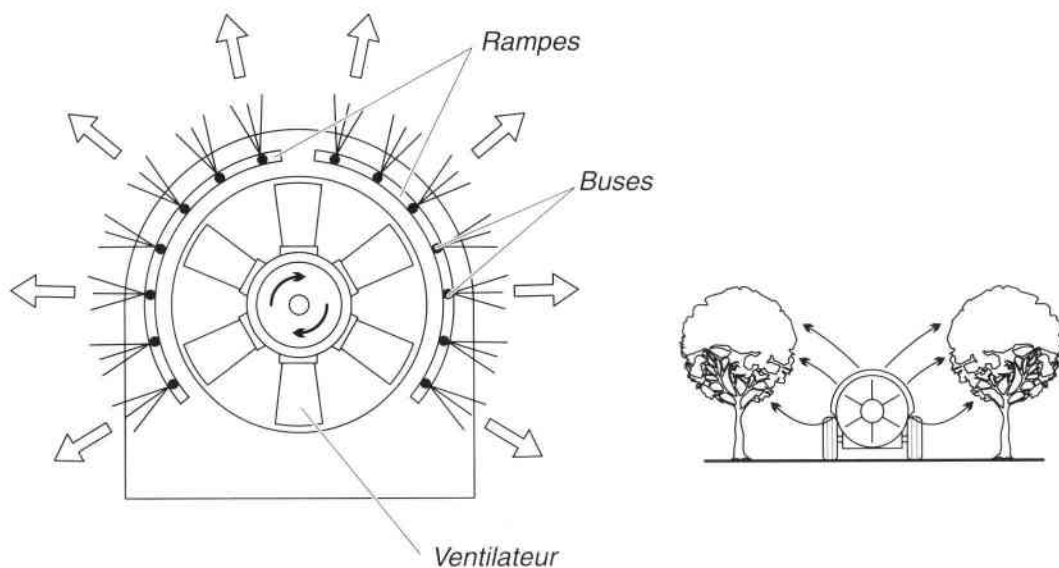


Fig. 251 - Vue arrière d'un pulvérisateur à jet porté à flux radial

capteurs photo sensibles placés de chaque côté du pulvérisateur. Ils détectent les entrées et les sorties des zones végétales à traiter (haies fruitières par exemple) et permettent de piloter automatiquement la coupure des circuits de pulvérisation afin d'éviter les pulvérisations hors cible. Le principe de fonctionnement est basé sur les variations de lumière réfléchie entre les zones « nues » et les zones « végétales ».

Les pulvérisateurs à jet porté ont des configurations différentes, adaptées aux types de traitements et aux structures végétales des cultures. Souvent, le choix de l'agriculteur est un compromis permettant de traiter avec un seul appareil l'ensemble de ses productions. Parmi les différentes configurations, citons les **pulvérisateurs à jet porté à flux radial**, les **pulvérisateurs à jet porté à flux radial et à flux descendant**, les **pulvérisateurs à jet porté à flux tangentiel** et les **pulvérisateurs à jet porté à flux orientable et/ou adaptable**.

- **Les pulvérisateurs à jet porté à flux radial (fig. 251) :**

Il s'agit d'appareils fréquemment utilisés pour le traitement des vergers.

- **Les pulvérisateurs à jet porté à flux radial et à flux descendant (fig. 252) :**

Ces appareils sont utilisés pour certains traitements viticoles ; la partie latérale basse des rangs de vigne est traitée de chaque côté du pulvérisateur par un flux radial, tandis que la partie haute est traitée par un flux descendant réparti et orienté par un carénage aux formes adéquates.

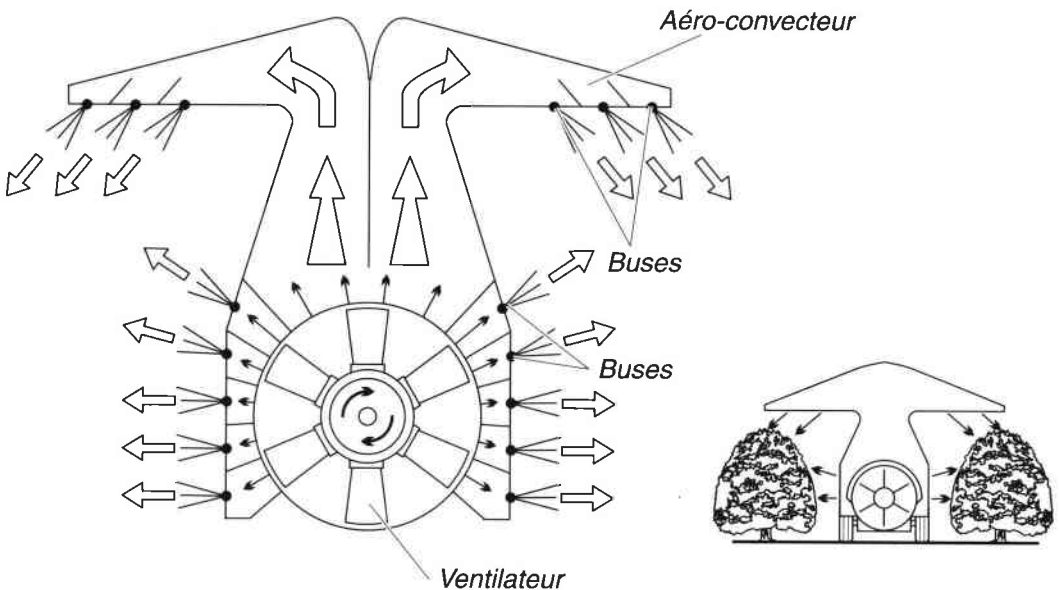


Fig. 252 - Vue arrière d'un pulvérisateur à jet porté et à flux radial et à flux descendant

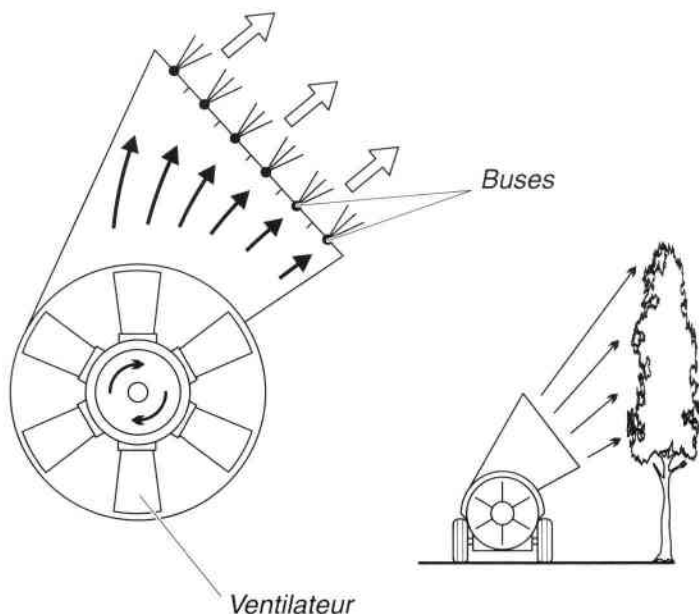


Fig. 253 - **Vue arrière d'un pulvérisateur à jet porté équipé d'un diffuseur pour les traitements des arbres de hautes tiges**

- **Les pulvérisateurs à jet porté à flux tangentiel (fig. 253) :**

Cette configuration est utilisée pour le traitement des arbres de hautes tiges. Le flux du ventilateur est capté par un carénage tangentiel, orienté vers la partie végétale des arbres à traiter.

- **Les pulvérisateurs à jet porté à flux orientable et/ou adaptable :**

Ces pulvérisateurs sont généralement équipés d'un ventilateur hélicoïdal qui refoule l'air dans des conduites souples portées par des supports réglables en hauteur et en direction. A leur extrémité, ces conduites souples sont équipées de diffuseurs d'air qui portent à leur sortie des buses de pulvérisation à pression de liquide. Les conduites sont réalisées en PVC ou en polyéthylène annelé. Selon les traitements, les diffuseurs terminaux peuvent être soit de forme tubulaire, soit de forme plate.

Ce type d'équipement est rencontré soit sur des pulvérisateurs spécialement conçus de cette manière, soit comme équipement adaptable sur des pulvérisateurs pneumatiques.

Une réalisation intéressante est développée depuis 1993 par la société Tecnomia sous l'appellation « Turbocoll ». Le système est constitué de **diffuseurs d'air** spéciaux, placés verti-

calement devant les faces végétales à traiter (vignes, haies fruitières...). Ces diffuseurs ne comportent aucun organe mobile et sont conçus pour être alimentés par des vitesses d'air élevées fournies par les ventilateurs hélicoïdaux des pulvérisateurs pneumatiques ; leur alimentation en air est réalisée en divisant le débit de la turbine du pulvérisateur en autant de conduites que l'installation comporte de diffuseurs. Chaque panneau diffuseur porte une **rampe de pulvérisation** équipée de buses à pression de liquide. Pour un diffuseur de 1,20 m, on trouve par exemple six venturis et trois buses.

La particularité de ces diffuseurs est qu'ils sont étudiés pour transformer l'énergie pneumatique à haute pression du ventilateur (650 mm d'eau ou 65 millibars) de manière à obtenir un flux d'air laminaire à haut volume, de huit à douze fois supérieur à celui qui est fourni par le ventilateur (pour un débit primaire de 0,22 m³/s, le débit total atteint, par exemple, 2 m³/s à 0,50 m de la sortie des diffuseurs). Cette transformation est réalisée par des **venturis**.

La figure 254 montre le principe aérodynamique utilisé au niveau de chacun des venturis. Le flux d'air du ventilateur parvient à grande vitesse dans une trompe qui débouche au centre du convergent-divergent jouant le rôle de venturi. L'injection de l'air du ventilateur (flux primaire) dans le venturi entraîne un débit d'air secondaire important aspiré à l'arrière du système.

Chaque diffuseur (fig. 255) comportant de 2 à 10 venturis, on obtient ainsi un véritable rideau d'air à grand débit constitué du flux d'air primaire refoulé par le ventilateur et du flux d'air secondaire induit par les venturis. Entre chaque groupe de deux venturis se trouve une buse de pulvérisation qui fragmente la bouillie et « introduit » les gouttes dans le rideau d'air porteur.

Par rapport à un pulvérisateur à jet porté classique, le système qui vient d'être décrit permet d'obtenir un plus grand débit mieux réparti verticalement et plus efficace dans la mesure où les diffuseurs peuvent être positionnés plus près de la masse végétale (0,50 m environ). De plus, les panneaux diffuseurs peuvent être orientés de manière à diriger le flux d'air en oblique pour mieux pénétrer le système foliaire à traiter. Ces diffuseurs sont conçus pour permettre de transformer un pulvérisateur pneumatique en pulvérisateur à jet porté.

• LES PULVÉRISATEURS PNEUMATIQUES

Les pulvérisateurs pneumatiques sont des appareils portés ou traînés, d'une architecture assez basse et étroite pour circuler entre les rangées d'arbres et de vignes (fig. 256 et 257).

Leurs organes principaux sont :

- une **cuve** de 400 à 1 200 litres,
- un **ventilateur hélicoïdal** (fig. 258), qui fournit le flux d'air nécessaire à la fragmentation et au transport des gouttes. Ce ventilateur est animé par la prise de force du tracteur, par l'intermédiaire d'un multiplicateur mécanique de vitesse (540 tr/min à l'entrée et de 3 000 à 4 000 tr/min à la sortie),
- un ou plusieurs dispositifs de pulvérisation pneumatique appelés tuyères,
- un circuit de bouillie (fig. 259).

Fig. 254 - Principe aérodynamique du système « Turbocoll » de Tecnomax
(d'après document Tecnomax)

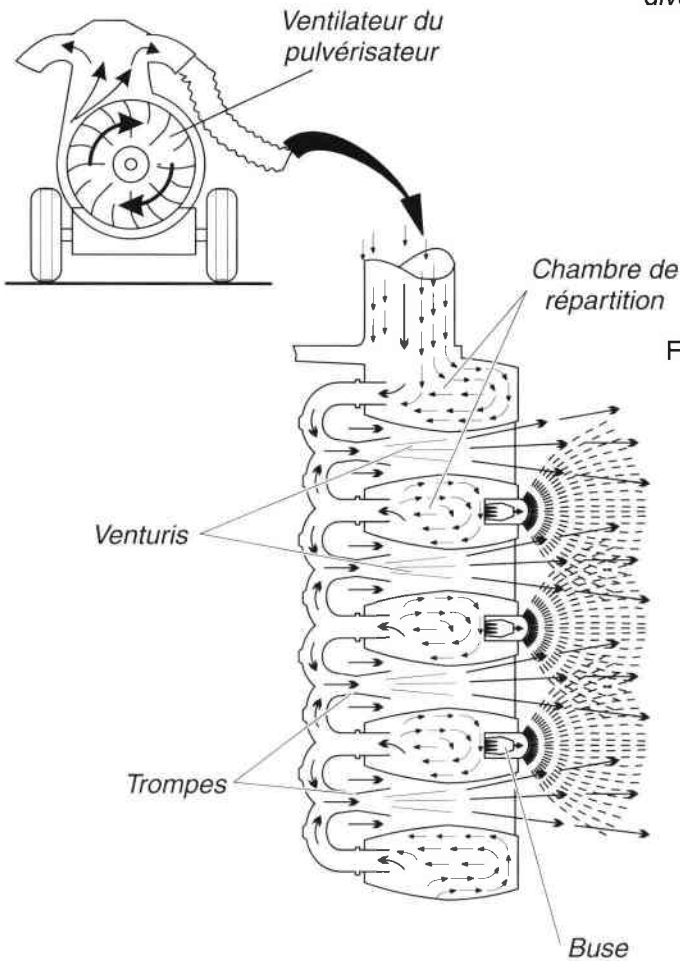
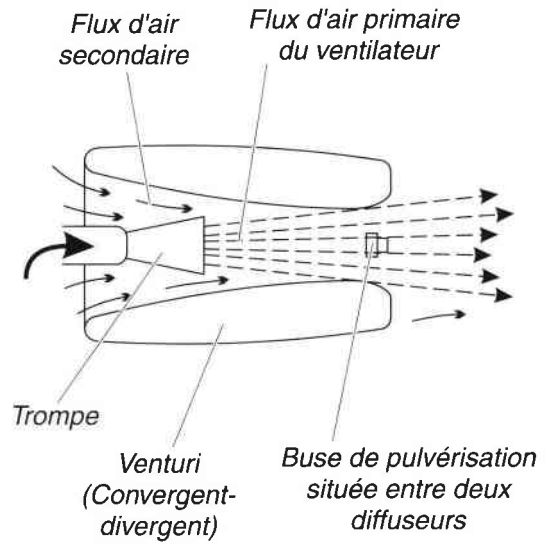


Fig. 255 - Schéma d'un diffuseur « Turbocoll » de Tecnomax
(d'après document Tecnomax)



Fig. 256 - Pulvérisateur pneumatique au travail (photo Tecnomia)

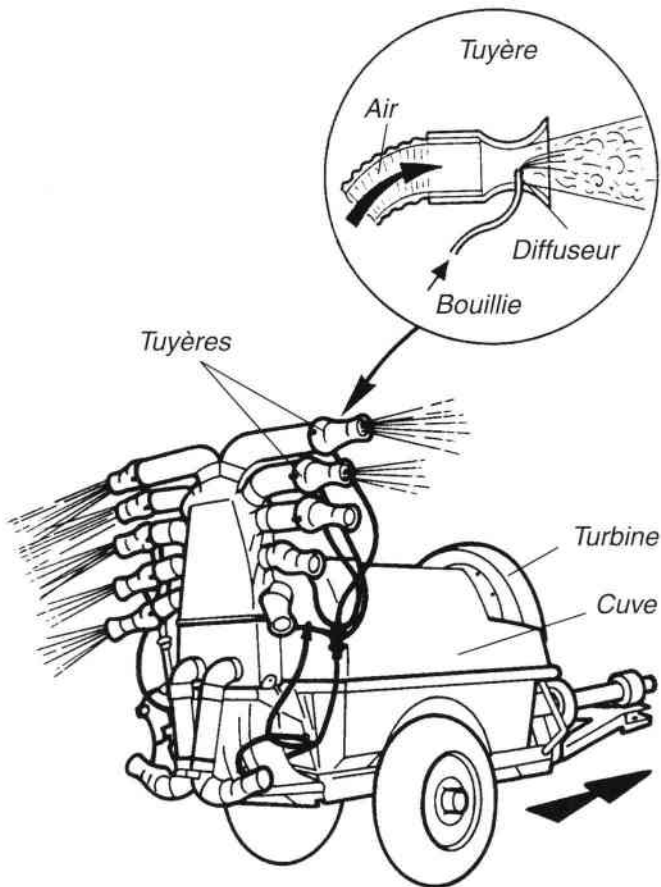


Fig. 257 - Principe d'un pulvérisateur pneumatique traîné

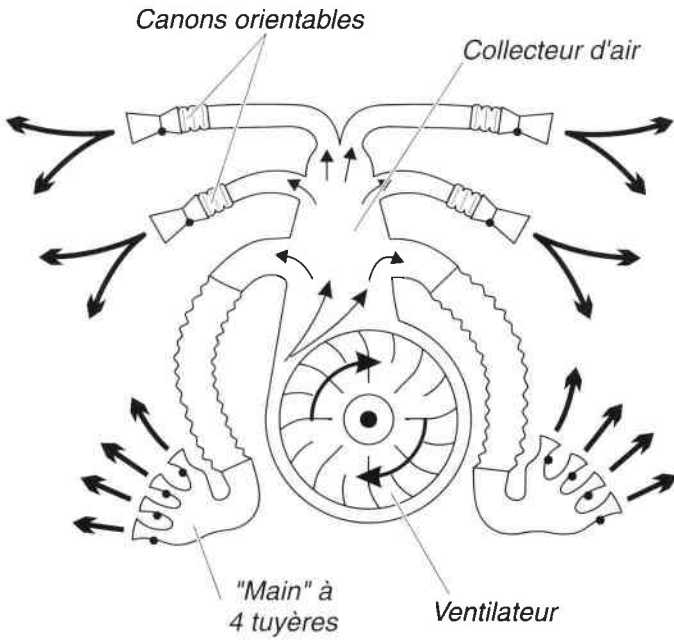


Fig. 258 - Vue d'un ventilateur et du collecteur d'air d'un pulvérisateur pneumatique

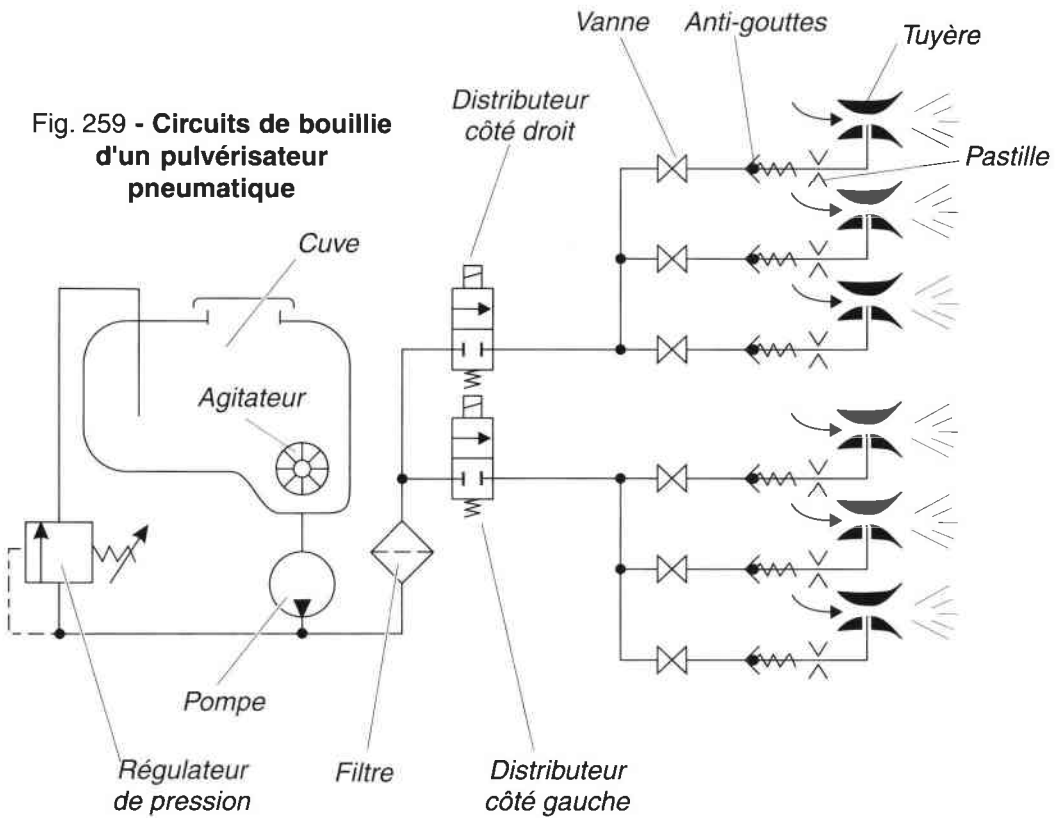


Fig. 259 - Circuits de bouillie d'un pulvérisateur pneumatique

Dans le cas le plus fréquent, le ventilateur est à axe horizontal et son carénage est assemblé à un collecteur qui distribue l'air sous pression vers les différents points de diffusion. Sur les pulvérisateurs pneumatiques traînés, l'ensemble ventilateur-collecteur est placé, selon les cas, à l'avant ou à l'arrière de la cuve. Sur les pulvérisateurs pneumatiques portés, le ventilateur peut être soit associé au collecteur en partie arrière, soit monté séparément sous la cuve (ventilateur à axe vertical) et raccordé à un collecteur placé en partie arrière.

La pulvérisation pneumatique est une technique de fragmentation obtenue par friction de la bouillie avec une veine d'air à haute vitesse. L'élément principal, qui est le siège de cette pulvérisation, est une **tuyère** (fig. 260, 261 et 262). La tuyère est constituée d'un profil d'écoulement muni d'un **convergent** et d'un **divergent** dont la plus petite section est appelée **col de la tuyère**.

Le col étant la plus petite section, la vitesse de l'air y est maximale ; le liquide y est introduit par un simple tube, ou bien par des **profils aérodynamiques** (fig. 263). Au niveau du col, l'écoulement d'air à grande vitesse produit une traînée, et donc une zone de dépression juste en aval, qui aspire la bouillie au niveau du ou des orifices d'injection. L'air étire le film liquide qui finit par se fragmenter.

Pour une dépression donnée au niveau du col, le **débit de bouillie** est constant si la section de l'orifice d'injection et la pression agissant sur le liquide sont constantes. Étant donné que la bouillie provient d'une cuve où le niveau baisse pendant le travail, la pression et, donc, le débit de cette dernière sont régularisés par une pompe doseuse. Le débit de bouillie est par ailleurs réglé par une **pastille calibrée** interchangeable, placée près de l'orifice d'injection.

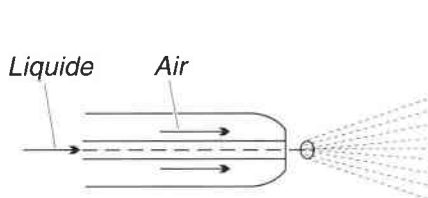
Certaines tuyères sont seulement constituées d'un convergent (fig. 260), la sortie à l'air libre faisant alors office de divergent.

D'une manière générale, pour les puissances totales inférieures à 20 ch, les débits d'air varient de 0,3 à 2 m³/s, et les vitesses moyennes sont comprises entre 50 et 100 m/s et peuvent atteindre de 100 à 150 m/s au niveau du col (de 360 à 540 km/h).

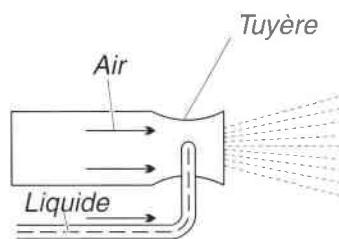
L'**avantage principal des buses** pneumatiques est la finesse de la pulvérisation obtenue. Elles génèrent des populations de gouttes assez homogènes. Le diamètre de Sauter est compris entre 80 et 100 µm lorsque le rapport débit d'air/débit de liquide est supérieur à 6 000. En général, il est toujours supérieur à 10 000 pour les tuyères uniques.

Le débit de bouillie, par tuyère, est limité selon les cas entre 1 et 5 L/min en raison du pouvoir de fragmentation limité des tuyères. La division du liquide est d'autant plus régulière et plus poussée que la vitesse de l'air au niveau du col est élevée et le débit de liquide faible.

Par ailleurs, la manière dont le liquide est injecté dans la tuyère influe sur la vitesse de la pulvérisation. Les veines de liquide minces, en **filets** ou en **films** uniformément réparties, sont les plus favorables.



Convergent



Convergent - divergent

Fig. 260 - Deux principes de tuyères

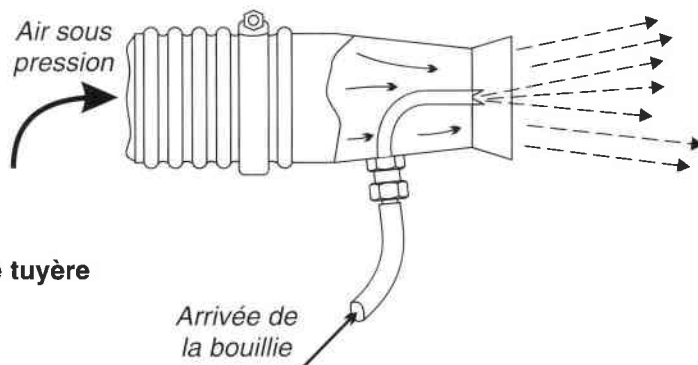
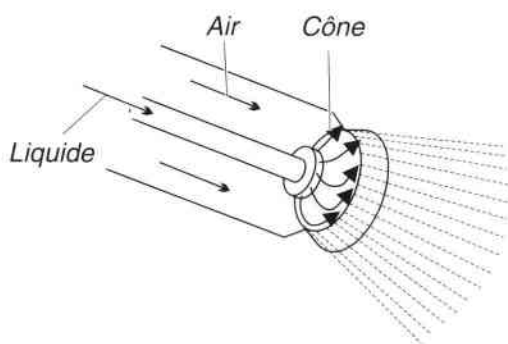


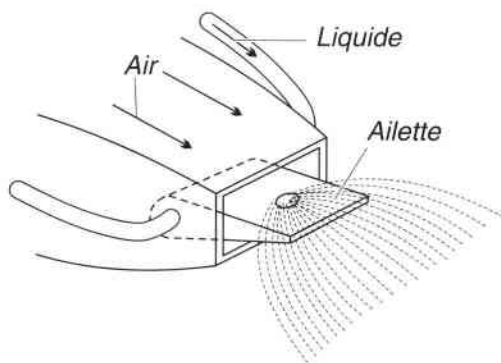
Fig. 261 - Schéma d'une tuyère



Fig. 262 - Tuyère au travail
(photo Berthoud)



Diffuseur circulaire fixe



Diffuseur à ailette

Fig. 263 - Deux exemples de profils aérodynamiques utilisés en pulvérisation pneumatique

La pulvérisation obtenue avec ce type de buse présente aussi l'avantage d'une bonne capacité de transport vers les végétaux avec, souvent, une bonne **pénétration**. Il convient toutefois de ne pas produire une pulvérisation trop fine afin d'éviter un dépôt difficile des gouttes.

La figure 258 montre le principe d'un pulvérisateur pneumatique dans une configuration courante en viticulture. Dans le langage courant, lorsque plusieurs tuyères sont groupées en éventail, l'ensemble est appelé « main » et, lorsqu'une tuyère de forte section est montée de manière fixe ou orientable à l'extrémité d'une conduite, le terme « canon » est utilisé. Cette configuration comprend :

- une main de quatre tuyères pour le traitement latéral d'un rang de vigne (on peut aussi utiliser deux mains de trois tuyères ou d'autres combinaisons),
- un canon (une tuyère) pour le traitement oblique du rang par-dessus.

La préparation du chantier de traitement	315
– Le jalonnement des parcelles	315
– La protection individuelle	315
– La protection des points d'eau	316
– Le mode d'emploi des produits	316
– La protection de la faune sauvage	316
– La notice d'instructions du pulvérisateur	317
– La détermination de la vitesse d'avancement	317
La préparation du pulvérisateur	317
– Le contrôle du régime de la prise de force	317
– La mesure de la vitesse d'avancement	318
– La détermination du débit du pulvérisateur	318
– Le choix du calibre des buses et de la pression	319
– La mesure de débit des buses et du pulvérisateur	320
– La hauteur des rampes	322
– La régularité de la pulvérisation sur une parcelle	322
– L'appréciation de l'efficacité de couverture	323
L'entretien des pulvérisateurs	323
– L'entretien journalier	323
– Le rinçage des pulvérisateurs	324
– L'entretien des buses	324
– L'entretien de fin de saison	325
Dix règles pour maîtriser les traitements phytosanitaires	325

L'UTILISATION, LES RÉGLAGES ET L'ENTRETIEN DES PULVÉRISATEURS

L'objectif de la pulvérisation est d'appliquer un **volume/hectare** de bouillie précis avec une **répartition** la plus régulière possible et avec une **taille, un nombre d'impacts** et une **homogénéité de gouttes** appropriés à la culture et au type de traitement. Ce chapitre propose une revue des principales opérations de préparation des traitements, de préparation et de contrôle du pulvérisateur ; pour plus d'informations, notamment à propos des dispositions réglementaires et de la protection de l'environnement, il convient de consulter par exemple les publications du CORPEN et plus précisément *Techniques d'applications et de manipulation des produits phytosanitaires* (se reporter à l'annexe documentaire).

• LA PRÉPARATION DU CHANTIER DE TRAITEMENT

• Le jalonnement des parcelles :

En grandes cultures, seul un jalonnement exact permet de conserver la bonne distance de passage établie selon la largeur des rampes. Si la distance de passage est inférieure à la largeur de travail des rampes, la dose est doublée dans les zones de recouvrement des passages ; si la distance de passage est supérieure à la largeur optimale de travail, la partie située entre les passages n'est pas correctement traitée.

L'erreur de jalonnement est grave pour la culture et pour l'environnement. Les jalonnements approximatifs doivent être proscrits et le jalonnement au pas est imprécis et est la source de nombreuses erreurs.

Comme pour les épandages d'engrais, les méthodes de jalonnement les plus utilisées peuvent être résumées de la manière suivante :

- sur terrain nu ou prairie, on pratique le jalonnement en arpentant la parcelle avec un pentadécamètre (50 mètres) et trois lignes de jalons ou plus, selon le relief du terrain.
- lors d'un semis avec un semoir en lignes, on peut procéder à un jalonnement de prélevée ou à un jalonnement de postlevée (se reporter au chapitre 4 à la partie consacrée à *la distance de passage et le jalonnement des parcelles*).

Pour les traitements arboricoles et viticoles, le jalonnage est, bien entendu, matérialisé par l'écartement inter rangs. Dans ce cas, la largeur de travail (L) à prendre en compte pour le calcul du débit correspond au nombre (n) de largeurs entre-rangs (l) traitées à chaque passage : $L = l \times n$.

• La protection individuelle :

Chaque fois qu'existent des risques de projection ou de contact avec un produit phytosanitaire, même dilué, porter une tenue imperméable (gants, imperméable, bottes) : la peau nue

est facilement et rapidement traversée par certains produits dangereux. Ne pas oublier de rincer ces équipements après leur emploi. Dans certains cas, il peut être intéressant d'utiliser des combinaisons jetables. Certains produits peuvent nécessiter l'emploi d'une protection respiratoire lors de la préparation de la bouillie et pendant le traitement.

Ne pas oublier de remplir d'eau claire et d'utiliser la cuve lave-mains des pulvérisateurs pour le rinçage des mains.

Pour les appareils sans cuve lave-mains, prévoir sur les lieux de préparation et de manipulation, de disposer en permanence d'une réserve d'eau facilement accessible permettant de se laver les mains après toute manipulation de produit.

• **La protection des points d'eau :**

Toutes les précautions doivent être prises pour éviter les débordements de cuve et les écoulements de produits en dehors du milieu à traiter.

Dans tous les cas, conformément aux dispositions réglementaires, la vidange par les rampes et la vidange du fond de cuve (plus la dilution bouillie-eau) doivent être effectuées sur la zone de culture ou sur une culture autorisée en évitant le ruissellement, et à l'écart des habitations, des cours d'eau, des mares, des étangs, des puits et des captages.

Maintenir les robinets d'eau très propres et penser à se laver les mains avant de les manipuler. Ne pas remplir les cuves avec un tuyau d'eau plongeant et ne jamais utiliser un raccordement direct à un réseau d'adduction d'eau pour la préparation des traitements, si votre branchement ne dispose pas d'un dispositif antiretour ; en cas d'anomalie ou de coupure du réseau pendant le remplissage d'une cuve, le dispositif antiretour évite le risque de siphonnage du produit de la cuve et la pollution du réseau.

Rincer les emballages correspondant au traitement en cours au moment de la préparation de la bouillie et incorporer la dilution du rinçage dans la cuve du pulvérisateur avant de traiter. Après leur rinçage, percer les emballages pour éviter toute réutilisation.

• **Le mode d'emploi des produits :**

Le mode d'emploi de toutes les formulations commerciales phytosanitaires est obligatoirement présent sur l'étiquetage des emballages : spécificité et type d'action, stade d'application, dose/hectare, volume/hectare, précautions d'emploi et risques spécifiques. Les fabricants ou les sociétés de diffusion de produits phytosanitaires réalisent par ailleurs des **fiches de données sécurité des produits** ; ne pas hésiter à les demander aux fournisseurs. Pour chaque type de culture, il est vivement recommandé de prendre connaissance des conseils diffusés par les instituts techniques et les instances de conseils (chambres d'agriculture, groupements de production, avertissements agricoles...). La consultation et le respect des règles édictées dans le mode d'emploi, dans les fiches de données sécurité et dans les documents de conseil sont les éléments de base d'un comportement responsable.

• **La protection de la faune sauvage :**

Prendre connaissance et respecter les instructions et mode d'emploi des produits à propos

de leur nocivité éventuelle pour les insectes et la faune sauvage, notamment à l'égard des insectes pollinisateurs.

Faire si possible un premier passage au milieu de la parcelle et traiter les bordures à la fin du traitement pour faciliter la fuite des animaux vers l'extérieur de la parcelle.

Lors des traitements herbicides, prendre toutes les précautions nécessaires pour ne pas porter atteinte aux végétaux des refuges naturels (haies, clôtures, bosquets...).

• La notice d'instructions du constructeur du pulvérisateur :

La notice d'instructions est le **document de référence** pour les utilisateurs de pulvérisateurs ; en plus de sa fourniture obligatoire, conformément aux dispositions réglementaires de sécurité (code du travail), cette notice indique à l'utilisateur les informations nécessaires pour :

- adopter les réglages les plus pertinents selon les traitements à réaliser,
- conserver les caractéristiques initiales de l'appareil,
- maintenir le matériel en parfait état de marche,
- prévenir les anomalies d'application et les surdosages.

Si l'utilisateur ne dispose pas de la notice d'instructions, il doit la demander au concessionnaire ou au constructeur.

• La détermination de la vitesse d'avancement :

Pour les traitements des cultures basses avec des matériels à rampes, la vitesse de travail varie par exemple entre 5 et 12 km/h selon la parcelle (pente, dévers, nivellement du sol, stabilité des rampes du pulvérisateur...). Pour les traitements viticoles et arboricoles, les limites de vitesse d'avancement dépendent aussi de la stabilité du tracteur (cas des tracteurs et matériels étroits) et de la facilité de circulation entre les lignes (branches des arbres...). De toute manière, cette vitesse (V) doit être déterminée par rapport au volume/hectare (Q) souhaité :

$$V = \frac{600 \times D}{Q \times L}$$

Dans tous les cas, **pour un rapport donné de la boîte de vitesses**, la valeur réelle de la vitesse d'avancement dépend du régime du moteur, de la dimension des pneumatiques des roues motrices, de leur usure, de leur enfoncement dans le sol (portance) et de leur patinage. La vitesse d'avancement doit être contrôlée avec soin (se reporter au paragraphe "la mesure de la vitesse d'avancement").

• LA PRÉPARATION DU PULVÉRISATEUR

• Le contrôle du régime de la prise de force :

Le régime de prise de force indiqué par le constructeur du pulvérisateur doit être scrupuleu-

sement respecté. Il convient de vérifier les indications du compte-tours du tableau de bord du tracteur en comparant son affichage avec un tachymètre mesurant directement le régime de la prise de force. En cas d'écart significatif, noter les valeurs de correspondance ou, si possible, faire régler (ou remplacer) le compte-tours du tracteur.

• La mesure de la vitesse d'avancement :

Tout utilisateur de pulvérisateur doit impérativement connaître la vitesse d'avancement de référence obtenue avec le ou les rapports de vitesses du tracteur correspondant aux différentes situations de traitement des parcelles de son exploitation.

Les indicateurs de vitesse d'avancement des tableaux de bord de tracteur n'ont pas toujours une précision suffisante et il est nécessaire de procéder à une mesure réelle de la vitesse d'avancement selon les indications de la notice d'instructions du pulvérisateur. Le principe de la mesure consiste à chronométrer le temps de parcours d'une distance précise - 100 mètres par exemple.

$$\text{Dans ce cas, } V \text{ km/h} = \frac{100 \text{ mètres}}{t \text{ (secondes)}} \times 3,6$$

Réaliser la mesure dans les conditions suivantes :

- jalonner la distance avec précision sur un terrain agricole représentatif de la surface à traiter,
- gonfler les pneumatiques du tracteur à la pression préconisée compte tenu du poids du pulvérisateur plein,
- opérer avec la cuve du pulvérisateur à mi-charge,
- démarrer l'essai au moins 20 mètres avant le premier jalon dans les conditions d'application (régime moteur correspondant au régime de prise de force prescrit, pont avant enclenché ou non...).

Le rapport de vitesse le plus favorable est celui qui permet d'assurer le traitement avec le moins possible de fluctuations du régime moteur pour limiter les variations de vitesse d'avancement et de régime de prise de force.

• La détermination du débit du pulvérisateur :

Le volume/hectare (Q) à appliquer et la vitesse de déplacement (V) étant fixés, on calcule la valeur du débit du pulvérisateur (D calculé) qu'il faudra obtenir en tenant compte de la largeur de travail de l'appareil (L). La formule étant toujours :

$$D \text{ calculé} = \frac{Q \times L \times V}{600}$$

Si l'on doit appliquer 250 L/ha avec une rampe de 24 m à 8 km/h, le débit du pulvérisateur doit donc être :

$$Q = \frac{250 \times 24 \times 8}{600} = 80 \text{ L/min}$$

Bien entendu, le débit de la pompe doit être supérieur au débit du pulvérisateur afin de permettre la régulation et le retour en cuve nécessaire au brassage de la bouillie (pour les appareils non équipés d'agitation séparée, le débit de retour doit être supérieur à 5 % du volume de la cuve lorsque celle-ci fait au plus 500 L, et à 10 % pour les plus grosses cuves). Le débit de la pompe est déterminé lors de l'achat du matériel, en fonction de la largeur de rampe choisie et des traitements à réaliser.

• **le choix du calibre des buses et de la pression :**

Toujours à partir de l'exemple précédent, si l'on doit appliquer 250 L/ha avec une rampe de 24 m à 8 km/h, le débit du pulvérisateur est de 80 L/min, dans l'hypothèse où la boîte de vitesses du tracteur le permet ; dans le cas contraire, il conviendrait de recalculer le débit sur la base de la **vitesse réelle** permise par la boîte de vitesses, dans les conditions du traitement.

Dans notre exemple, pour une rampe de 24 mètres portant 48 buses, le débit individuel des buses est égal à $80/48 = 1,66 \text{ L/min}$. Pour le type de buse choisi, il convient alors de choisir dans les tableaux du constructeur le calibre de buse qui s'approche le plus de 1,66 L/min à la pression la plus favorable à l'objectif de traitement et au type de buse. L'obtention de la bonne valeur du débit individuel est ensuite réglée en ajustant la pression pour obtenir à 8 km/h le débit calculé du pulvérisateur.

Ne pas oublier que la pression joue sur la finesse des gouttes : si la pression est élevée, les gouttes sont trop fines, elles risquent de pénétrer moins facilement la végétation et sont facilement entraînées par le vent à côté de la cible (dérive). Cette dérive des gouttelettes trop fines constituent une menace sérieuse pour la peau et pour les voies respiratoires de l'homme, ainsi que pour les cultures voisines et l'environnement.

La valeur de pression de pulvérisation à adopter peut être obtenue de trois manières :

- soit agir par tâtonnements sur le régulateur de pression et vérifier le débit réel en réalisant un test de débit et répéter l'opération jusqu'à l'obtention du débit calculé : $Q \text{ réel} = Q \text{ calculé}$,
- soit choisir la nouvelle pression de tarage à l'aide d'une règlette ou d'abaques diffusés par les organismes spécialisés et par les constructeurs de pulvérisateurs, et vérifier par un essai de débit,
- soit calculer la nouvelle pression à l'aide de la formule suivante et faire un contrôle de débit :

$$P_2 = P_1 \times \frac{(Q \text{ calculé})^2}{(Q \text{ buse})^2}$$

P_2 = Pression à afficher au manomètre,
 P_1 = Pression de référence du débit de buse.

Cette formule est limitée aux calculs de faibles variations de débit ; car elle ne tient pas compte du coefficient de débit des buses (se reporter au chapitre 7 à la partie consacrée à *la relation débit-pression* et des pertes de charge éventuelles des canalisations.

Reprenons notre exemple :

Débit calculé de chaque buse = 1,66 L/min pour 24 mètres, 250 L/ha et 8 km/h
le débit de référence de la buse choisie est de 1,7 L/min à 3 bars.

Pression à afficher au manomètre : 2,89 bars.

$$P_2 = 3 \times \frac{1,66^2}{1,7^2} = 2,89 \text{ bars}$$

Il est conseillé de disposer de porte-buses multiples (sélecteurs à trois, à quatre ou à cinq buses) permettant de changer de buse par une simple rotation. Ceci est particulièrement intéressant pour s'adapter aux différentes conditions de traitement et pour disposer d'une buse de secours en cas de bouchage .

ATTENTION : les valeurs de pression indiquées au manomètre principal de l'appareil sont généralement plus élevées que la pression réelle au niveau des buses, en raison des pertes de charge dans les raccords, conduits et antigouttes. Cette différence est d'autant plus sensible que le débit pulvérisé est important. **Pour le réglage des pulvérisateurs, il est conseillé de disposer d'un second manomètre de contrôle (Ø 100 mm mini) que l'on branche le plus près possible des buses pendant les mesures.**

• La mesure de débit des buses et du pulvérisateur :

Tout opérateur doit savoir réaliser des mesures de débit ! Ce contrôle est, en effet, le seul moyen concret de vérifier le débit d'un pulvérisateur et l'état de ses buses ! Rappelons que, sous l'effet de l'abrasion, l'orifice d'une buse ou d'une pastille s'élargit et son débit, à pression égale, augmente.

La rapidité de cette usure varie suivant le matériau de la buse et la nature des produits appliqués, parfois dans des proportions importantes.

Il faut donc contrôler régulièrement le débit des buses et ne pas hésiter à les remplacer lorsque leur débit s'écarte de plus de 10 % de la moyenne.

L'opération de mesure du débit d'un pulvérisateur peut être résumée de la manière suivante :

– vérifier que toutes les buses sont de même type et du même fabricant, de même angle de jet et de même calibre. Si ce n'est pas le cas, renouveler l'ensemble des buses de la rampe pour ne pas mélanger buses neuves et buses usagées,

– verser de l'eau dans la cuve,

– mettre le pulvérisateur en marche, à poste fixe,

– régler la pression à la valeur souhaitée en disposant, si possible, d'un manomètre de contrôle au niveau des rampes,

– recueillir l'eau à la sortie de chacune des buses pendant une même durée avec des éprouvettes graduées (fournies par les constructeurs ou les instances de conseil) ou des sachets de réception dont on mesure le contenu,

– calculer le débit moyen des buses et vérifier que les écarts entre cette moyenne et chacune des quantités d'eau recueillies sont inférieurs à 10 %. Les constructeurs proposent des aides de calcul (règles, calculatrices...).

En cas d'anomalie, vérifier :

- la propreté, le type et l'usure de la buse,
- la propreté des filtres, des buses et des rampes,
- le fonctionnement du dispositif antigouttes,
- l'état et la disposition des tuyauteries.

Cette méthode est relativement longue à réaliser, mais elle présente le grand intérêt de conduire au véritable diagnostic de la rampe :

- état des buses,
- anomalie d'alimentation,
- débit réel du pulvérisateur.

Une autre méthode peut être utilisée en contrôlant le débit global du pulvérisateur :

- faire débiter le pulvérisateur et s'assurer que toutes les buses débitent régulièrement et qu'aucune fuite n'est apparente,
- régler la pression sur la valeur donnée par les tableaux des fabricants pour obtenir, avec les buses choisies, le volume/hectare souhaité,
- couper l'alimentation des rampes,
- remplir la cuve à ras bord,
- faire tourner la pompe à son régime normalisé,
- faire débiter l'ensemble des rampes pendant une durée déterminée : plusieurs minutes sont nécessaires pour avoir une bonne précision,
- mesurer le volume d'eau nécessaire pour refaire le plein de la cuve.

La relation entre le débit (Q), la durée de la mesure (t) et le volume d'eau pulvérisé (v) est la suivante :

Cette méthode, plus courte que la précédente, n'est crédible que pour un réglage donné de

$$Q \text{ réel} = \frac{v}{t}$$

$$\text{Débit réel du pulvérisateur} = \frac{\text{Volume d'eau remis en cuve (en litres)}}{\text{Durée de la pulvérisation (en minutes)}} \\ \text{(en litres par min)}$$

pression et un type donné de buses en bon état. Elle ne permet pas de contrôler l'état de chaque buse. Ce test doit être réalisé avec les buses prévues pour le traitement ; il doit être renouvelé chaque fois qu'on les change ou que l'on modifie la pression du liquide.

Les essais de débit concernent tous les pulvérisateurs, y compris ceux qui sont équipés d'une régulation DPM, DPA ou DPE ; pour ces derniers, la procédure de contrôle est indiquée dans la notice d'instructions du constructeur.

La mesure du débit est aussi l'occasion de vérifier le fonctionnement du débitmètre s'il existe.

Pour les pulvérisateurs à rampes pour cultures basses, il existe des bancs de répartition qui permettent de visualiser la régularité de répartition transversale de la pulvérisation, sous les rampes.

Pour les pulvérisateurs à jet porté et pneumatiques, il existe également des bancs de répartition verticale qui recueillent la pulvérisation et permettent de la visualiser.

• **La hauteur des rampes :**

En fonction de la valeur de recouvrement des jets et de leur angle correspond une hauteur des buses et donc des rampes par rapport au plan-cible (sol ou plante). Cette hauteur correspond à une valeur optimale de répartition transversale de la pulvérisation. A titre d'exemple, pour un type donné de buses à fente espacées de 0,50 m, la hauteur minimale de la buse par rapport au plan-cible avec un recouvrement de 30 % est de 0,50 m pour une buse à 80° et de 0,40 m pour une buse à 110° (source Teejet). Dans tous les cas, se référer à la notice des buses.

Pour les appareils traînés, la hauteur de la rampe est réglée par rapport au plan-cible en agissant sur la commande de positionnement vertical de la rampe par rapport au portique-support (commande par treuil ou par vérin hydraulique) ;

Pour les appareils portés, il convient de régler d'abord, sur sol plat, les chandelles de l'attelage trois points pour obtenir une bonne horizontalité (par rapport au sol) dans le sens transversal (gauche-droite). Pour les appareils disposant d'un réglage séparé de la hauteur des rampes, régler le relevage hydraulique à la hauteur conseillée par le constructeur avant de régler la hauteur de la rampe. Pour certains pulvérisateurs portés qui ne disposent pas d'un réglage séparé de la hauteur des rampes, le réglage est réalisé en modifiant la position du relevage hydraulique.

• **La régularité de la pulvérisation sur une parcelle :**

La régularité de la pulvérisation sur une parcelle peut être affectée transversalement et longitudinalement pour diverses raisons :

– **la régularité de la répartition transversale** de la pulvérisation dépend :

- de la précision du jalonnage ,
- du type de buse, de son angle de pulvérisation (80 ou 110° par exemple pour des buses à fente) et de son orientation,

- de la hauteur de la rampe par rapport à la surface à traiter en fonction de l'écartement des buses (par exemple, des buses à fente de 110°, espacées de 50 cm, positionnées à 65/70 cm au-dessus de la cible). Consulter la notice consacrée aux buses,
- de l'égalité des débits individuels des buses,
- de la stabilité de la rampe (oscillations dans le plan vertical) et de son parallélisme avec le plan-cible.

– **la régularité de la répartition longitudinale de la pulvérisation** dépend :

- de la régularité de la vitesse d'avancement (variations du régime moteur, patinage...). Pour les matériels équipés d'une régulation automatique du débit (DPM, DPA, DPE), prendre conscience que ces équipements, dont le rôle est de maintenir le volume/hectare constant, ont une plage d'action limitée pour un calibre de buses donné : si la vitesse croît trop, la régulation commande une augmentation de pression trop élevée (les gouttes deviennent trop fines, la pénétration risque d'être moins bonne et le risque de dérive augmente), si la vitesse diminue trop, la régulation ordonne une baisse de pression trop importante (les gouttes deviennent trop grosses, la couverture est insuffisante) ;
- de la stabilité de la rampe (oscillations dans le plan horizontal).

• **L'appréciation de l'efficacité de couverture :**

Des essais permettent de contrôler la répartition de la pulvérisation et son homogénéité. Pour cela, on peut utiliser des **papiers hydrosensibles**, que l'on dispose au niveau des surfaces à traiter (fond jaune), qui deviennent bleu au contact des gouttelettes.

• **L'ENTRETIEN DES PULVÉRISATEURS**

Comme pour tous les matériels, **l'entretien régulier** du pulvérisateur est indispensable, car il permet d'obtenir un fonctionnement précis et fiable, et il accroît la durée de vie des appareils.

L'utilisation et l'entretien doivent être réalisés en respectant les consignes et modes opératoires définis par la notice d'instructions fournie par le constructeur. Cette notice fait partie intégrante du matériel. La réglementation impose qu'elle soit remise à l'acheteur par le vendeur lors de l'achat du pulvérisateur. Les paragraphes suivants ne peuvent donc se substituer à cette notice, ils constituent seulement un résumé des recommandations principales réparties en quatre parties : l'entretien journalier, le rinçage, l'entretien des buses et l'entretien de fin de saison.

• **L'entretien journalier :**

Avant la mise en œuvre d'un traitement, le pulvérisateur doit être prêt à fonctionner et parfaitement propre, il convient notamment de procéder aux opérations suivantes :

- vérifier l'état et l'étanchéité des tuyauteries flexibles et des raccords ;

- vérifier le bon fonctionnement du manomètre (et de l'indicateur de pression des consoles électroniques) ;
- vérifier la pression d'air de l'accumulateur de pression de la pompe (pression comprise par exemple entre 0,3 et 0,5 fois la pression de travail) ;
- vérifier et régler la tension des courroies de transmission ;
- graisser les pièces mobiles et notamment la transmission et contrôler le niveau d'huile dans la pompe et les boîtiers de transmission ;
- nettoyer les filtres surtout en cas de pulvérisation à bas volume ;
- vérifier le fonctionnement de l'ensemble des antigouttes et des buses ;
- maintenir propres les marchepieds, les mains courantes et les plates-formes d'accès ;
- définir la quantité de bouillie strictement nécessaire à la surface à traiter afin d'éviter les « fonds de cuve ». Cela nécessite une parfaite maîtrise du débit de l'appareil, la connaissance précise des surfaces des parcelles et de l'organisation des passages ;
- remplir la cuve de rinçage et la cuve lave-mains avec de l'eau claire.

• Le rinçage des pulvérisateurs :

Le rinçage est indispensable en fin de journée afin de prévenir les colmatages et, à chaque changement de produit, d'éviter les interactions chimiques indésirables et les colmatages. Le rinçage s'accompagne toujours d'un nettoyage des filtres.

Pour les appareils non munis de cuve de rinçage, celui-ci consiste tout d'abord à vidanger la cuve et à la rincer au jet, puis à la remplir à 20 % de sa capacité afin de faire fonctionner tous les circuits du pulvérisateur (agitation, rampes...) et de vidanger l'ensemble par l'extrémité des rampes.

Pour les appareils munis d'une cuve de rinçage, respecter les indications de la notice d'utilisation. Selon les cas, le rinçage peut être réalisé en ajoutant à l'eau de rinçage un produit de nettoyage conseillé par les constructeurs ; dans ce cas, laisser agir le produit le temps nécessaire avant de vidanger, rincer à l'eau claire et nettoyer les filtres.

Dans tous les cas, la vidange par les rampes et la vidange du fond de cuve doivent être effectuées sur une culture autorisée : (se reporter aux conseils du CORPEN).

• L'entretien des buses :

Le nettoyage des buses peut être réalisé par brossage à l'eau et par soufflage, éventuellement précédés d'un trempage dans un solvant approprié ; employer une brosse douce, en Nylon par exemple, et de l'air comprimé (compresseur, bombe de gaz inerte...).

Ne jamais utiliser un fil de fer ou tout autre objet métallique qui pourrait abîmer la buse et donc modifier ses caractéristiques.

Ne jamais vouloir "souffler" une buse avec la bouche ! les produits phytosanitaires sont souvent irritants ou toxiques.

• L'entretien de fin de saison ou de fin de campagne :

L'entretien de fin de campagne consiste à remettre le matériel en état pour la saison suivante et à assurer sa bonne conservation pendant la période de remisage. Cette période est l'occasion d'effectuer les réparations et l'entretien préventif. Les principales recommandations édictées par les notices d'entretien des constructeurs sont :

- procéder à un nettoyage approfondi des circuits internes et des parties externes,
- assurer la mise hors gel : vidange complète du circuit de liquide et, le cas échéant, introduire une solution antigel selon les prescriptions de la notice d'instructions,
- détendre les courroies de transmission,
- décompresser les ressorts du régulateur de pression,
- dégonfler l'accumulateur de pression,
- graisser les parties métalliques mobiles,
- remplacer l'huile des carters de lubrification des pompes et des transmissions selon les préconisations du constructeur,
- vérifier l'état du manomètre et ne pas hésiter à le remplacer si nécessaire,
- s'assurer du bon état des dispositifs de protection ; en particulier, sur les transmissions par cardans et à la périphérie des ventilateurs (pulvérisateurs à jet porté et pneumatiques).
- traiter les parties corrodées avec un produit adapté ou effectuer des retouches de peinture.

• DIX RÈGLES POUR MAÎTRISER LES TRAITEMENTS PHYTOSANITAIRES

- 1 – être apte à établir un **diagnostic** de l'état sanitaire des cultures : observations méthodiques, détermination précise des parasites et des mauvaises herbes ;
- 2 – utiliser des produits phytosanitaires adéquats et efficaces en respectant leurs règles d'utilisation, les stades favorables des traitements et les conditions climatiques d'utilisation, sans risques pour la culture traitée ;
- 3 – jalonner les parcelles avec précision ;
- 4 – bien connaître le fonctionnement et les réglages des appareils ;
- 5 – savoir choisir les buses, les entretenir et les contrôler ;
- 6 – être capable de réaliser les traitements avec précision et régularité en respectant la cohérence des valeurs de base (volume/hectare, débit du pulvérisateur et vitesse d'avancement) ;

7 – savoir organiser les traitements selon la topographie des parcelles ;

8 – assurer l'entretien du matériel ;

9 – prendre toutes les précautions utiles pour ne pas mettre en danger l'opérateur, son voisinage, les cultures voisines et l'environnement : eau, sol, animaux, végétaux... dans le respect des limites résiduelles fixées par les réglementations en vigueur ;

10 – actualiser ses connaissances. De nombreuses sessions d'information et de formation sont organisées. Les traitements des cultures font l'objet de nombreuses expérimentations aux niveaux national et régional par les fabricants de produits, les constructeurs de pulvérisateurs, les instituts techniques, les structures de conseil et de développement, les Services régionaux de la protection des végétaux, les coopératives, les CUMA ; ces expérimentations sont rapportées par les revues et la presse spécialisées.

Annexe documentaire	328
– Production végétale	328
– Fertilisation	328
– Traitements phytosanitaires	329
Adresses utiles	331

ANNEXE DOCUMENTAIRE

• PRODUCTIONS VÉGÉTALES

- **Les sols cultivés**, MOREL M., 384 p., 2^e édition, Technique et Documentation - Lavoisier, 1996 ;
- **La production végétale** (2 volumes), VILAIN M., Technique et Documentation - Lavoisier :
volume 1 : Les composantes de la production - 438 p. , 2^e édition 1993,
volume 2 : La maîtrise technique de la production - 448 p., 2^e édition 1996 ;
- **Biologie des plantes cultivées** (2 volumes), LAFON J.-P., LEVY G. et THARAUD-PRAYER C., Technique et Documentation - Lavoisier :
volume 1 : Organisation - physiologie de la nutrition, 256 p., 2^e édition 1996 ;
volume 2 : Physiologie du développement - génétique et amélioration, 176 p., 1990.

• FERTILISATION

- **Fertilité et systèmes de production**, SEBILLOTTE M. éd., 369 p., 1989 ;
- **Glossaire de la fertilisation N.P.K**, Comifer, 18 p., 1993 ;
- **Recueil des bases de préconisation de la fertilisation azotée des cultures**, CORPEN, 1992 ;
- **Bilan de l'azote de l'exploitation**, CORPEN, 1993 ;
- **Propositions pour le code des bonnes pratiques agricoles**, CORPEN, 1993 ;
- **Guide pratique de la fertilisation raisonnée**. Azote agriculture environnement (SNIE, UNCAA, INAC) ;
- **La fertilisation**, 6^e édition, Fédération nationale de l'industrie des engrais ;
- **Guide pratique de la fertilisation**, GROS A. , 1974, 7^e édition ;
- **Caractéristiques physiques des engrais azotés solides**. BOUDANT J., AZF ;
- **Epandage d'engrais minéraux solides granulés**, contrôles au champ, méthodologie, conseils. LE DU J. et MEGNIEN J.-C. Cemagref, 1994 ;

- **Épandage d’engrais minéraux solides** (granulés, perlés, compactés, cristallisés) - Méthodologie, conseils pratiques pour bien épandre, contrôle au champ, Cemagref/Comifer, 60 p., 1995 ;
- **Bien choisir et mieux utiliser son matériel d’épandage des lisiers ou des fumiers**, CORPEN, 1997 ;
- **Engrais de ferme**, valeur fertilisante, gestion et environnement, ITCF-ITP-ITEB, 32 p., 1991 ;
- **L’élevage bovin et l’environnement**, prévenir les risques de nuisances et de pollution, Institut de l’élevage, 256 p., 1991 et 1995 ;
- **Amélioration des pratiques agricoles pour réduire les pertes de nitrates vers les eaux**, CORPEN, 1993 ;
- **Programme national de réduction de la pollution des eaux par les nitrates** provenant des activités agricoles, CORPEN, 1995 ;
- **Estimation des rejets d’azote et de phosphore des élevages de porcs**, CORPEN, 1996 ;
- **Lexique illustré du machinisme et des équipements agricoles**, collection Formagri volume 1. Coédition Cemagref/TEC et DOC, 350 p., 1500 termes, 1991 ;
- **Les tracteurs agricoles**, collection Formagri volume 2. Coédition Cemagref/TEC et DOC, 392 p., 1991 ;
- **J’entretiens mes matériels**, coédition MSA/Cemagref, 1^{re} édition, 24 p. couleur, 1987 ;
- **Catalogue thématique des équipements, index et coordonnées des exposants** des salons internationaux du machinisme agricole et de l’agro-fourriture, Expo-sima.

• TRAITEMENTS PHYTOSANITAIRES

- **Phytoma, la défense des végétaux** : la revue professionnelle de la protection des plantes, publiée par Ruralia, sous les patronages du ministère de l’Agriculture, de l’ANPP et de la FNGPC ;
- **Phytosanitaires, protection des plantes**, BYE P., DESCOINS C., DESHAYES A., coord., INRA, 178 p., 1991 ;
- **Protection des cultures**, SIMON H. et al., Technique et Documentation - Lavoisier, 368 p., 1994 ;

- **Guide pratique de défense des cultures**, ACTA, 560 p., 1 000 photos, 1990 ;
- **Connaissance et application des produits phytosanitaires**, 2 classeurs, ACTA ;
- **Index phytosanitaire**, CLUZEAU S. et direction technique de l'ACTA. Répertoires analytiques des produits phytosanitaires, ce qu'il faut savoir sur la lutte antiparasitaire (informations générales, lecture des étiquettes, dispositions réglementaires, lexique des termes, types de formulations...). 600 p., ACTA (Association de coordination technique agricole), édition annuelle ;
- **Efficacité des herbicides**, GAUVRIT C., INRA, 168 p., 1996 ;
- **Propositions pour le code des bonnes pratiques agricoles**, CORPEN, 1993 ;
- **Protection des cultures et prévention des risques de pollution des eaux par les produits phytosanitaires**. Recommandations générales, CORPEN, 1995 ;
- **Techniques d'application et de manipulation des produits phytosanitaires** utilisés en agriculture. Eléments pour prévenir les risques de pollution des eaux, 83 p., CORPEN, 1996 ;
- **Programme d'action contre la pollution des eaux par les produits phytosanitaires**, CORPEN, 1996 ;
- **Les stockages de solutions azotées, comment les aménager et les exploiter**, Groupama, 18 p., 1996 ;
- **Choisir les outils de pulvérisation**, ITCF, 160 p., 1990 ;
- **Pulvérisateurs**, Mécaguid FNCUMA, 95 p., 1993 ;
- **Je règle et j'entretiens mon pulvérisateur**, Coédition MSA/Cemagref, 2^e édition, 24 p. couleur, 1997 ;
- **Le pulvérisateur - choix et utilisation**, Mostrade O., Oestges O., Huyghebaert B., Presses agronomiques de Gembloux (Belgique), 118 p., 1994 ;
- **Lexique illustré du machinisme et des équipements agricoles**, collection Formagri volume 1. Coédition Cemagref/TEC et DOC, 350 p., 1500 termes, 1991 ;
- **Les tracteurs agricoles**, collection Formagri volume 2. Coédition Cemagref/TEC et DOC, 392 p., 1991 ;
- **Catalogue thématique des équipements, index et coordonnées des exposants** des salons internationaux du machinisme agricole et de l'agro-fourriture. Expo-sima.

ADRESSES UTILES

- **ACTA**

Association de coordination technique agricole (structure inter-instituts et inter-centres techniques agricoles), 149 rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12

- **ADEME**

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, 27 rue Louis Vicat, 75017 Paris

- **AFNOR**

Association française de normalisation, Tour Europe, 92049 Paris la Défense Cedex 7

- **ANDA**

Association nationale de développement Agricole, 25-27 avenue de Villiers, 75017 Paris

- **ANPP**

Association nationale de la protection des plantes, 6 boulevard de la Bastille, 75012 Paris

- **APCA**

Assemblée permanente des chambres d'agriculture, 9 avenue George V, 75008 Paris

- **COMIFER**

Comité français pour le développement de la fertilisation raisonnée, 8 avenue du Président-Wilson, 75116 Paris

- **CIETAP**

Commission interprofessionnelle d'étude des techniques d'application phytosanitaires, 6 bd de la Bastille, 75012 Paris

- **Cemagref**

Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement, Direction de la communication et de la valorisation, BP 22, 92162 Antony Cedex

- **CETIM**

Centre technique des industries mécaniques, 52 avenue Félix-Louat, 60304 Senlis

- **CORPEN**

Comité d'orientation pour la réduction de la pollution des eaux par les nitrates, les phosphates et les produits phytosanitaires provenant des activités agricoles (structure interministérielle : ministère de l'Agriculture et ministère de l'Environnement, et groupes de travail interprofessionnels), 20 avenue de Ségur, 75302 Paris 07 SP

- **EXPO-SIMA**

1 rue du Parc, 92593 Levallois-Perret Cedex

- **FARRE-PPE**

Forum de l'agriculture raisonnée respectueuse de l'environnement - Protection des plantes et environnement, 1 rue Gambetta, 92100 Boulogne

- **FERTIMIEUX**

Actions de l'ANDA pour la maîtrise de la fertilisation et la préservation de l'eau, ANDA, 25 et 27 avenue de Villiers, 75017 Paris

- **FNCETA**

Fédération nationale des centres d'études techniques agricoles, 9 rue de la Baume, 75008 Paris

- **FNCUMA**

Fédération nationale des coopératives d'utilisation de matériel Agricole, 49 avenue de la Grande-Armée, 75116 Paris

- **FNGEDA**

Fédération nationale des groupes d'études et de développement agricole, 9 rue de la Baume, 75008 Paris

- **FNGPC**

Fédération nationale des groupements de protection des cultures, 149 rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12

- **FNIE**

Fédération nationale de l'industrie des engrais, 14 rue de la République, 92800 Puteaux

- **INRA**

Institut national de la recherche agronomique, 147 rue de l'Université, 75338 Paris Cedex 07

- **Institut de l'Élevage**

149 rue de Bercy, 75595 Paris Cedex 12

- **ITCF**

Institut technique des céréales et des fourrages, 8 avenue du Président-Wilson, 75116 Paris

• **Ministère de l'Agriculture, de la pêche et de l'alimentation**

DGAL, sous-direction de la **protection des végétaux**, 175 rue du Chevaleret, 75646 Paris Cedex 13

DEPSE, bureau **hygiène et sécurité**, 78 rue de Varenne, 75349 Paris 07 SP

DERF, bureau agriculture, **ressources naturelles et sols**, 19 avenue du Maine, 75732 Paris 07 SP

• **Ministère de l'Environnement**

Direction de la prévention des pollutions et des risques, direction de l'eau et secrétariat du CORPEN, 20 avenue de Ségur, 75302 Paris 07SP

• **PHYTOMA**

La revue professionnelle de la protection des plantes, 26 rue de Casanova, 75002 Paris

• **PIC-Agri**

Association interprofessionnelle chargée de promouvoir et d'organiser la collecte et l'élimination des produits phytosanitaires inutilisables, 14 rue de la Boétie, 75008 Paris

• **Phytomieux**

Charte nationale sur les bonnes pratiques de pulvérisation des produits phytosanitaires, FNSEA, 11 rue de la Baume, 75008 Paris

• **MSA**

Mutualité sociale agricole, département prévention des risques professionnels, 8-10 rue d'Astorg, 75413 Paris Cedex 08

• **SECIMA**

Syndicat des entreprises de commerce international de matériel agricole, 25-27 rue d'Astorg, 75008 Paris

• **SEDIMA**

Syndicat national des entreprises de service et de distribution du machinisme agricole, 6 boulevard Jourdan, 75014 Paris

• **SNCVA**

Syndicat national des constructeurs de remorques et véhicules agricoles, 51 avenue de Paris, 94300 Vincennes

• **SNIE**

Syndicat national de l'industrie des engrais, 14 avenue de la République, 92800 Puteaux

• **SRPV**

Service régional de la protection des végétaux, antennes départementales du Service Régional de la protection des végétaux, avertissements agricoles, consulter la DDAF du département ou les annuaires

• **SYGMA**

Syndicat général des constructeurs de tracteurs et machines agricoles, 19 rue Jacques Bingen, 75017 Paris

• **TRAME-BCMA**

Tête des réseaux pour l'Appui méthodologique aux entreprises, Bureau de coordination du machinisme agricole, 11 rue de la Baume, 75008 Paris

• **UIPP**

Union des industries de la protection des plantes, 2 rue Denfert-Rochereau, 92100 Boulogne

INDEX ALPHABETIQUE GENERAL

Les renvois aux numéros de page inférieurs à 192 concernent la partie **fertilisation**.

Les renvois aux numéros de page supérieurs à 192 concernent la partie **traitement des cultures**.

A

abrasion mécanique, 132
absorption racinaire, 20
accumulateur oléo-pneumatique, 291
Adjuvant, 195
aération des fumiers compostés, 140
agitateur, 55
agitation, 248, 259
alimentation, 259
alimentation gravitaire, 61
alimentation mécanique, 61, 64
Amendement, 15
ammoniac, 49
ammoniac anhydre, 47
amortissement, 292
amortisseur, 258
amortisseur pneumatique, 258
analyseur Agro-lisier, 145
analyseur Agros, 145
analyseur Quantofix, 144
analyseurs, 144
angle de pulvérisation, 225, 226, 233
anomalies de symétrie, 125
antigoutte, 196, 296
appareils à rampes, 55
arbre vilebrequin, 253
assimilation chlorophyllienne, 20
attelage, 131
attelage des appareils, 119
aubes, 61
azote, 23, 137
azote ammoniacal, 144
azote organique, 144

B

bac de réception, 111, 112, 123, 192
balancier, 152, 173
banc de répartition, 226
bandes transporteuses, 64
bâti central, 287
benne de ravitaillement, 54
bielle, 253
bielle-manivelle, 156
biellettes, 292
bilan azote, 14, 27
bilan cultural, 14, 27
bilan humique, 10
bilan prévisionnel, 28
bilan-diagnostic, 14, 29
biodisponibilité, 12, 22
boggie, 152, 173
boisseau sphérique, 265
boîte de vitesses, 73, 77
bordure, 128
bouillie, 195
bras de chargement latéral, 176
bras de chargement supérieur, 177
bras oscillant, 55
buse à miroir, 235
buse à pression de liquide, 196
buse à turbulence, 223, 230, 232
buse-palette 178, 181
buses, 196, 219, 243
buses à double fente, 230
buses à fente, 224, 243
buses à filets, 223, 236
buses à miroir, 223, 233

buses antidérive à fente, 230
buses bifluide à air comprimé, 235
buses bifluide à aspiration d'air, 234
buses bifluides, 223
buses centrifuges, 236
buses centrifuges à cage rotative, 238
buses de pulvérisation, 219
buses en acier inoxydable, 222
buses en céramique, 222
buses en laiton, 223
buses en résine de synthèse, 222
buses pneumatiques, 239, 289, 310
buses rotatives, 236

C

cadre-support, 287
caisse à fond mouvant, 153
caisse à ridelles, 153
caisse d'épandeur, 153
caisse monocoque, 153
calcium, 25
calcul du coefficient de variation, 114
calibre de buse, 319
canon, 312
capteur, 97, 100, 279, 282
capteur de roue, 97, 279
capteur à effet Hall, 284
capteur à jauges de contraintes, 286
capteur à ultra-sons, 291, 293
capteur de débit, 285
capteur de pression, 285
capteur de rotation, 282
capteur de vitesse d'avancement, 284
capteur de zone, 303
capteur inductifs, 282
capteur piézo-électrique, 285
caractérisation des produits, 136
caractéristiques physiques des engrais, 38
carence, 10
cartographie de la fertilité, 102
chambre de turbulence, 230, 231
chargement pneumatique, 174
châssis, 152, 172
choix du calibre des buses, 319
circuit de bouillie, 246
circuit de retour, 262
circulation classique, 246
circulation continue, 247
circulation semi-continue, 246
citerne, 173
clapets flottants, 176
code couleur, 225
coefficient, 196
coefficient (CH), 196, 215
coefficient (CV), 107
coefficient (H), 214
coefficient de débit, 220, 232
coefficient de minéralisation, 10
coefficient de variation, 19
coefficient de variation, 107
coefficient d'homogénéité, 196, 213, 215
coefficient d'homogénéité CH, 229, 237
coefficient engrais, 15
coefficient isohumique, 10
commande à distance, 55
commande directe, 55
complexe argilo-humique, 11
compost, 15, 140
compostage des fumiers, 139
compresseur, 174
concentration proportionnelle
à l'avancement, 281
concentrés émulsionnables, 210
concentrés liquides solubles, 209
conduites de transfert, 84
console, 96, 99, 279
contrôle automatique de la hauteur, 291
contrôle du débit, 126
convergent, 310
convoyeur, 64
corps de pompe, 253, 255, 259
correction active, 293
corrosion, 132
coulisseau, 253
courbe de recouvrement, 106, 107
courbe de répartition, 105, 191, 192
couverture, 205
culasses, 256
culture intermédiaire, 15
cuve de rinçage, 200, 249
cuve lave-mains 200, 249

cuves des pulvérisateurs, 248, 249
cylindre, 253
cylindrée, 257

D

débit 69, 197, 257
débit de remplissage, 176
débit de retour, 248
débit d'épandage, 166
débit du compresseur, 176
débit du pulvérisateur, 200, 318
débit d'un distributeur d'engrais, 126
débit individuel d'une buse, 220
débit moyen d'un épandeur, 166
débit moyen des buses, 321
débit nominal, 225
débit proportionnel à la vitesse
d'avancement, 275
débit proportionnel au régime moteur, 271
débit proportionnel électronique, 279
débitmètre de bouillie, 248
déflecteur angulaire, 76
déflecteurs latéraux, 75
densité d'impact, 197, 299
dépôt des gouttes, 219
dérive 197, 207
diagramme de distribution, 114
diagramme de recouvrement, 107
diagramme de répartition transversale, 18
diagramme d'épandage, 18
diamètre de Sauter 197, 214, 310
diamètre des gouttes, 212
diamètre médian, 41
diamètre médian numérique, 214
diamètre médian volumique, 214
diamètre moyen des gouttes, 213
diffuseurs, 85
diffuseurs d'air, 305
direction de la projection, 66
dispositif d'épandage de bordure, 128
disque, 66
disques 61
disques à pales interchangeable, 76
distance de passage, 106, 116
distributeur, 17, 180, 301
distributeurs à disque unique, 125

distributeurs à doubles disques, 125
distributeur pendulaire, 83
distributeurs centrifuges à disques, 61
distributeurs mécaniques à vis, 86
distributeurs par projection, 57
distributeurs pneumatiques, 128
distribution, 261
distribution granulométrique, 40
divergent, 310
dose (de fertilisation), 13, 27
dose de lisier, 188
dose (phytosanitaire), 195, 205
doseurs, 84
DPA, 200, 275
DPA à régulation de la cylindrée
de la pompe, 275
DPA à régulation de la vitesse
de rotation de la pompe, 276
DPA à régulation du débit de pompe, 275
DPA par régulation du débit
de retour en cuve, 277
DPE, 279
DPM, 201, 271
DPM à débit de retour régulé, 274
DPM à retour calibré constant, 271
dureté, 44

E

échantillon, 137
efficacité de couverture, 323
effluent, 15
électro-aimant, 263, 264
électro-distributeurs, 293
électrovanne, 263
électrovannes à action directe, 263
électrovannes à actions étagées, 263
élément fertilisant, 16
élément nutritif, 12, 16
éléments grossiers, 146
embouchure-relais, 177
émiettement, 158
émulsion, 209
enfouissement à l'épandage, 147
enfouissement après épandage, 147
enfouisseurs à deux disques, 185
enfouisseurs de lisier, 184

enfouisseurs d'engrais, 91, 93
enfouisseurs polyvalents, 187
enfouisseurs pour les sols travaillés, 185
enfouisseurs sur prairies, 184
engrais, 16
engrais azotés, 34
engrais composés, 35
engrais minéral, 16
engrais minéraux 30
engrais organique, 16
engrais phosphatés, 34
engrais potassiques, 35
engrais vert, 16
entraînement du fond mouvant, 156
entraînements synchrones, 64
entretien des distributeurs d'engrais, 131
entretien des buses, 324
entretien des pulvérisateurs, 323
épandage en bandes, 91
épandage en bordure, 128, 131
épandage en plain, 55
épandeur, 17
épandeurs à vis et plateaux
centrifuges arrière, 162
épandeurs de fumier, 149
épandeurs de fumier à épandage
latéral, 158
épandeurs de lisier, 172
épandeurs en nappe, 89
épandeurs latéraux à fléaux, 162
épandeurs latéraux à vis et turbine, 162
essai de débit, 127
essais au champ, 111
essieux, 152, 173
étalement granulométrique, 41
étalonnage intégré de la largeur
de travail, 100
étalonnage intégré du débit, 99
excentrique, 253

F

fabrication des gouttes, 216
facteurs climatiques, 131
fermentation anaérobie, 147
fertilisants organiques, 30, 136
fertilisation, 13, 22

fertilisation des bordures, 77
fertilisation localisée, 85
fertiliseurs associés aux semoirs, 95
fiches de données sécurité
des produits, 210, 316
filtres, 229, 250
finesse de filtration, 250
flux de pulvérisation, 299
flux descendant, 304
flux orientable et/ou adaptable, 305
flux radial, 304
flux tangentiel, 305
fond mouvant, 154
fongicides, 206
force centrifuge, 67
force tangentielle, 67
forme des pales, 68
formulant, 195, 209
fragmentation du liquide, 219, 236
freinage assisté, 153
freinage d'urgence, 153
friabilité, 44
fumier, 137
fumiers compostés, 139
fumure, 13
fumure de couverture, 13
fumure de fond, 13

G

germination, 207
gestion intraparcellaire, 101
goutte, 198
granulés dispersibles, 210
granulomètre, 42

H

hauteur des rampes, 290, 322
hélice, 230
herbicides, 207
hérissons horizontaux, 157
homogénéisation des lisiers en fosse, 170
homogénéité de gouttes, 315
humectation, 201
humus, 11
hydro-injecteur, 201

I

ILS, 282
inclinaison des pales, 67
incorporateur, 201, 250
indicateur d'inclinaison, 76
influence de la pente, 130
influence du débit, 69
insecticides, 207
interrupteur magnétique à lame souple, 282
intervalle de passage, 17
inverseur de marche, 156

J

jalonnage, 322
jalonnement 116, 131, 315
jalonnement de post-levée, 116
jalonnement de pré-levée, 116
jauge, 201, 248
jet pinceau, 225
jet porté, 218, 298
jet projeté, 218, 243, 298
jet projeté dirigé par un courant d'air, 289

L

largeur de travail, 17, 106, 121,
166, 168, 201
largeur de travail fixe, 121
largeur de travail réglable, 121
largeur d'épandage, 191
largeur optimale de travail, 18, 106
largeur totale d'épandage, 106
lessivage, 11
limiteur de pression, 176
limiteurs de couple, 150
lisier homogénéisé, 146
lisiers, 142
lixiviation, 11
localisateur d'engrais en lignes, 93
localisation angulaire, 69
localisation en lignes, 91
localisation en nappe, 91
localisation radiale, 69
longueur des pales, 67

M

magnésium, 25
main, 312
malaxeurs, 146
malaxeurs à vis, 171
malaxeurs de lisier, 170
manchettes de localisation, 85
manomètre, 270
masse volumique, 40
masse volumique du fumier, 138
matière sèche, 143
matières fertilisantes, 16
matières organiques, 11
mauvaises odeurs, 147
mélangeurs, 146
membrane, 254, 256, 264,
mesure de débit
(de pulvérisation), 320
minéralisation, 12
mixeurs 146, 170
mode d'emploi des produits
(phyto), 316
moteur hydraulique, 80, 156, 180

N

nappe d'épandage (d'engrais), 105
nitrates, 14
nitrification, 12
NMD, 198, 214
nombre d'impacts, 315
normalisation des buses, 223
notice d'instructions, 118, 131, 210, 317
notice d'utilisation, 118, 131, 210, 317
nutrition des plantes, 12

O

odeurs, 147
oligo-éléments, 25
organes d'épandage arrière
à axes horizontaux, 157
organes d'épandage arrière
à axes verticaux, 158
oxygénation avant épandage, 147

P

pale (de distributeur d'engrais), 61, 66
pales (de pulvérisateur), 303
pales asymétriques (de distributeur), 75
pales étagées (de distributeur), 81
pales inclinables (de distributeur), 75
palettes, 61
panneaux récupérateurs de bouillie, 300
pastille, 230, 231, 232, 234, 310
pendillards, 181
pénétration des gouttes, 219, 299
pente, 130
percolation, 12
phosphore, 24, 137
piston, 253, 256
plantule, 208
pneumatique (pulvérisation), 298
point de chute sur le disque, 69
pompe centrifuge, 260
pompe de remplissage, 248
pompe volumétrique, 301
pompes (de pulvérisation), 252
pompes à lisier, 170, 171
pompes à pistons, 252
pompes à pistons à cylindrée variable, 254
pompes centrifuges, 259
pompes volumétriques, 252
pompes volumétriques à pistons-
membranes, 254
population de gouttes, 198
porte de dosage, 161
porte télescopique, 149
porte-buse, 224, 243
portique, 287
post-levée, 208
potasse, 137
potassium, 25
poudres mouillables, 210
poudres solubles 210
précision des passages, 116
pré-levée, 207
préparation (phyto), 195
pression, 198
pression de pulvérisation, 319
produits en émulsion, 210

profil de répartition transversale, 105
profils aérodynamiques, 310
protection des points d'eau, 316
protection individuelle, 315
puissance, 258
pulsation, 258
pulvérisateur, 201
pulvérisateur à pression de liquide
à jet projeté, 201
pulvérisateur centrifuge, 202
pulvérisateur pneumatique, 202, 306
pulvérisateurs à jet porté, 202, 301
pulvérisateurs à jet porté
à flux orientable et/ou adaptable, 304
pulvérisateurs à jet porté à flux radial, 304
pulvérisateurs à jet porté à flux radial, 304
pulvérisateurs à jet porté,
à flux tangentiel, 304
pulvérisateurs à jet projeté, 299
pulvérisateurs automoteurs, 244
pulvérisateurs portés, 244
pulvérisateurs pour cultures basses, 243
pulvérisateurs traînés, 244
pulvérisation, 199

R

radar, 97, 280, 284
raisonnement agronomique, 136
rampe, 202, 287, 288
rampes à assistance d'air, 289
rampes (lisier) à distribution centrale
rotative, 180
rampes (lisier) à distribution centrale
statique, 180
rampes (lisier) à distribution en ligne, 181
rampes (lisier) à pendillards, 181
rampes à structure en matériaux
composites, 289
rampes d'épandage de lisier, 147, 179
rampes en acier, 288
rampes en alliage léger, 288
rampes horizontales, 243
rampes verticales, 299
recouvrement (fertilisants), 18,
57, 105, 109, 114, 192
recouvrement des jets, 199

régime d'entraînement, 120
réglage de débit (d'engrais), 86
réglage de la hauteur des rampes, 290, 291
réglage de la largeur d'épandage, 71
réglage des pales, 74
réglage du débit (fertilisation), 55, 64, 71, 127, 188
réglage du point de chute, 72
règles d'attelage, 119
régularité de la répartition longitudinale, 323
régularité de la répartition transversale, 322
régularité d'épandage (fertilisation), 18, 46, 105, 168, 191
régulateur de débit, 120
régulateur de pression, 267, 270, 301
régulation, 271, 275
régulation à pression constante, 266, 267
régulation de débit, 86
régulation de pression, 266
régulation DPA, 96
régulation électronique, 279, 280
régulation hydraulique, 278
régulation mécanique centrifuge, 277
régulation par la mesure de la pression, 280
régulation par la mesure du débit, 280
relation débit-pression, 221
remplissage, 259
rendement, 257
répartition, 222
répartition dimensionnelle des gouttes, 213
répartition longitudinale (fertilisation), 166, 167
répartition transversale (fertilisation), 18, 105, 106, 113, 114, 166, 168, 191, 199
repliage des rampes, 294
reprise en masse (engrais), 45, 54
résistance à la reprise d'humidité, 45
résistance à la reprise en masse, 45
respiration, 20
retour en cuve, 267, 268, 271
retourneur d'andains (compost), 142
rhizobium, 23
rideau d'air (rampe à), 289
rinçage des pulvérisateurs, 324

rotation convergente des disques, 61, 76
rotation divergente, 61
rotors d'épandage, 150
rotors verticaux, 158
roue à aubes, 259
rouleaux d'éjection, 55
rouleaux doseurs, 55

S

secteur d'épandage, 69
sédimentation, 146
séparateur à membrane, 270
séparation de phases, 170
servo-vannes, 265
solution (phyto), 209
solution du sol, 24
soufflerie, 84
soufre, 25
soupapes, 253
soupapes d'aspiration et de refoulement, 257
sous-dosage, 129
span, 199, 215
spectre de pulvérisation, 199, 213
sphéricité, 43
stabilisation à biellettes, 292, 293
stabilisation des rampes, 291
stabilisation pendulaires, 292
stabilisation verticale et transversale, 292
substance active, 195, 209
surdoser, 129
suspension (phyto), 209
suspension des pulvérisateurs, 294
suspensions concentrées (phyto), 210
symétrie d'épandage, 123, 125
système anti-débordement, 176
systèmes de régulation du débit, 96
systèmes DPA, 189
systèmes intégrés d'étalonnage 99

T

table de réglage, 75
tables de références, 72
tables d'épandages, 161
taille des gouttelettes, 223
tandem, 152, 173

tarage, 127
taux d'azote ammoniacal, 144
taux de couverture, 200
taux de poussières, 45
taux d'écoulement, 43
taux d'usure, 229
télécommande, 55
temps de transfert, 69
teneur en azote ammoniacal, 144
teneur en chlorophylle, 29
teneur en nitrate, 29
teneurs moyennes en éléments fertilisants, 137
terrains en pente, 130
test de recouvrement, 123
test d'épandage, 123
titre (engrais), 13
tonne à lisier, 172
traitements fongicides, 206
traitements herbicides, 207
traitements insecticides, 207
transmission à cardans, 150
transpiration, 20
transport des gouttes, 216
transport pneumatique, 55
trappes de débit, 79
trémie, 53
turbine, 158, 162, 259, 285, 301
tuyère, 301, 310

U

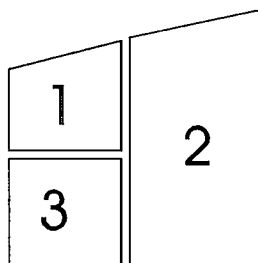
unité fertilisante, 13
usure, 132

V

valeur agronomique des lisiers, 142
vanne de retour, 272
vanne d'épandage, 178
vanne primaire, 262
vannes à boisseau sphérique, 262
vannes à clapet, 262
vannes à papillon, 265
vannes d'inversion, 176
vannes motorisées, 265
vannes secondaires, 262
vent, 131

ventilateur axial, 301
ventilateur hélicoïdal, 306
venturis, 306
vérification de la largeur effective d'épandage, 123
vérin de relevage, 291
vérin hydraulique, 291
vis, 162
vitesse d'avancement, 125, 317
vitesse de projection, 65
vitesse de rotation des disques, 67
vitesse du vent, 131
vitesse périphérique, 150
VMD, 198, 214, 237
volume d'une goutte, 212
volume résiduel, 203
volume/hectare, 202
volume/hectare, 315, 318

CREDIT PHOTOS



• Photos de couverture :

Photo 1 : buse et jet de pulvérisation, photo CEDRA C., Cemagref,

Photo 2 : paysage de Beauce, photo CEDRA C., Cemagref,

Photo 3 : image « vidéo rapide » réalisée par le laboratoire du Cemagref de Montoldre pour l'étude d'une distribution centrifuge d'engrais.

• Photos des chapitres 1 à 10 :

20 : Sulky

21 : Kuhn

24 : Kuhn

28 : Cemagref

45 : Lely

46 : Cemagref

51 : Greenland Vicon

56 : Sulky

66 : Cemagref

67 : Cemagref

68 : Agram Bogballe

69 : Cemagref

79 : Cemagref

80 : Cemagref

91 : Cemagref

106 : Cemagref

107 : Cemagref

117 : Cemagref

123 : Cemagref

142 : Cemagref

148 : Cemagref

149 : Jeulin

150 : Cemagref

151 : Cemagref

155 : Cemagref

162 : Cemagref

182 : Tecnomat

184 : Cemagref

185 : Cemagref

187 : Berthoud

188 : Tecnomat

190 : Tecnomat

195 a : Cemagref

195 b : Cemagref

199 : Berthoud

206 : Berthoud

226 : Tecnomat

227 : Berthoud

238 : Cemagref

240 : Hardi

241 : Cemagref

248 : Cemagref

249 : Berthoud

256 : Tecnomat

262 : Berthoud

CREDIT DESSINS

• **Schémas et figures** : création et maquettes Cemagref - DICOVA, réalisation Cemagref et INGEDOC, 91 Villebon.

Les figures indiquées ci-après ont été réalisées d'après une documentation fournie par le constructeur ou son représentant en France :

26 : Bogballe	183 : Tecnomia
27 : Sulky	200 : Tecnomia
36 : Sulky	201 : Annori Reverberi
37 : Greenland Vicon	202 : Caruelle
38 : Kuhn	207 : Annori Reverberi
39 : Amazone	212 : Tecnomia
40 : Amazone	219 : RAU
41 : Bogballe	221 : Berthoud
42 : Bogballe	223 : Caruelle
43 : Bogballe	224 : Tecnomia
44 : Bogballe	233 : Dickey John
47 : Lély	239 : Hardi
49 : Kuhn	245 : Tecnomia
50 : Greenland Vicon	254 : Tecnomia
59 : Greenland Vicon	255 : Tecnomia
60 : Greenland Vicon	
62 : Carré	
97 : Ménard	
98 : Jeantil	
99 : Quantofix	
102 : Miro	
121 : Heywang	
124 : Jeulin	
127 : Lucas. G	
130 : Pichon	
131 : Ansager	
154 : Sodimac	
156 : LH Agro	
166 : Albuz	
173 : Albuz	
175 : Albuz	
177 : Albuz	
178 : Albuz	
179 : Blanchard Airtec	
180 : Albuz	

Les matériels de fertilisation et de traitement des cultures - 1997 - Collection FORMAGRI, volume 4/5. 1^{re} édition - ISBN 2-85362-458-7 (Cemagref). ISBN 2-7430-0187-9 (TEC et DOC).
Copyright : Cemagref Editions 1997 - Coordination : Camille Cédra - Mise en page : Malika Daoud - Impression : Bialec, 54012 Nancy - Crédit photos et dessins : pp. 341 et 342 - Edition : Cemagref-Dicova, BP 22, 92162 Antony Cedex, tél. 01 40 96 61 21 ; ITCF, 8 avenue du Président-Wilson, 75116 Paris et FNCUMA, 49 avenue de la Grande-Armée, 75116 Paris - Vente aux libraires : TEC et DOC, 14 rue de Provigny, 94236 Cachan Cedex, tél. 01 47 40 67 00.

Prix de vente : 195 F TTC

La maîtrise de la fertilisation et de la protection sanitaire des cultures constitue un atout économique évident mais aussi une démarche décisive pour une agriculture respectueuse de l'environnement et de la qualité de ses productions.

Illustré de 265 dessins et photographies, ce livre *les matériels de fertilisation et de traitement des cultures* aborde les thèmes suivants :

- . fonctionnement simplifié des plantes,
- . caractéristiques des produits fertilisants minéraux et organiques,
- . techniques d'application des fertilisants,
- . description complète des distributeurs d'engrais et des épandeurs,
- . caractéristiques des pulvérisations phytosanitaires et description des pulvérisateurs,
- . réglages favorisant les applications précises.

Réalisé par le Cemagref en collaboration avec ses partenaires, l'ouvrage est coédité avec l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages et la Fédération Nationale des Coopératives d'Utilisation des Machines Agricoles.

Un livre de référence pour l'enseignement, les techniciens, les agriculteurs, leurs conseillers et prescripteurs.



Coédition
Cemagref
ITCF
FNCUMA
Lavoisier Tec et Doc