

L'ASPERSEUR ET SES PROBLÈMES

PAR P. PERNÈS *

PREMIÈRE PARTIE

L'asperseur et ses problèmes

L'irrigation traditionnelle délivrant l'eau selon un « tour » pré-établi, cède actuellement le pas à une technique nouvelle plus économique et d'un maniement beaucoup plus souple : l'irrigation par aspersion.

Schématiquement, un périmètre d'irrigation par aspersion se caractérise par l'existence d'un réseau de canalisations enterrées et d'un réseau de canalisations mobiles de surface, reliés par des prises spéciales appelées « bornes d'irrigation », dont le but essentiel est d'assurer à l'origine du réseau mobile, des caractéristiques hydrauliques (pression et débit) aussi régulières que possible.

Sur les rampes d'arrosage du réseau mobile, sont fixés les asperseurs, dont le rôle est d'assurer une répartition uniforme de l'eau sur la parcelle à irriguer. Point ultime d'un réseau, l'asperseur a donc la lourde responsabilité d'assurer par ses performances techniques, une irrigation aussi parfaite que possible.

1. Classification et description sommaire des asperseurs.

Les asperseurs sont des appareils rotatifs qui pulvérisent l'eau en assurant sa bonne répartition à la surface du sol.

Les asperseurs sont classés en deux grandes catégories. Les asperseurs à haute pression, d'une part

et les asperseurs à basse et moyenne pression, d'autre part.

Les asperseurs à haute pression sont de véritables lances d'arrosage dont le mouvement de rotation est généralement obtenu au moyen d'une turbine logée dans le corps même de l'asperseur. Le mouvement rotatif de ces appareils peut être obtenu par le jeu d'une roue à ailettes placée devant le jet et entraînée par ce dernier. Ces asperseurs fonctionnent sous des pressions allant de 5 à 8 bars. Leur portée peut atteindre 60 m et leur débit est d'environ 100 à 120 m³/h.

Les asperseurs à haute pression présentent donc la caractéristique de posséder un mouvement de rotation continu. Il n'en est pas de même en ce qui concerne la seconde catégorie, dont nous allons donner une description sommaire, à savoir les asperseurs à basse et moyenne pression.

Ceux-ci présentent un mouvement de rotation discontinu, car leur jet se déplace par à-coups successifs au moyen d'un dispositif à percuteur constitué d'un marteau horizontal ou d'un balancier vertical actionné par le jet lui-même. L'angle horizontal décrit à chaque battement est sensiblement constant, mais la fréquence de ceux-ci dépend essentiellement de la tension donnée au ressort de rappel du marteau.

Les asperseurs à basse et moyenne pression fonctionnent sous une pression dont la gamme s'étend de 1,5 à 4,5 bars. L'angle de tir de l'ajutage de l'asperseur, orifice par où sort le jet, varie suivant le modèle et suivant sa destination. En général cependant, cet angle possède une valeur voisine de 30° et assure en effet, toutes choses égales par ailleurs, la plus grande portée au jet pulvérisé. La gamme des diamètres des ajutages varie assez

* Ingénieur du Génie rural, des Eaux et des Forêts, Section de l'Hydraulique et de l'Electricité au C.R.E.G.R.

considérablement afin d'assurer, par le jeu de cette variable, la pluviométrie horaire s'adaptant le mieux aux données climatiques et pédologiques de la zone à irriguer.

2. Problèmes posés par l'asperseur.

L'asperseur devant assurer un arrosage uniforme, il est indispensable, pour guider le choix de l'utilisateur, de déterminer un critère significatif des performances de celui-ci. Il est indispensable en outre, de connaître le jeu relatif des diverses variables susceptibles d'influencer cette répartition. La connaissance du spectre granulométrique d'un asperseur est le reflet des conditions physiques réalisées au niveau de l'ajutage. Des problèmes annexes, mais capitaux, se posent aussi. La granulométrie d'un asperseur est en relation avec l'action du vent. Si un asperseur pulvérise trop fin, un vent même de faible vitesse perturbera la répartition statistique de l'eau. On aura donc tendance à augmenter le diamètre moyen des gouttes afin d'assurer à celles-ci une meilleure stabilité. Une granulométrie trop grosse présentera par contre l'inconvénient d'entraîner, à plus ou moins longue échéance, une battance des terres et une mortification des végétaux, l'énergie cinétique des gouttes pouvant être relativement élevée.

Il est vite apparu la nécessité d'une théorie cohérente mettant en lumière les différents paramètres qui conditionnent le phénomène de l'aspersion. Le but poursuivi dans cette étude est de donner quelques éléments de réponses ou quelques bases théoriques permettant de résoudre les problèmes sommairement évoqués ci-dessus.

3. Explication qualitative du phénomène de l'aspersion.

Avant tout exposé théorique de la question, il semble utile de donner, du phénomène de l'aspersion, une description qualitative. Observons un asperseur dont le mécanisme de rotation a été arrêté. Dans la zone proche de l'ajutage, existe une veine liquide continue qui s'évanouit progressivement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de celui-ci. Cette dislocation progressive peut s'expliquer en considérant que la viscosité cinématique de l'air ambiant est sensiblement treize fois supérieure à la viscosité cinématique de l'eau à température normale. Cette différence importante dans la viscosité cinématique des deux fluides permet de poser l'hypothèse du freinage de la couche périphérique de la veine liquide par l'air ambiant. Dans la veine liquide, existe donc un fort gradient de vitesse. On conçoit par conséquent que la couche périphérique se déchire et se résout en gouttes. Mais à la périphérie de la veine liquide, dont l'intégrité s'est trouvée protégée jusqu'ici, se forme immédiatement une nouvelle couche périphérique qui subit le même sort que la précédente. Ainsi s'use progressivement la veine. L'énergie cinétique de celle-ci diminue au fur et à mesure de sa progression dans l'air ambiant. Toutes choses égales par ailleurs, le freinage devient moins intense puisque, globalement, la veine a perdu une partie de sa vitesse. La fragmentation en gouttes devient de moins en moins instantanée et les forces de tension superficielles de celles-ci jouant, elles seront de plus en plus grosses au fur et à mesure de la progression de la veine. Ce

phénomène est semblable dans son explication à celui qui se passe dans une conduite où, à partir de la périphérie, des forces de frottement sont engendrées.

Les forces tangentielles qui s'exercent dans la couche périphérique provoquent aussi une dissipation d'énergie, créant un régime turbulent dont le résultat qualitatif est de dilacerer la veine en filets liquides puis en gouttes, tout en la dilatant. Quand le niveau énergétique des filets liquides approche celui des forces de tension superficielle, ceux-ci se résolvent en gouttes.

Ce qui précède explique qualitativement pourquoi le spectre granulométrique croît constamment depuis l'origine du jet jusqu'à la zone de portée maximale dans laquelle il est facile d'observer statistiquement les gouttes de diamètre maximal.

On peut aussi expliquer pourquoi plus la pression augmente et plus le spectre granulométrique s'affine, l'énergie cinétique de la veine croissant, toutes choses égales par ailleurs, avec la pression. Enfin, plus on augmente le diamètre de la buse et plus le diamètre des gouttes supposées sphériques sera grand. Cela tient au fait que les forces tangentielles dues au frottement de l'air sur la veine mettront plus de temps à disloquer totalement celle-ci.

4. Théorie balistique de l'asperseur fixe.

La mise en équation des phénomènes balistiques d'un asperseur nécessite un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, dont certaines seront en contradiction avec ce qui a été dit ci-dessus. Nous verrons à la fin de cet exposé comment il est possible de lever ces contradictions.

- a) hypothèse concernant la formation des gouttes : les gouttes seront supposées formées dès la sortie de l'ajutage;
- b) hypothèse concernant la forme des gouttes : les gouttes seront supposées sphériques et indéformables;
- c) hypothèse concernant la résistance de l'air : le vecteur résistance de l'air est colinéaire au vecteur vitesse de la goutte, opposé au vecteur vitesse et a pour module :

$$R = AV^2 \tag{1}$$

Cette hypothèse est due au fait que la valeur de la vitesse initiale interdit l'utilisation de la loi de Stokes;

- d) hypothèse concernant le terme A. La valeur de A sera supposée constante durant tout le mouvement, ce qui nécessite que le produit de la valeur du coefficient de traînée C_x de la goutte par le maître couple S de celle-ci soit indépendant du vecteur vitesse. L'hypothèse concernant la forme des gouttes permet en définitive d'admettre que le coefficient de traînée C_x garde une valeur constante le long d'une trajectoire quelles que soient les variations possibles de la vitesse le long de celle-ci.

$$A = \frac{1}{2} C_x S \rho' \tag{2}$$

Dans l'expression de A, ρ' désigne la masse volu-

mique de l'air pour des conditions de pression et de température définies.

Négligeant les forces dues à la poussée d'Archimède sur les gouttes et en considérant ces dernières réduites à leur centre de gravité, les équations différentielles du mouvement s'écrivent :

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2x}{dt^2} &= -AV^2 \cos \varphi \\ m \frac{d^2z}{dt^2} &= -mg - AV^2 \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Le mouvement est rapporté à un système d'axes orthonormés ox, oz dont l'origine est située au centre de la section de sortie de l'ajutage. On suppose aussi que l'axe ox et l'axe de l'ajutage forment un angle α qui n'est autre que l'angle de tir à l'origine.

La variable φ désigne l'angle (\vec{ox}, \vec{V}) que forme l'axe des abscisses avec le vecteur vitesse.

Sachant que :

$$\frac{dx}{dt} = V \cos \varphi \quad \text{et} \quad \frac{dz}{dt} = V \sin \varphi \quad (4)$$

il est possible de condenser les deux équations du système (3) en une seule équation différentielle où la vitesse s'exprime en fonction du seul paramètre φ :

$$\frac{dV}{V d\varphi} = \operatorname{tg} \varphi + \frac{AV^2}{mg \cos \varphi} \quad (5)$$

En effectuant le changement de variable :

$$V \cos \varphi = u \quad (6)$$

l'équation différentielle (5) se transforme en une équation différentielle du premier ordre à variables séparables. Compte tenu des conditions à l'origine, qui sont :

$$\varphi = \alpha \quad V = V_\alpha \quad (7)$$

nous obtenons l'équation de l'hodographe du mouvement, qui a pour expression :

$$\frac{1}{V^2 \cos^2 \varphi} + \frac{A}{mg} F(\varphi) = \frac{1}{V_\alpha^2 \cos^2 \alpha} + \frac{A}{mg} F(\alpha) \quad (8)$$

Dans l'expression (8), nous avons introduit la fonction $F(\varphi)$ telle que :

$$F(\varphi) = 2 \int_0^\varphi \frac{d\varphi}{\cos^3 \varphi} \quad (9)$$

Il est facile de montrer que la valeur absolue de la vitesse passe par un minimum pour une valeur de φ comprise entre 0 et $-(\pi/2)$, c'est-à-dire en un point de la partie descendante de la trajectoire en supposant α positif et différent de zéro.

On démontre d'autre part que V tend vers une limite pour φ tendant vers $-(\pi/2)$ et que cette limite a pour valeur :

$$V_\infty = \sqrt{\frac{mg}{A}} \quad (10)$$

L'existence de cette vitesse limite implique l'existence d'une asymptote verticale pour la trajectoire.

Les coordonnées paramétriques de la trajectoire seront obtenues en résolvant le système (11).

$$\left. \begin{aligned} dx &= -\frac{1}{g} V^2 d\varphi \\ dz &= -\frac{1}{g} V^2 \operatorname{tg} \varphi d\varphi \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Ce qui conduit à formuler la trajectoire par les deux équations suivantes :

$$\begin{aligned} x(\varphi) &= -\frac{1}{g} \int_\alpha^\varphi \frac{d\varphi}{\cos^2 \varphi \left[\frac{1}{V_\alpha^2 \cos^2 \alpha} + \frac{A}{mg} \times [F(\alpha) - F(\varphi)] \right]} \\ z(\varphi) &= -\frac{1}{g} \int_\alpha^\varphi \frac{\operatorname{tg} \varphi d\varphi}{\cos^2 \varphi \left[\frac{1}{V_\alpha^2 \cos^2 \alpha} + \frac{A}{mg} \times [F(\alpha) - F(\varphi)] \right]} \end{aligned} \quad (12)$$

Ces équations sont inintégrables au sens analytique du terme. Il a donc été nécessaire de mettre au point une méthode d'intégration numérique. Il s'offrait plusieurs méthodes et le choix s'est fixé après avoir constaté que la longueur de la trajectoire peut être représentée par une fonction relativement simple. La longueur de la trajectoire est en effet donnée par la relation :

$$S_{\alpha^\varphi} = \frac{m}{2A} \log_e \left(1 + \frac{AV_\alpha^2 \cos^2 \alpha}{mg} [F(\alpha) - F(\varphi)] \right) \quad (13)$$

Dans certains domaines, cependant, il est possible de trouver des fonctions rendant très bien compte de la trajectoire. Ceci est basé sur le fait que dans l'intervalle :

$$0 \leq |\varphi| < \frac{\pi}{4}$$

il est possible de trouver un développement limité de la fonction $F(\varphi)$ qui rend intégrable les équations (12).

$$F(\varphi) = -\sum_{i=0}^{i=n} \frac{(-1)^i (2i)!}{(4i^2 - 1) 2^{2i-1} (i!)^2} \operatorname{tg}^2 \varphi \quad (14)$$

En nous limitant à l'ordre 5, $F(\varphi)$ a pour expression approchée :

$$F(\varphi) = 2 \operatorname{tg} \varphi + \frac{1}{3} \operatorname{tg}^3 \varphi - \frac{1}{20} \operatorname{tg}^5 \varphi + \beta \operatorname{tg}^7 \varphi \quad \text{avec } |\beta| < 1 \quad (15)$$

Lorsque $|\varphi| < (\pi/18)$, il est légitime de poser :

$$F(\varphi) = 2 \operatorname{tg} \varphi \quad (16)$$

Dans ces conditions, les équations (12) se résolvent sans difficulté et en posant :

$$V_\alpha = \sqrt{2gH} \quad (17)$$

H désignant la pression exprimée en mètres de colonne d'eau au niveau de l'ajutage, on obtient

aisément l'équation cartésienne de la trajectoire, qui a pour expression :

$$Z = \left(\frac{m}{4 AH \cos^2 \alpha} + \operatorname{tg} \alpha \right) x - \frac{m^2}{8 A^2 H \cos^2 \alpha} (e^{2Ax/m} - 1) \quad (18)$$

Il est intéressant de remarquer que lorsque x tend vers 0, l'équation (18) devient :

$$Z = \operatorname{tg} \alpha x - \frac{x^2}{4 H \cos^2 \alpha} \quad (19)$$

A l'origine, c'est-à-dire dans la zone proche de l'ajutage, la trajectoire se confond avec la parabole classique des tirs effectués dans le vide. Ce phénomène est valable quel que soit $\alpha \neq (\pi/2)$, comme le montrerait l'étude des équations (12) pour $\varphi \neq \alpha$.

Tout se passe mathématiquement, comme si, à l'origine, la résistance de l'air n'intervenait pas. Il faut remarquer aussi que, près de l'origine, la trajectoire est indépendante de la masse de la goutte. Dans les hypothèses, on avait supposé qu'à l'origine, la goutte était déjà formée, ce qui était contraire au phénomène observé puisque, dans la zone proche de l'origine, nous observons un jet continu. La conclusion mathématique apportée par l'expression (19) permet de rendre compte du phénomène observé et de justifier ainsi, *a posteriori*, l'usage de l'hypothèse simplificatrice de la formation des gouttes à l'origine.

Il est aisé de montrer que l'expression (18) provient de l'équation différentielle (5) dans laquelle on suppose que la valeur du cosinus de l'angle φ est égale à un. Ceci justifie encore l'intervalle d'application de la variable φ pour laquelle il est légitime de faire l'approximation précédemment énoncée.

Il est à remarquer que l'on peut étendre l'intervalle d'utilisation des formules approchées en posant :

$$F(\varphi) = 2 \operatorname{tg} \varphi + \frac{1}{3} \operatorname{tg}^3 \varphi \quad (20)$$

Les équations (12) s'intègrent alors facilement, mais l'équation cartésienne obtenue alors est d'un emploi beaucoup plus lourd.

La formule (18) est déjà une excellente approximation et rend compte des trajectoires réelles observées pour un intervalle $|\varphi| \leq (\pi/6)$. Le contrôle de cette formule a été effectué au laboratoire du C.R.E.G.R. situé au Tholonet près d'Aix-en-Provence en relevant systématiquement la trajectoire maximale d'un asperseur soumis à des pressions variant de 1 à 4 bars. Il a été dit plus haut que l'angle de tir à l'origine des asperseurs était voisin de $\pi/6$ radian. La formule (18) devrait, de ce fait, présenter un certain intérêt pratique en vue de l'établissement d'un abaque des caractéristiques balistico-granulométriques d'un asperseur.

5. Détermination du coefficient m/A . Conclusion de l'étude balistique.

Dans tous les développements mathématiques précédents, il apparaît l'inconnue m/A , rapport de la masse de la goutte à son coefficient de résistance. Le terme m/A est, remarquons-le, homogène à une longueur. En supposant que m/A est indépen-

dant de l'angle de tir α , il est possible de le déterminer à l'aide d'une expérience préliminaire qui consiste à mesurer la hauteur maximale atteinte par le jet pulvérisé lorsque l'angle de tir α est égal à $\pi/2$ radians. Dans ce cas particulier en effet, la trajectoire d'une goutte de masse m est rectiligne et l'équation différentielle du mouvement devient :

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = -mg - AV^2 \quad (21)$$

qui conduit après deux intégrations successives à l'expression (22).

$$Z = \frac{m}{2A} \log_e \left(1 + \frac{2AH}{m} \right) \quad (22)$$

Z désigne cette fois la hauteur maximale atteinte par le jet. La mesure de Z et la connaissance de H nous permettent de calculer la valeur du terme m/A en utilisant une méthode graphique très simple pour résoudre l'équation transcendante (22).

Des études expérimentales systématiques menées sur modèle réduit au laboratoire d'Hydraulique du C.R.E.G.R. ont permis de conclure que l'hypothèse de l'invariance du terme m/A en fonction de l'angle de tir α était recevable.

De même, et toujours sur modèle réduit, l'intégration numérique des trajectoires effectuées à partir de la relation (13) mentionnée ci-dessus, a montré la parfaite concordance des résultats expérimentaux avec la théorie proposée. Les expériences systématiques ont porté sur la variation de l'angle de tir α de 10 en 10° depuis $\alpha = 0^\circ$ jusqu'à $\alpha = 80^\circ$ pour une pression voisine de quatre mètres de colonne d'eau.

Le C.R.E.G.R. a d'ailleurs l'intention, dans un proche avenir, d'effectuer des expériences semblables, cette fois-ci sur des asperseurs réels et pour des pressions utilisées dans la pratique. Il est possible, mais non certain, que certaines conclusions obtenues sur modèle réduit doivent alors être modifiées en fonction des résultats expérimentaux.

Remarquons enfin que nous n'avons déterminé jusqu'à présent que la trajectoire maximale des asperseurs. Or, ceux-ci possèdent une infinité de trajectoires, puisqu'il y a une infinité de gouttes de diamètres différents. Les hypothèses énoncées précédemment permettent cependant d'étudier le faisceau des trajectoires lorsqu'on connaît le spectre granulométrique d'un asperseur. C'est à ce problème que nous allons maintenant consacrer quelques instants.

6. Bases théoriques de la granulométrie des asperseurs.

Considérons l'ensemble des gouttes de masse m donnée, émises par un asperseur. Ces gouttes, en arrivant au sol, vont subir une dispersion classique correctement représentée, statistiquement, par la fonction bien connue de Laplace-Gauss. Dans la pratique, cette dispersion ne présente qu'un faible intérêt et il vaut mieux poser le problème de façon différente.

Soit un élément dS de la surface mouillée S obtenue par la dispersion de la totalité du jet émis par l'asperseur. Observons l'arrivée successive des gouttes sur cet élément dS sans nous occuper des dimensions diverses que peuvent présenter les gout-

tes arrivant sur dS . En quelque sorte, nous nous intéressons à l'événement consistant en l'arrivée d'une goutte. En supposant que ces divers événements sont indépendants les uns des autres, on arrive à la conclusion que l'arrivée des gouttes sur un élément de surface est régie théoriquement par la loi de Poisson :

$$\mathcal{P} = \frac{(ct)^n}{n!} e^{-ct} \quad (23)$$

qui donne la probabilité d'assister à l'arrivée de n gouttes exactement pendant un temps t d'observation fixé à l'avance.

Cette théorie n'a pas fait jusqu'à présent l'objet d'expériences en vue de sa confirmation de la part du C.R.E.G.R. Ce serait cependant une voie d'approche intéressante qui permettrait de se faire une idée du spectre granulométrique émis par un asperseur.

7. Etude expérimentale de la granulométrie des asperseurs. Le coefficient de traînée des gouttes.

De nombreux chercheurs ont étudié la granulométrie des asperseurs. De nombreuses méthodes ont été utilisées et nous ne ferons ici que les rappeler brièvement :

- détermination de la granulométrie par absorption des gouttes par une couche de suie, de farine ou d'un liquide visqueux;
- détermination de la granulométrie par des méthodes photographiques;
- détermination de la granulométrie par des méthodes photométriques de la lumière absorbée par les trajectoires des gouttes;
- détermination de la granulométrie par prise d'un échantillon à l'aide d'un capteur.

Bien que les méthodes expérimentales soient très diverses, un certain nombre de résultats qualitatifs que nous avons pu observer aussi, concordent.

Toutes choses égales par ailleurs, les gouttes les plus grosses tombent le plus loin. Nous avons, au début de l'exposé, montré pourquoi, physiquement, ce résultat était logique.

La pulvérisation est, sur toute l'étendue du spectre, d'autant plus fine que la pression hydraulique au niveau de l'ajutage est plus forte. Nous avons expliqué précédemment le pourquoi de cette observation expérimentale.

Les résultats expérimentaux en notre possession ne sont pas, à l'heure actuelle, suffisamment nombreux pour que nous puissions donner la loi de variation du diamètre des gouttes en fonction de la distance. Les chercheurs Frost et Schwaler estiment que la granulométrie d'un asperseur peut être liée à l'abscisse du jet par une relation de la forme :

$$d = m^{x+n}$$

expression dans laquelle d désigne le diamètre des gouttes, x la distance à l'ajutage, m et n étant deux constantes déterminées expérimentalement.

Nous avons vu précédemment que les problèmes balistiques étaient liés à la connaissance du coefficient de traînée C_x des gouttes. De nombreuses études sur la question ont été faites par les physiciens de l'atmosphère. Les résultats trouvés sont assez divers et cette dispersion semble devoir être recher-

chée dans les conditions expérimentales particulières. Comme il se doit, le coefficient de traînée a été rapporté aux nombres de Reynolds et de Weber.

Pour ce qui est des études entreprises à ce sujet par le C.R.E.G.R., les conclusions partielles découlant d'expérimentations effectuées sur modèle réduit, prouvent qu'il est possible de donner au coefficient de traînée C_x une valeur voisine du coefficient de traînée obtenu avec des sphères et dans les intervalles correspondant au nombre de Reynolds.

En ce qui concerne les asperseurs réels, le seul essai entrepris confirme cette conclusion, mais il nous semble nécessaire d'effectuer à ce sujet une étude systématique complète. Quoi qu'il en soit, cette base logique paraît être un point de départ assez solidement établi désormais. Dans un proche avenir, nous avons l'intention, et ceci dans l'optique expérimentale de l'irrigation par aspersion, d'entreprendre la recherche de la fonction :

$$C_x = f(d, R, \mathcal{Q})$$

8. Conclusions de la théorie balistico-granulométrique proposée.

A partir des bases théoriques énoncées ci-dessus, il est possible de tracer un abaque donnant les performances balistiques en fonction de la seule variable du diamètre moyen des gouttes. Connaissant la portée expérimentale d'une famille de gouttes, il sera possible d'en calculer directement le diamètre moyen approximatif et en conséquence, il sera facile de déduire de la courbe pluviométrique d'un asperseur, les mauvaises répartitions de l'eau au sol. Il devrait être ainsi possible de remédier dans une certaine mesure aux insuffisances constatées par le jeu simultané des divers paramètres régissant le phénomène de l'aspersion.

DEUXIÈME PARTIE

Le problème de l'uniformité d'arrosage

Quel que soit le procédé technique utilisé, un asperseur doit assurer une répartition homogène de l'eau sur le sol. Il faut remarquer cependant que l'hypothèse d'une répartition régulière de l'eau peut conduire à des résultats médiocres si l'homogénéité structurale du sol est loin d'être réalisée. Le but final de l'irrigation par aspersion étant la répartition homogène dans le sol et non au sol, on voit immédiatement l'importance très grande que revêt l'étude pédologique des zones à irriguer.

En grande culture, les asperseurs sont utilisés de telle sorte que leurs zones d'influence hydrique se recoupent. Les asperseurs se trouvent donc disposés sur l'aire soumise à l'aspersion suivant un dispositif d'implantation déterminé. Les dispositifs généralement rencontrés sont carrés, rectangles ou triangulaires. Un asperseur possède une courbe pluviométrique d'allure caractéristique pour un diamètre de buse et une pression donnés. L'uniformité d'arrosage obtenue par le jeu simultané de plusieurs asperseurs supposés placés dans des conditions identiques de fonctionnement, dépendra du dispositif d'implantation.

Avant de pouvoir déterminer mathématiquement, par un indice, l'uniformité d'arrosage, il est nécessaire de connaître la courbe pluviométrique de l'asperseur. Celle-ci s'obtient en faisant tourner (1 h généralement) dans des conditions atmosphériques très calmes et très bien définies, un asperseur dont les caractéristiques hydrauliques à l'amont de la buse sont maintenues constantes. L'eau issue de l'asperseur tombe sur un réseau de pluviomètres disposés suivant des mailles carrées de 1 m de côté, l'asperseur occupant le centre du réseau. Toutes les précautions sont prises au niveau des pluviomètres pour éviter en particulier les pertes par évaporation, principal facteur pouvant fausser les relevés, puisque le laboratoire du C.R.E.G.R. spécialement équipé pour effectuer ces mesures, se trouve au Tholonet près d'Aix-en-Provence. L'eau recueillie dans chaque pluviomètre est mesurée à l'aide d'une éprouvette donnant la précision du 1/10^e de mm de hauteur d'eau. On trace alors les courbes isohyètes ou courbes d'égale pluviométrie. Les isohyètes peuvent présenter des irrégularités dont il est difficile à l'heure actuelle de déterminer les causes. Il est possible qu'elles soient dues à des phénomènes aléatoires occasionnés par la non-permanence des conditions atmosphériques locales pendant la durée des essais, puisque ceux-ci s'effectuent en plein air. Quoi qu'il en soit, l'expérience, confirmée par plus de deux cents essais effectués jusqu'à présent, montre qu'en pratique la courbe pluviométrique moyenne déduite des relevés obtenus sur huit méridiennes est statistiquement significative.

La courbe pluviométrique étant définie, il se pose alors le choix difficile du critère statistique qui va rendre compte de l'uniformité d'arrosage.

De nombreuses formules ont été proposées et à l'heure actuelle l'indice d'uniformité qui semble être le plus employé est le coefficient de Christiansen.

Ce coefficient s'exprime par la relation :

$$Cu = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |h_i - h_m|}{nh_m} \right)$$

dans laquelle h_m désigne la hauteur d'eau moyenne horaire tombée sur le dispositif de surface égale à n mètres carrés.

h_i désigne la hauteur d'eau horaire tombée sur le $i^{\text{ème}}$ mètre carré.

L'uniformité d'arrosage résulte donc d'un calcul et non d'une expérience en plein champ. Le coefficient de Christiansen est un nombre sans dimension, comme le montre la formule ci-dessus. Il a été constaté que la valeur minimale rencontrée pour ce coefficient d'uniformité était d'environ 50. Un asperseur moyen atteint 75. Un utilisateur non averti est en droit de penser qu'en se procurant un asperseur dont l'indice d'uniformité, pour un dispositif donné, est de 75, il peut prétendre à une excellente uniformité d'arrosage, ce qui ne sera pas le cas. Le coefficient d'uniformité de Christiansen se révélant peu parlant au non-technicien, le C.R.E.G.R. a proposé un nouveau coefficient qui a l'avantage d'étendre la gamme de cotation et de permettre un choix plus judicieux.

Ce coefficient se formule comme suit :

$$Cu = 100 \frac{h_0}{h_m} \cdot \frac{s}{S}$$

- h_m désigne, comme dans la relation de Christiansen, la hauteur pluviométrique moyenne tombée sur la surface;
- h_0 désigne la hauteur pluviométrique minimale relevée dans l'aire arrosée;
- S désigne la surface totale de l'aire arrosée;
- s désigne la fraction de la surface S qui reçoit au moins 80 % et au plus 120 % de la hauteur pluviométrique moyenne. La surface s désigne donc la surface correctement arrosée.

Comme le coefficient de Christiansen, le coefficient C.R.E.G.R. est un nombre pur. L'extension de la gamme de cotation qu'il procure, provient du fait que l'on pénalise le manque d'eau sur un élément de surface par le rapport h_0/h_m .

Les excellents asperseurs donnent des indices comparables lorsque l'on utilise successivement les deux coefficients. Les asperseurs moyens ou médiocres sont mieux caractérisés par le coefficient C.R.E.G.R. De toute façon, le choix, *a priori*, d'un critère d'uniformité est toujours sujet à caution. Il s'agit en définitive de décrire le mieux possible une population statistique et seule la pratique peut confirmer la valeur relative du critère statistique utilisé.

1. Perturbation du coefficient d'uniformité : l'influence du vent.

Le vent est le principal facteur de perturbation lorsqu'il souffle pendant une durée relativement longue dans une direction constante. L'uniformité de la rotation de l'asperseur se trouve modifiée, ainsi que la répartition de l'eau au sol. La notion de sensibilité d'un asperseur au vent, peut se déduire des paramètres se rapportant au phénomène physique de l'aspersion. La dynamique des gouttes est très influencée par la force qu'oppose la résistance de l'air. Plus les gouttes sont de faible diamètre, et plus la résistance de l'air est forte relativement. Si, maintenant, s'ajoute l'action directionnelle du vent, les deux causes se conjuguent, la résultante de leurs effets étant d'autant plus sensible que l'asperseur possèdera un spectre de gouttes important dans les faibles diamètres. Nous avons vu que, toutes choses égales par ailleurs, la pression augmentant, le diamètre des gouttes tend à diminuer. De même, plus la buse aura un fort diamètre et la plus la granulométrie sera forte.

Le C.R.E.G.R. a étudié l'influence du vent sur l'allure des courbes pluviométriques et il a été constaté que pour des vitesses de vent ne dépassant pas 1,5 m/s, l'allure générale des courbes pluviométriques est conservée. Pour des vitesses supérieures à 1,5 m/s, on constate que les courbes pluviométriques orientées sous le vent présentent un ensellement, à faible pluviométrie, suivie d'une bosse, à pluviométrie élevée. Cette observation peut s'expliquer en remarquant que le spectre des gouttes voit son diamètre croître au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'ajutage. Les gouttes possédant la plus grande portée ont aussi statistiquement le diamètre le plus élevé et sont, de ce fait,

relativement moins perturbées par le vent, ce qui a tendance à créer la zone de concentration hydrique précédemment mentionnée.

Un raisonnement identique peut rendre compte de l'ensellement des courbes pluviométriques, qui traduit la présence d'une zone de faible concentration hydrique, car les gouttes qui y tombent présentent statistiquement un diamètre plus faible et sont donc plus influencées par le vent.

On conçoit que le coefficient d'uniformité soit extraordinairement perturbé. Le problème pratique consiste donc à assurer la plus grande stabilité possible aux gouttes. Il faudrait tendre à augmenter le spectre des diamètres des gouttes. Nous allons voir que si des perfectionnements techniques sont apportés dans ce sens, on risque de voir apparaître d'autres inconvénients.

2. Phénomène de la battance. Effet mortifiant sur les cultures arrosées.

Les connaissances apportées par la balistique et la granulométrie permettent de calculer l'énergie cinétique des gouttes arrivant au sol ou sur les végétaux. Cette énergie cinétique peut être considérable, car la vitesse d'arrivée des gouttes peut se situer dans une gamme de vitesses comprise entre 7 et 12 m/s. Pour éviter l'effet de battance et l'effet mortifiant, on cherchera à réduire l'énergie cinétique des gouttes. On sera amené à réduire le spectre granulométrique, cette réduction influençant aussi considérablement la vitesse des gouttes. Si la réduction du spectre granulométrique est trop poussée, on retrouvera les perturbations créées par le vent. Il y a donc un optimum à rechercher pour pallier, autant que possible, les divers inconvénients décrits.

Conclusion

Un travail considérable reste à faire en ce qui concerne les asperseurs. Jusqu'à présent les performances techniques avaient été seulement observées et la présente note technique n'a pour but que de tenter de permettre une approche plus scientifique du phénomène de l'aspersion.

Ces quelques pages montrent assez la complexité des phénomènes mis en cause et leur relative difficulté à se soumettre à des expériences systématiques.

Je pense que, dans un proche avenir, il faudra faire figurer, à côté du coefficient d'uniformité, le spectre granulométrique d'un asperseur, qui est resté jusqu'à présent une caractéristique fondamentale à peu près totalement ignorée des constructeurs. L'intérêt pratique de la connaissance du spectre granulométrique sera sans conteste la possibilité de définir plus précisément les performances techniques d'un asperseur. Au fur et à mesure que les expériences se multiplieront, les lois générales dont il a été question se préciseront et il n'est pas impossible de penser que la correction des courbes granulométriques soit obtenue en repensant le problème au niveau de l'asperseur lui-même en recherchant des appareils de conception moins simple.

Cette note ne prétend pas apporter les bases théoriques qui résoudront la totalité des problèmes posés par l'asperseur, elle veut tout au plus donner un fil conducteur assez sûr, pour passer du stade empirique au stade raisonné des perfectionnements à apporter sur des appareils dont l'importance est capitale pour assurer à un réseau d'irrigation toute son efficacité.

Discussion

Président : M. ROCHE

M. le Président remercie M. PERNÈS de sa communication sur un appareil d'utilisation courante qui pose de nombreux problèmes et commence seulement à être connu.

M. LABYE demande si l'I.N.R.A. a fait des études sur le chiffre de $\pm 20\%$ qui doit résulter de recherches agronomiques de rendement en fonction du coefficient d'uniformité.

Il s'agit de l'uniformité de l'eau qui arrive sur le sol mais après avoir diffusé dans le sol.

Quelle est l'influence de ce coefficient sur le rendement ?

M. PERNÈS dit que le choix de la valeur $\pm 20\%$ de la hauteur pluviométrique moyenne résulte de l'expérience acquise sur la détermination du coefficient d'uniformité. Aucune considération agronomique n'est intervenue pour justifier cette valeur. On peut admettre, cependant, qu'un sol peut présenter des caractéristiques variant localement dans des proportions supérieures à 25 %.

M. GUYON indique que ce sujet est au programme du Centre de Recherches et d'Expérimentation du Génie rural. Mais des expériences ont été faites, il y a une dizaine d'années, par la Société des Potasses d'Alsace, pour étudier la diffusion des engrais dans le sol, lorsqu'on pratique l'arrosage par aspersion. L'expérience a été réalisée à la ferme de La Valette, qui dépend de l'EN.S.A. de Montpellier. Par manque d'uniformité d'arrosage, certains endroits recevaient une pluviométrie de 3 mm et d'autres, de 8 mm. Les écarts

de pluviométrie observés ont considérablement perturbé l'expérience.

M. BONNAL demande si le coefficient d'uniformité est peu variable pour plusieurs asperseurs du même type ou bien si la recherche d'une certaine constance du coefficient d'uniformité nécessite un fini de fabrication qui n'est pas courant actuellement.

M. PERNÈS indique que l'on détermine la courbe pluviométrique d'un asperseur avant et après épreuve d'usure. On n'a pas constaté de grande différence entre ces courbes pluviométriques. Ce qui veut dire que le coefficient d'uniformité pourra sans doute avoir varié, mais pas dans d'énormes proportions.

Il doit y avoir une certaine dispersion dans le fini de l'appareil, mais les caractéristiques d'une courbe pluviométrique d'un asperseur sont essentiellement liées aux caractéristiques de sa buse; or la buse est toujours l'organe qui a été le plus travaillé par le constructeur.

En général, on ne doit pas obtenir, pour des asperseurs de même fabrication ayant les mêmes caractéristiques, des coefficients d'uniformité différents. L'expérience devrait être tentée.

M. BONNAL avait signalé ce point, car il croit avoir vu des comptes rendus d'essais où l'on avait procédé à de telles expériences et l'on avait obtenu des coefficients d'uni-

P. PERNÈS

formité très variables pour deux appareils de même marque et de même type.

M. GUYON a entrepris plus de deux cents essais, depuis la création en 1961 du banc du Tholonet, sur des appareils de différentes marques. Malgré le fait que les « plages » d'isohyètes ne soient pas situées aux mêmes endroits du diagramme, et qu'il y ait des « îlots » qui ne se répètent pas, pour des appareils d'un même type, fonctionnant dans les mêmes conditions (même buse, même pression), la courbe pluviométrique moyenne, dont on se sert pour calculer l'uniformité d'arrosage, n'est pas tellement modifiée. Cela revient à dire qu'on retrouverait sensiblement le même coefficient d'uniformité, pour une implantation donnée (12 × 18 par exemple), avec des appareils de même marque, du même type, avec la même buse et fonctionnant sous la même pression... Pour les écarts concernant les isohyètes, il s'agissait le plus souvent d'écarts accidentels plutôt que systématiques. Mais, pour mieux analyser statistiquement ce problème, il serait nécessaire de réaliser un grand nombre de répétitions sur des séries d'appareils de même fabrication, les arroseurs d'une même série étant testés dans des conditions identiques, rigoureusement à la même pression, et à l'abri de tout mouvement d'air.

M. LEMOYNE DE FORGES demande si les coefficients d'uniformité sont bien des maximums maximorum, c'est-à-dire ceux relatifs à la pression et aux espacements les plus favorables, dans les gammes usuelles.

M. PERNÈS précise que le coefficient d'uniformité peut varier en fonction du dispositif d'implantation choisi. En testant plusieurs dispositifs (12 × 12, 24 × 24 ou rectangles) le coefficient d'uniformité peut passer par un optimum.

M. BONNAL pense qu'en dehors de l'effet de battance et de mortification, il y a lieu de considérer l'effet de rebondissement qui risque de maculer des fruits délicats (fraises sur terrains sableux).

M. PERNÈS est de cet avis et c'est la raison pour laquelle il y a un problème de granulométrie à déterminer dans le cas particulier.

M. LIÈVRE aimerait savoir, au sujet de risques de battance et d'effet mortifiant dus à une vitesse limite élevée des gouttes au fur et à mesure, s'il y a une relation entre ces risques et la pression, d'une part, et le diamètre de la buse, d'autre part.

M. PERNÈS croit, quant à lui, que toutes choses égales par ailleurs, le diamètre moyen des gouttes croît avec le diamètre de la buse. Pour une buse de diamètre constant, la granulométrie deviendra de plus en plus fine quand on élèvera la pression.

En ce qui concerne la liaison vitesse de la goutte et gros-seur, on peut écrire :

$$V_a = \sqrt{mg/A}$$

où m est la masse de la goutte;

g l'accélération de la pesanteur.

et : $A = 1/2 C_x \rho' S$

où S désigne le maître couple de la goutte;

ρ' la masse volumique de l'air;

C_x le coefficient de traînée $\approx 0,40$ ou $0,44$.

Plus la goutte sera grosse, plus sa vitesse limite sera grande.

M. BONNIN s'étonne que l'on rencontre des gouttes de 5 à 6 mm de diamètre à des vitesses de 12 m/s ayant des coefficients de traînée inférieurs à 0,50. Normalement, de telles gouttes doivent se fractionner dans leur mouvement (ce qui explique la limitation des diamètres et vitesses naturelles des gouttes de pluie). Avant de se diviser, elles se déforment et leur coefficient de traînée augmente beaucoup.

On peut accorder ceci avec le modèle balistique en admettant que les grosses gouttes se sont séparées tardivement du jet (où elles ne subissaient pas de résistance); le coefficient de traînée déduit des expériences (et inférieur à 0,50) serait alors un coefficient de traînée moyen sur l'ensemble de leur trajectoire.

M. PERNÈS indique que :

— Jenkins cite les chiffres suivants :

goutte de diamètre	0,69 mm	$C_x = 0,973$
	3,38 mm	$C_x = 0,539$
	7,25 mm	$C_x = 0,942$

extraits de son mémoire : « The acceleration of water drops by an air stream of constant relative velocity ».

— Laws cite les chiffres suivants :

goutte de diamètre	2,5 mm	$C_x = 0,495$
	6 mm	$C_x = 0,753$

Ces chiffres en ce qui concerne les expériences de Jenkins ont été obtenus en faisant tomber des gouttes calibrées dans des tuyaux cylindriques dans lesquels l'air se trouvait à une certaine vitesse. Les conditions expérimentales peuvent être critiquées. Les résultats expérimentaux que M. PERNÈS a obtenus en ce qui concerne la valeur du coefficient de traînée s'apparentent davantage au coefficient de traînée moyen sur l'ensemble de la trajectoire comme le fait remarquer très justement M. BONNIN.

M. RÉMÉNIÉRAS remarque que la théorie classique de Reynolds qui explique, en air calme, la division d'un jet de liquide en gouttelettes du fait de l'instabilité de l'écoulement ne semble pas s'appliquer aux gros jets des asperseurs; cette instabilité provoque sur la longueur des jets de faible diamètre des strictions équidistantes qui, pour une valeur suffisante du nombre de Reynolds, sectionnent le jet en multiples petits tronçons que les phénomènes de tension superficielle transforment en gouttelettes plus ou moins sphériques. Le diamètre d'équilibre de la gouttelette dépend de sa vitesse relative par rapport à l'atmosphère ambiante.

M. RÉMÉNIÉRAS se demande si l'on ne pourrait pas accélérer la dispersion d'un gros jet en gouttelettes de granulométrie déterminée par divers artifices déjà utilisés dans d'autres techniques; il pense à l'emploi de jets creux cylindriques, ou mieux, coniques, tels que ceux utilisés dans certains brûleurs à mazout. Les jets à section circulaire pleine sont évidemment plus stables que ceux ayant une section droite rectangulaire ou cruciforme; les jets en forme de nappe hyperbolique de faible épaisseur donnés par des brûleurs à mazout et les pulvérisateurs pour traitement insecticides se transforment rapidement en très fines gouttelettes, grâce à l'action de la résistance de l'air et de la tension superficielle du liquide formant une nappe animée d'une grande vitesse dont l'épaisseur diminue à mesure que l'on s'éloigne de l'orifice.

M. PERNÈS signale que le professeur Comolet a étudié le problème de la fragmentation des gouttes et de la formation des gouttes satellites.

Le phénomène de l'aspersion fait intervenir un mécanisme différent du mécanisme de Reynolds. Il y a « usure » progressive du jet au contact de l'air ambiant. Lorsque le niveau énergétique du jet, puis des filets liquides, a été suffisamment réduit, les gouttes se forment.

M. PERNÈS a constaté qu'avec des asperseurs fonctionnant de façon réelle, l'éclatement se produisait ainsi : il y avait une veine parfaitement pleine, puis une série de filets liquides et enfin éclatement de filets en gouttes. Parfois même il y avait des mouvements satellites de retour, ce qui prouverait bien qu'il y avait une usure progressive de la veine liquide. M. PERNÈS a supposé les gouttes formées dès l'origine pour permettre une formulation mathématique plus simple.

M. RÉMÉNIÉRAS indique que l'on observe un phénomène analogue à la surface des écoulements à grande vitesse des évacuateurs de crues en saut de ski des grands barrages.

M. CARLIER fait remarquer que l'étude de M. PERNÈS se limite à un jet fixe, sans prendre en compte la dispersion provoquée par la palette oscillante qui équipe la plupart des asperseurs basse pression et dont l'action modifie très sensiblement le phénomène et introduit une complication supplémentaire dans l'étude du problème.

En ce qui concerne la courbe donnant le diamètre des gouttes en fonction de leur portée, M. PERNÈS a constaté qu'on obtient une courbe régulière traduisant un phénomène physique plus qu'un phénomène statistique.

M. BONNIN aimerait connaître, pour un asperseur en tir vertical, le rapport entre la hauteur effectivement atteinte et la hauteur théorique (calculée en négligeant les frottements); il serait intéressant de comparer ce rapport à celui calculé pour le jet d'eau de Genève, dont le diamètre initial est de l'ordre de 115 mm et la hauteur voisine de 130 m.

M. PERNÈS dit qu'il serait facile de faire le calcul.

Sur une question de M. LEMOYNE DE FORGES, M. PERNÈS précise que la courbe de pluviométrie qu'il a présentée a été établie en fonction de l'asperseur réel en rotation. L'exposé théorique a été fait uniquement pour l'asperseur fixe. Ce cas n'est pas du tout réalisé dans la pratique. C'est simplement une approche théorique du problème que M. PERNÈS a voulu présenter.

M. le Président remercie M. PERNÈS et toutes les personnes ayant pris part à la discussion.