



HAL
open science

Choix du busage et conduite de l'irrigation par pivots - Prise en compte de la capacité d'infiltration du sol

Bruno Molle, D. Baudequin, S. Haidar

► To cite this version:

Bruno Molle, D. Baudequin, S. Haidar. Choix du busage et conduite de l'irrigation par pivots - Prise en compte de la capacité d'infiltration du sol. Ingénieries eau-agriculture-territoires, 1998, 13, p. 57 - p. 69. hal-00461143

HAL Id: hal-00461143

<https://hal.science/hal-00461143>

Submitted on 3 Mar 2010

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.

Choix du busage et conduite de l'irrigation par pivots - Prise en compte de la capacité d'infiltration du sol

Bruno Molle, Denis Baudequin et Sam Haidar

Cet article a également été publié dans la revue *Irrigazette* n° 43, novembre/décembre 1997.

Le sol d'une parcelle n'est pas un simple substrat, il a la particularité de conserver à l'échelle d'une ou de plusieurs saisons la mémoire des contraintes qu'il a pu subir. Qu'il s'agisse de dégradation de la structure de surface, de transports par ruissellement, de compactations par des arrosages excessifs ou des passages d'engins, toute dégradation se traduit à terme par une baisse de fertilité.

L'investissement dans une installation d'irrigation par pivot (photo 1) ou rampe frontale est généralement programmé pour une durée minimum de 20 ans ; il est donc impératif de soigner la conception de l'ensemble au risque de grever pour longtemps les potentialités d'une parcelle, et par extension d'une exploitation.

Sur les 1,7 million d'hectares irrigués en France, 92 % au moins le sont par aspersion, c'est-à-dire par des méthodes d'irrigation sous pression. Il existe trois grands types de matériel d'irrigation par aspersion : le canon à enrouleur (70 % des surfaces), la couverture intégrale (10 %), le pivot ou la rampe frontale (20 %).

Depuis 40 ans aux USA et 10 ans en France, l'irrigation par pivot connaît un fort développement, (encadré 1) du fait de ses capacités : uniformité élevée de l'arrosage, faible pression de fonctionnement, possibilités d'automatisation.

Ces appareils restent néanmoins cantonnés sur un certain type de parcelles :

– de grande surface (minimum 20 ha), le coût de l'installation ramené à l'hectare est dégressif en fonction de la longueur ;



B. Molle, Cemagref

▲ Photo 1. – Vue d'un pivot d'irrigation. Au premier plan l'élément central ou point de pivot de l'appareil.

- peu accidentées (pente maximum 15-20 %) ;
- avec des sols à bonnes capacités d'infiltration, sous peine de gros problèmes de ruissellement ;
- l'arrosage des angles peut-être réalisé au moyen d'un « corner système », ou d'une couverture intégrale.

L'évolution permanente des dispositifs de pilotage et de commande à distance en font un outil utilisable dans la perspective du développement de la « Agriculture irriguée de précision ».

Bruno Molle,
Denis Baudequin
Cemagref
Le Tholonet
BP 31
13612 Aix-en-Provence Cedex 1
Sam Haidar
Irrigation
Spécialist, M.S.
University of
California, Davis

Encadré 1

Évolution du marché des pivots et rampes frontales

En matière d'irrigation à grande échelle, les systèmes du type pivot et rampes frontales sont reconnus comme étant les équipements les plus économiques. Grâce à l'uniformité d'arrosage qu'ils dispensent, et à leur faible besoin en main-d'œuvre, ils affichent le meilleur rapport qualité/prix, à condition bien sûr de disposer d'un parcellaire et d'une ressource en eau adéquats.

Pour fixer les idées, un pivot se vend entre 4 000 et 6 000 FF l'hectare. Plus il sera grand, plus son coût à l'hectare sera faible. Une rampe frontale reviendra, elle, à environ 7 000 à 8 000 FF à l'hectare, ce coût pouvant varier fortement en fonction de la configuration demandée : automatisation, utilisation de systèmes particuliers (doubles busages, mini-rampes...).

Le coût d'utilisation est de l'ordre de 30 % inférieur à celui des autres systèmes d'arrosage par aspersion, en particulier du fait d'une pression requise plus faible et de la quasi absence d'intervention humaine en cours de saison d'arrosage.

Depuis l'année charnière de la PAC en 1992, on voit donc se développer les ventes de ce matériel. Il y a peu d'achats impulsifs liés aux conditions climatiques ; c'est pourquoi, mises à part les années 1993 à 1995 où il y a eu un rattrapage d'investissement avec des progressions jusqu'à 50 %, on observe un augmentation régulière des ventes de l'ordre de 12 à 15 % par an.

Les ventes de rampes frontales ont, quant à elles, été multipliées par trois depuis 1993 ; elles représentent 20 % des ventes totales. Ce matériel concerne surtout les cultures spécialisées, ou est utilisé dans le cas où l'assolement impose de déplacer annuellement la machine d'une parcelle à une autre.

Hormis l'impact éventuel de la renégociation de la PAC sur ce type d'investissement, on peut prédire un développement au rythme des remboursements, de la réfection des réseaux existants, de la disponibilité de nouvelles ressources en eau, des contrats avec l'industrie agro-alimentaire et du remplacement d'anciens matériels.

Michel HISTEL
Directeur de la société Otech
janvier 98

1. Buse : orifice calibré au travers duquel est émis un jet sous l'effet de la pression.

Pratiquement pour que ces appareils tiennent toutes leurs promesses, il est essentiel que l'utilisateur connaisse leur fonctionnement et tienne compte de leurs contraintes spécifiques.

Un principe de fonctionnement original nécessitant un busage adapté

La principale spécificité des pivots, à prendre en compte dès la conception de l'installation, est le fait qu'ils arrosent une parcelle circulaire. Le fonc-

tionnement en rotation implique que la travée la plus éloignée du centre devra, dans le même temps que la première, parcourir une distance et arroser une surface bien plus grande. Ce déplacement plus rapide se traduira par la nécessité d'appliquer le volume d'eau requis en un temps très bref, autrement dit avec une intensité plus grande (se reporter aussi à la synthèse bibliographique présentée dans l'encadré 3).

Le plus souvent on ne parle que de pivot, or il existe d'autres appareils fonctionnant de manière analogue :

- la rampe frontale, qui avance en translation, et arrose une parcelle rectangulaire ;
- le pivot déplaçable ou pivot multi-centres, fonctionnant comme un pivot lorsqu'il arrose, et que l'on peut déplacer d'un point à un autre (attention aux problèmes d'intensité d'arrosage induits par les déplacements à sec, encadré 2 page 63) ;
- le pivot-rampe, capable d'arroser en tournant comme le pivot ou en translation comme une rampe frontale ;
- le pivot-corner, qui permet d'améliorer la couverture des parcelles irrégulières ou des angles.

Pour résoudre les problèmes d'intensité de l'arrosage, les constructeurs d'arroseurs ont développé une large gamme de tailles de buses¹ qui permettent de délivrer des débits croissants en fonction de la distance au centre du pivot. Pour obtenir une bonne uniformité de répartition, les constructeurs et le Cemagref ont mis au point des programmes de calcul capables de choisir, pour chaque sortie, la buse la mieux adaptée à la pression disponible.

Lors de la conception le fournisseur du pivot pourra ainsi garantir une bonne uniformité de répartition du débit. Mais attention, de ne pas confondre uniformité de répartition du débit aux arroseurs et uniformité de l'arrosage : il peut en effet y avoir une grande différence entre l'uniformité potentielle (calculée) et l'uniformité réelle (mesurée sur le terrain).

Les asperseurs de pivot

Il existe de nombreuses possibilités pour choisir les asperseurs en fonction des conditions et des contraintes d'utilisation : types de buses, pression de fonctionnement, écartement des buses.

■ **La pression**

On distingue trois types d'asperseurs en fonction de leur pression de fonctionnement :

– asperseurs basse pression : sprays ou buses, caractérisés par une faible portée (< 4 m), et la petite taille des gouttes. Ils sont utilisables au bout de cannes de descente à des pressions inférieures à 200 kPa² ;

– asperseurs moyenne pression : sprinklers³ ou sprays à rotor, ils ont une portée moyenne (<15 m) et produisent des gouttes de plus gros diamètre. Leur angle de tir est généralement inférieur à 10 °, leur gamme de pression de fonctionnement comprise entre 100 et 350 kPa ;

– asperseurs haute pression : sprinklers ayant une portée est élevée (>15 m), ils fonctionnent à plus de 300 kPa de pression.

Pour un couple [asperseur, buse] donné, plus la pression de fonctionnement est élevée, plus la portée est élevée et plus le diamètre moyen des gouttes diminue, et inversement.

Pour un couple [asperseur, pression] donné, plus le diamètre de la buse est élevé, plus la portée est élevée et plus le diamètre moyen des gouttes augmente, et inversement.

Remarque : tout asperseur ou buse est conçu pour fonctionner à l'intérieur d'une plage de pression donnée. Hors de cette plage de fonctionnement l'asperseur change de caractéristiques.

■ **L'écartement entre asperseurs**

Il est choisi en premier lieu en fonction de la portée des asperseurs, et de la forme de leur courbe de distribution (Bittenger *et al.*, 1962). Pour atteindre une bonne uniformité, la valeur *optimum* d'écartement est définie par :

– le rapport [écartement, portée] déterminant le nombre d'asperseurs arrosant un point ;

– la forme de la courbe d'arrosage qui détermine l'écartement *optimum*.

Quelques problèmes particuliers demeurent

– Près de l'axe du pivot, les débits requis sont très faibles ; les diamètres n'étant pas assez petits pour limiter le surdosage on est tenté d'augmenter les écartements.

Ces asperseurs ont une sensibilité au vent très marquée (petites buses, fortes pressions). Pour li-

miter le risque de voir sous la première travée des zones entières mal arrosées, on choisit généralement d'y maintenir un écartement faible, donc d'apporter un excès d'eau. Toutefois, les surfaces concernées restent extrêmement faibles.

– Pour les sols à faible perméabilité, il faudra utiliser des asperseurs de portée élevée pour réduire l'intensité pluviométrique moyenne, comme nous le verrons dans la suite de l'article. Des petites rampes suspendues à des cannes de descente, perpendiculairement à la canalisation sont proposées par les constructeurs pour augmenter la surface couverte à partir d'une sortie et donc diminuer l'intensité pour des asperseurs à faible portée.

■ **L'évaporation et la sensibilité au vent**

Les phénomènes d'évaporation lors d'un arrosage par aspersion en conditions de fortes chaleurs sont souvent cités comme générateurs de pertes. Un grand nombre de travaux résumés par Huber (1991) permettent de conclure que dans les conditions les plus rigoureuses rencontrées en France, celles-ci ne peuvent pas excéder 5 %. Dans de telles conditions, Kohl *et al.* (1987) parlent de pertes maximum de 1,4 % par évaporation.

En fait, le facteur le plus important à prendre en compte dans l'évaluation des pertes est le transport par le vent hors de la zone d'arrosage ou dérive. La dérive peut entraîner des pertes pouvant atteindre 40 %, sachant que l'effet aggravant du vent est surtout sensible à partir d'une vitesse de 4,5 m/s (Huber, 1991) du fait d'une probable modification de la granulométrie des gouttes (De Boer et Kohl, 1993).

La sensibilité au vent d'un asperseur est fonction des paramètres suivants :

– taille des gouttes : le transport est d'autant plus facile que les gouttes sont de taille réduite ;

– hauteur de l'asperseur et hauteur maximum atteinte par le jet (ou apogée) : la vitesse du vent croît avec l'altitude.

Pour réduire la sensibilité au vent, on peut réduire la pression ou utiliser des buses de plus gros diamètres. Ensuite, l'absence d'un éclatement trop intense du jet au sortir de la buse contribuera à limiter les risques de dérive.

2. 100 KPa = 1 bar

3. Sprinklers : asperseurs rotatifs à batteur.

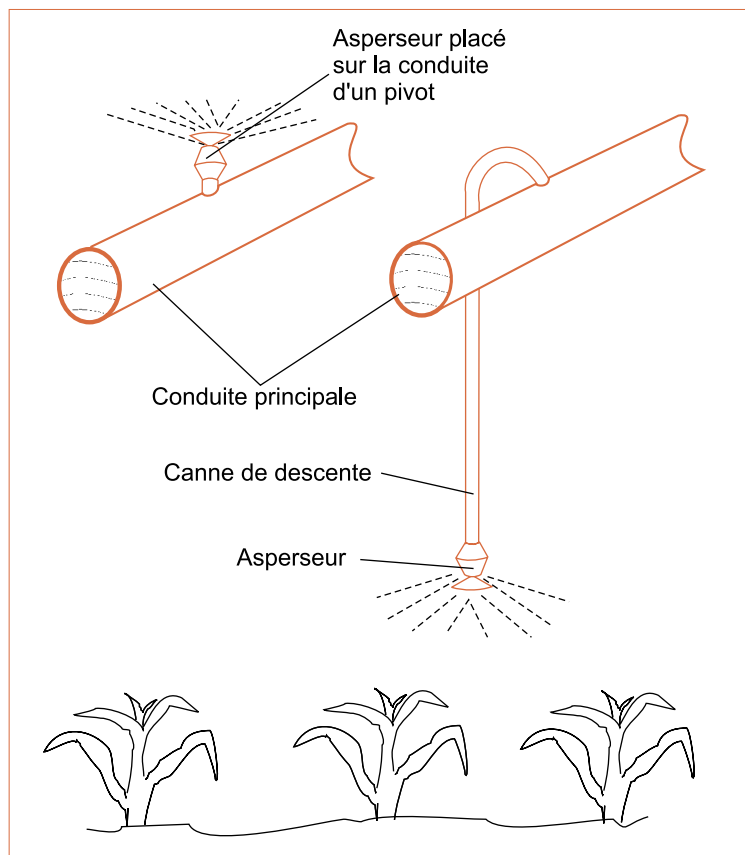
4. Chimigation : utilisation de l'installation d'arrosage pour conduire un traitement phytosanitaire.

Pour réduire la hauteur du jet, il suffit d'utiliser des asperseurs angle bas dont l'apogée est basse, ou des cannes de descente (figure 1) permettant d'amener l'asperseur au niveau de la végétation, dans les couches d'air les moins perturbées par le vent.

■ La fragilité du sol

On cherche à faire pénétrer l'eau dans le sol le plus rapidement possible pour limiter stagnation et ruissellement. Pour cela l'état de surface du sol est déterminant, il doit conserver une rugosité suffisante et une structure aussi construite que possible. Lors de l'arrosage, l'énergie apportée par les gouttes va tendre à provoquer l'éclatement des agrégats de surface, au moment de l'impact avec le sol. La stratification des particules mises en suspension peut aboutir à la formation d'une croûte de battance. Il s'ensuit des excès d'eau localisés pouvant entraîner la formation du ruissellement vers les points bas de la parcelle.

Figure 1. – Deux exemples de montage d'asperseurs. Le montage avec canne de descente permet d'approcher l'asperseur de la végétation. ▼



L'énergie des gouttes dépend de la pression à la buse. La taille des gouttes dépend de la taille de la buse. Ces deux paramètres déterminent le risque de dégradation des agrégats formant la structure des couches superficielles sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes.

Remarque :

- en conséquence sur un sol fragile (limoneux par exemple) on privilégiera les faibles énergies soit : faibles intensités, portées élevées, faibles diamètres de gouttes ;
- la présence d'une éventuelle couche « écran » (effet de *mulch*) constituée de débris végétaux par exemple, permettra de protéger la structure de surface du sol.

■ Les situations particulières

Certaines techniques, comme la chimigation⁴, conduisent à choisir des asperseurs tels que le maximum de surface foliaire soit couvert dans le minimum de temps. On évitera donc les asperseurs à jet unidirectionnel et à rotation trop lente, au profit d'asperseurs à plusieurs jets (plusieurs buses ou rotor générant 4 voire 6 jets).

Les matériaux constitutifs des asperseurs doivent être choisis en fonction des conditions de milieu : en situation d'eaux corrosives, on évitera les asperseurs métalliques, dans les cas d'eaux chargées pouvant provoquer de l'abrasion, on évitera les asperseurs en matière plastique.

Enfin, certaines cultures légumières ne supportent pas un arrosage trop violent, de même que les semis de cultures à petites graines qui peuvent être déterrées par l'impact des gouttes.

Le choix de l'écartement entre les asperseurs voisins : le recouvrement

Lors de la conception du plan de busage d'un pivot, on doit préciser l'écartement maximum entre asperseurs voisins nécessaire à l'obtention d'un bon recouvrement. Bittinger *et al.* (1962) ont analysé ces valeurs pour différents profils de courbe d'aspersion : ils arrivent à un écartement *optimum* équivalent à la portée pour un asperseur à distribution triangulaire et à 1,4 fois la portée pour un asperseur à distribution elliptique (voir bibliographie).

Néanmoins pour les dernières travées, on rencontrera souvent des espacements de 6 m, 3 m et même 1,5 m, selon le type d'arroseur et la gamme de diamètres de buses disponible. Les recouvrements entre asperseurs voisins seront donc multiples, ce qui contribue à améliorer l'uniformité d'arrosage. La combinaison des courbes pluviométriques des arroseurs installés sur plusieurs sorties voisines donne une répartition d'eau résultante raisonnablement uniforme sur un rayon arrosé par le pivot. Cette courbe résultante aura une forme caractéristique équivalente à un plateau presque horizontal (figure 2).

Remarques

Le vent est un facteur de perturbation important. Au niveau d'un asperseur individuel, la répartition spatiale de l'eau peut être fortement déformée : on observe en général une forte augmentation du maximum de pluviométrie, et une diminution de la surface mouillée.

Cela implique que l'on augmente fortement, bien que localement, l'intensité de l'arrosage et que les recouvrements entre asperseurs voisins peuvent être tels que l'uniformité s'en trouve dégradée.

Néanmoins, l'effet sur l'uniformité de l'irrigation est plus faible que pour les autres systèmes d'arrosage par aspersion. Selon James et Blair (1984), l'uniformité aurait même tendance à augmenter avec la vitesse du vent tant qu'elle ne dépasse pas 4 m/s.

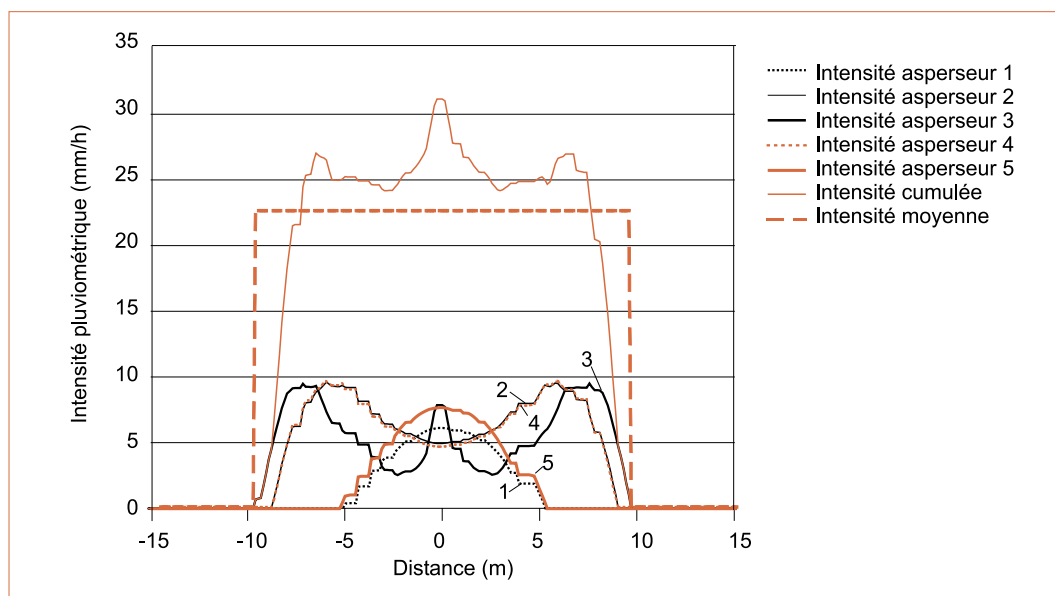
En conséquence, il est indispensable d'utiliser sur les pivots et rampes frontales des asperseurs à angle bas (angle du jet < 10 °) au lieu d'asperseurs à angle standard utilisés en couverture intégrale.

La figure 2 nous donne une illustration de la chronologie de l'apport d'eau en un point donné en tenant compte de l'avancement discontinu de l'appareil et du recouvrement entre cinq asperseurs voisins.

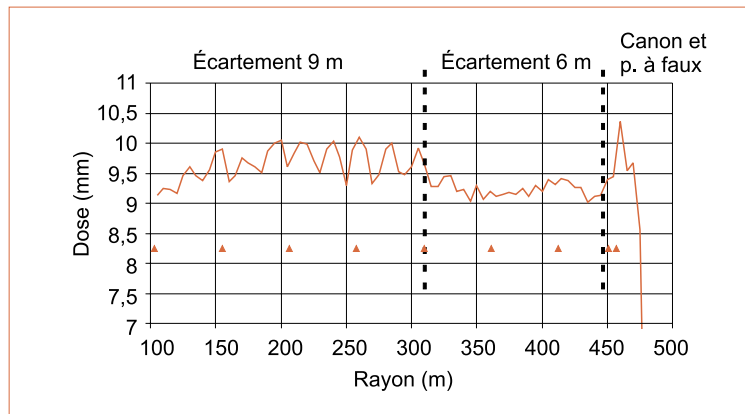
La courbe pluviométrique (figure 3) obtenue avec un pivot équipé de sprinklers angle bas double buse dont la portée est de 13 m environ, se divise en trois portions :

- jusqu'à 320 m : l'écartement entre asperseurs est de 9 m ;
- de 320 à 450 m : l'écartement entre asperseurs est de 6 m ;
- au-delà de 450 m : il s'agit de l'arrosage généré par le canon d'extrémité et le porte à faux en bout de pivot.

Pour un pivot donné ce type de répartition radiale est valable théoriquement quelle que soit la vitesse d'avancement choisie (Bremond et Molle, 1995). En effet, en théorie, le réglage de l'avancement (*i.e.* de la dose) ne modifie pas significativement l'uniformité de la distribution.



◀ Figure 2. – Exemple de courbe d'intensité cumulée simulée, pour des sprays à rotor, à une distance de 400 m du pivot, des écartements de 3,1 m et pour une dose de 7 mm/j.



▲ Figure 3. – Distribution d'eau simulée radialement sous un pivot équipé de sprinklers angle bas à deux buses, avec un écartement passant de 9 m (jusqu'à 300 m) à 6 m (de 300 m à 450 m), au-delà de 450 m influence du canon d'extrémité.

Sous les fortes intensités d'arrosage : attention au ruissellement

Comme un pivot applique la dose d'eau d'autant plus vite que l'on s'éloigne du centre, il faut vérifier que l'apport d'eau des asperseurs les plus éloignés n'est pas supérieur aux capacités d'infiltration du sol. En d'autres termes, on devra limiter la longueur d'un pivot à proximité du point où l'intensité pluviométrique dépasse la perméabilité ; en effet toute l'eau appliquée en excès par rapport à la capacité d'infiltration du sol risque de ruisseler. Enfin, rappelons que lorsque des problèmes de ruissellement s'installent au cours d'une campagne, ils ne font que s'accroître au fur et à mesure des tours d'eau.

Les concepteurs de pivots doivent tenir compte des deux phénomènes dynamiques suivants :

- 1 - l'intensité pluviométrique instantanée croît le long du pivot ;
- 2 - la vitesse d'infiltration dans le sol décroît au cours du temps.

Par ailleurs les courbes d'infiltration varient fortement en fonction du type de sol.

On s'intéressera ici à la valeur moyenne de l'intensité pluviométrique (encadré 2). Cette approche est cohérente par rapport à l'information que l'on souhaite analyser à l'échelle d'un tour d'irrigation. Une telle approche n'est pas suffisante si l'on souhaite analyser les énergies et les mécanismes en jeu ; il est nécessaire de se placer alors à un pas de temps de quelques secondes.

■ Adapter l'intensité d'arrosage à la capacité d'infiltration du sol

La vitesse d'infiltration dans le sol est une fonction qui décroît au cours du temps jusqu'à une valeur limite ou régime d'infiltration permanent. La composition granulométrique du sol et sa structure permettent de définir des équations d'infiltration à partir de mesures au laboratoire sur des colonnes de sol.

Une expression classique d'une courbe d'infiltration (I) en fonction du temps (t) est donnée par la formule empirique de Kostiakov :

$$I = k(t - \Delta t)^n$$

dont une représentation graphique est donnée dans la figure 4. k et n sont des paramètres définis en fonction de la nature du sol. Δt représente ici le temps de retard d'apparition du ruissellement dû aux capacités de stockage de l'eau en surface.

Les sols sableux peuvent avoir des vitesses d'infiltration initiale très fortes qui diminuent rapidement et se stabilisent à des valeurs supérieures 30 mm/h. Les sols plus lourds, au contraire peuvent présenter des vitesses d'infiltration stabilisées inférieures à 10 mm/h.

Remarques

– Les valeurs des paramètres k et n doivent pouvoir être calées sur des mesures locales d'infiltration. Il existe des abaques et des formules de calcul approchées donnant ces valeurs à partir de la classification granulométrique des sols.

– La valeur de Δt peut être augmentée par des façons superficielles (binage, microbassins) ou simplement par la présence de débris végétaux permettant la formation d'un « *mulch* » protecteur.

– Pour plus de détails sur cette partie, on se reportera à l'étude bibliographique en encadré 3.

■ Utilisation des courbes d'infiltration pour le calcul et le choix des arroseurs

Pendant l'étude d'un projet classique de couverture intégrale, la vitesse d'infiltration de base (plateau des courbes d'infiltration de la figure 4) est nécessaire pour déterminer l'intensité d'arrosage acceptable, car les postes d'arrosage ont une du-

Encadré 2

Calcul de l'intensité de l'arrosage (Intensité pluviométrique instantanée moyenne)

La formule suivante a été développée par Dillon (1971) pour estimer, sans canon d'extrémité, l'intensité pluviométrique maximum moyenne à l'extrémité d'une machine :

$$I = 1000 \frac{Q}{L \times 2Wr}$$

où I = intensité pluviométrique moyenne (mm/h) à la distance L = distance entre le pivot et le dernier asperseur (m), Q = débit délivré à l'entrée du pivot (m^3/h), Wr = portée du dernier asperseur (m).

Par définition la dose journalière Dj (mm/h) permet de calculer le débit de l'installation Q (m^3/h) :

$$Q = \frac{\pi \times L^2 \times Dj}{24000}$$

Remarque : attention aux problèmes liés aux cas des appareils déplaçables, pour lesquels le temps effectif d'arrosage n'est jamais de 24 h (il faut tenir compte des déplacements à sec) et à la surface, différente de πL^2 .

En remplaçant Q par sa valeur dans la première équation, on obtient l'intensité pluviométrique I en mm/h à l'extrémité du pivot :

$$I = \frac{\pi \times L \times Dj}{2Wr \times 24}$$

Cette équation indique que pour une valeur donnée de la dose journalière Dj requise, l'intensité pluviométrique instantanée I est directement proportionnelle à la longueur du pivot et inversement proportionnelle à la portée des derniers asperseurs. On note aussi que I est proportionnelle à la dose journalière requise, mais est indépendante de la dose appliquée lors d'une irrigation.

L'intensité pluviométrique instantanée moyenne augmente le long du pivot pour atteindre son maximum à l'extrémité de la machine. Quelle que soit la distance sur une machine donnée, l'intensité pluviométrique instantanée sera imposée par le plan de busage et restera constante quelle que soit la vitesse de rotation du pivot lors d'une irrigation, c'est-à-dire quelle que soit la dose appliquée.

rée importante. Pour les pivots, la méthode est différente à cause du déplacement : les derniers arroseurs apportent l'eau pendant le temps qu'il faudra au pivot pour parcourir la distance mouillée, soit deux fois la portée de l'arroseur.

On va chercher à profiter de la courte période du début de l'infiltration où la capacité d'absorption est très forte, ce qui permet d'apporter l'eau avec une intensité d'arrosage instantanée bien supérieure à la vitesse d'infiltration de base du sol, sans provoquer de ruissellement.

On voit très bien cela en superposant sur un même graphique les courbes (figure 4) :

- de l'intensité d'arrosage moyenne instantanée,
- et de la vitesse d'infiltration dans le sol.

Dans la réalité, un point situé dans une zone arrosée par un pivot, à partir du moment où il com-

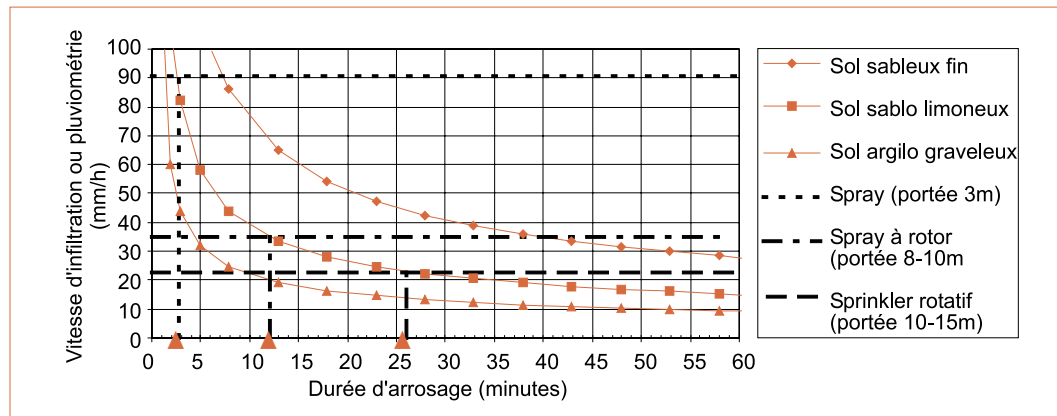
mence à être mouillé, reçoit une intensité d'arrosage qui va augmenter rapidement (figure 2) pour diminuer ensuite symétriquement jusqu'à zéro quand le pivot s'éloignera. On peut raisonner sur quelques cas types pour définir les caractéristiques des asperseurs et de l'installation à respecter pour éviter le ruissellement.

Les asperseurs doivent avoir une portée minimum

A partir des équations présentées dans l'encadré 2, on peut remplacer la valeur de l'intensité d'arrosage I par celle de P la perméabilité augmentée du stockage de surface du sol en régime permanent, comme valeur limite à ne pas dépasser. On cherche alors à respecter la contrainte :

$$P \geq \frac{\pi \times L \times Dj}{2Wr \times 24}$$

Figure 4. – Exemples de courbes d'infiltration obtenues au laboratoire (Kincaid *et al.*, 1969), tenant compte de Δt dû au stockage de surface. Date de l'apparition du ruissellement pour différentes intensités d'arrosage sur sol sablo-limoneux.



Lors de la conception, le seul paramètre sur lequel il est possible de jouer est la portée de l'asperseur : en effet, la perméabilité du sol est imposée par sa nature (texture et structure) et la dose journalière par les caractéristiques climatiques. De l'inégalité précédente on tire que :

$$2Wr \geq \frac{\pi \times L \times Dj}{P \times 24}$$

Cela revient à assimiler les courbes d'arrosage des asperseurs à des créneaux, analogues à ceux dessinés en pointillés sur la figure 5. La portée des asperseurs terminaux va déterminer la durée de l'arrosage, donc l'intensité moyenne maximum d'application de l'eau.

La portion de l'eau sujette au ruissellement est représentée par la portion de surface délimitée par la courbe des apports, au-delà de celle délimitée par la courbe d'infiltration.

Remarques

L'utilisation d'une valeur moyenne de l'intensité, si elle est pratique, est inexacte pour prédire le ruissellement. La figure 2 illustre parfaitement que le maximum de pluviométrie peut être très supérieur à la moyenne. La différence varie en fonction de la forme des courbes de distribution des asperseurs et la qualité des recouvrements.

Selon de nombreux auteurs (encadré 3), la forme la plus adaptée est celle d'une demie-ellipse, dont le maximum représente 1,3 fois la valeur moyenne, comme illustré dans la figure 5 (courbes en pointillés).

Cela permet d'expliquer qu'il est possible d'arroser une parcelle avec une intensité supérieure à la capacité d'infiltration sans générer de ruissellement (figure 5, courbe « 2 fois Portée »).

En cas d'impossibilité de réaliser la contrainte sur l'intensité, plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- soit augmenter la pression de fonctionnement pour augmenter la portée des asperseurs ;
- soit réduire la dose journalière Dj , donc la capacité de l'installation à fournir la dose nécessaire en période de besoin de pointe ;
- soit réduire la longueur de la machine L , ce qui limitera la surface arrosée par le pivot ;
- soit augmenter la valeur de P , par le travail du sol ;
- soit interposer un *mulch* ou créer des micro-bassins, ce qui revient à augmenter P en augmentant Δt .

On a utilisé jusque-là comme perméabilité de référence celle que l'on observe en régime permanent d'infiltration. Or, avant l'installation du régime permanent d'infiltration, la capacité du sol à absorber de l'eau est beaucoup plus importante. Il est donc possible d'apporter l'eau avec une intensité supérieure à la capacité d'infiltration P , mais dans un temps bref.

Pour connaître le temps d'arrosage limite avant installation du ruissellement, il est nécessaire de prendre en compte la vitesse d'avancement de la machine, c'est-à-dire la dose apportée lors d'un passage, en plus de la portée des asperseurs et de la forme de leur courbe d'arrosage.

Encadré 3

Synthèse bibliographique sommaire : Irrigation par pivot, intensité pluviométrique et infiltration

Les problèmes liés à l'intensité de l'irrigation par pivot ont été étudiés de nombreuses fois, expérimentalement ou théoriquement, en vue de prédire le ruissellement ou l'infiltration, pour déboucher sur des méthodes de conception des machines ou de conduite de l'irrigation.

Dès 1962, Bittinger *et al.* étudient théoriquement la distribution d'eau au cours du temps sous un pivot, sous différentes formes de profil des courbes de distribution d'eau des asperseurs (triangulaires ou elliptiques). Ils calculent pour ces profils l'écartement optimal entre asperseurs pour obtenir la meilleure uniformité. En 1969 Kincaid *et al.*, pour prédire les risques de ruissellement, mettent en regard en fonction du temps (t) des courbes d'application triangulaire ou elliptiques et des courbes d'infiltration (I), en utilisant l'équation empirique de Kostiaikov.

Ils prennent en compte l'effet retard (Δt) sur le déclenchement du ruissellement dû au stockage d'eau à la surface du sol : l'infiltration s'exprime alors par $I = k(t - \Delta t)^n$. La prise en compte de cet effet retard a permis de mieux ajuster les calculs aux mesures *in situ*, où le ruissellement mesuré était inférieur d'environ 50 % à celui prédit à partir des courbes obtenues sur colonnes de sol au laboratoire.

La dissymétrie des courbes d'absorption amène à penser qu'on pourrait optimiser l'infiltration en utilisant des asperseurs dont le profil de distribution d'eau est proche du profil d'absorption par le sol. Addink *et al.* (1972 et 1975) testent différents types de profils d'apport, symétriques ou non, sous un simulateur d'irrigation permettant de reproduire l'arrosage d'un pivot ou d'une rampe frontale. Ils concluent que le ruissellement est minimisé en apportant beaucoup d'eau en début d'infiltration, puis moins lorsque le régime permanent s'installe. Cette méthode aurait permis de limiter de 11 % le ruissellement.

Dillon (1972) propose quelques formules simples de calcul de l'intensité de l'arrosage et une méthode de calcul de la taille maximum de la machine en fonction des caractéristiques du sol et de la portée des asperseurs. Rutten et Vigneron (1978) reprennent cette méthode pour établir des abaques d'aide au dimensionnement des pivots.

Kelso (1983) mesure l'intensité sous différents asperseurs et l'infiltration induite, et constate que le ruissellement s'installe moins vite que ne le prévoit la théorie. Morin *et al.* (1977) mesurent en sol nu le même effet retard de mise en place du

ruissellement. Ils concluent que la mise en place du régime permanent d'infiltration est différée par le fait que, dans la phase transitoire, la saturation n'est que rarement atteinte, alors que la courbe d'infiltration théorique est obtenue en conditions de saturation.

Un moyen de réduire le ruissellement potentiel est d'accroître le stockage de surface, en créant des microbassins de rétention d'eau. Aarstad *et al.* (1973) testent cette pratique et réduisent de 90 à 100 % le ruissellement, Hashemina (1994) mesure avec la même méthode jusqu'à 68 % de supplément de rendement en situation aride.

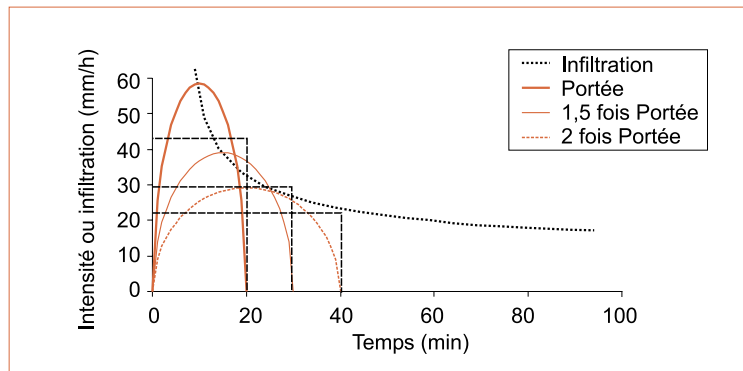
Le problème reste qu'il est très difficile de mesurer de fortes intensités avec une bonne précision.

Quelques auteurs ont développé ou adapté des systèmes de mesure spécifiques à partir de ceux utilisés en météorologie. Il s'agit de pluviomètres à augets basculeurs (Costello *et al.*, 1991, Calder, 1992) calibrés pour les fortes intensités (jusqu'à 200 mm/h) ou de systèmes de mesure de la résistance électrique d'un flux d'eau (Raymond *et al.*, 1993).

Ces différentes études permettent d'affiner les méthodes de conception des pivots, à la fois pour les asperseurs sur la rampe (Allen, 1990) et le canon d'extrémité (Mahamoud *et al.*, 1992). Enfin, l'utilisation de mesures d'énergie cinétique permet de sélectionner en fonction de la nature du sol le type d'asperseur adéquat (El-Shafei *et al.*, 1993), et sa pression de fonctionnement. En effet, le diamètre des gouttes générées dépend du couple diamètre de buse pression, l'effet sur le rendement peut être très important (Undersanders *et al.*, 1985).

De Boer et Kohl (1993), confirment par des mesures *in situ* les effets de la pression, de l'angle du jet et du diamètre de la buse sur la distribution granulométrique des gouttes. Ils mettent en évidence le fait que le vent n'agit sur la granulométrie qu'à partir d'une vitesse du vent de 4,5 m/s, et mesurent l'intensité de l'arrosage à un pas de temps de 5 min. identifiant des valeurs maximum de 54 mm/h sous sprinkler et 226 mm/h sous spray.

Certaines de ces analyses ont servi de base à l'élaboration du DSS (Decision Support System) de Wilmes *et al.* (1994), permettant de concevoir une installation à partir de la carte digitalisée de la texture et de la pente du sol à arroser, pour minimiser les pertes par ruissellement.



▲ Figure 5. – Intensité de l'arrosage et intensité moyenne pour différentes portées d'asperseurs (à dose journalière constante) et capacité d'infiltration du sol tenant compte du stockage de surface.

■ La dose maximum par passage

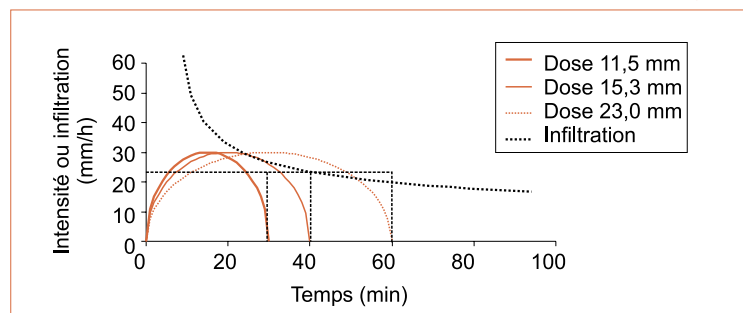
Si on considère un appareil dont l'intensité d'arrosage moyenne est de 23 mm/h (intensité maximum de 30 mm/h), on peut déterminer graphiquement le temps maximum d'arrosage à ne pas dépasser pour éviter le ruissellement, comme illustré en figure 6.

Connaissant le temps maximum d'arrosage (t) déterminé à partir de l'intensité moyenne de l'apport (I), on peut déduire la dose maximum (Dm) à ne pas dépasser lors d'un tour d'eau : $Dm = t \times I$. Dans notre exemple le temps maximum d'arrosage est de 40 min, soit une Dm de 15,3 mm.

Remarques

- L'utilisation d'une courbe d'intensité moyenne se justifie ici pour calculer la dose maximum par passage, de même que pour évaluer le risque de l'apparition du ruissellement.
- Pour déterminer la date de déclenchement du ruissellement et sa quantité, il est par contre nécessaire d'utiliser une courbe plus proche de la réalité, elliptique par exemple.

Figure 6. – Détermination graphique de la dose d'irrigation pour éviter le ruissellement. ▼



Conclusion

Lors du calcul d'une installation d'arrosage par pivot ou rampe frontale, on devra chercher un compromis entre les contraintes climatiques, celles liées au fonctionnement de l'appareil et les capacités d'infiltration du sol. La méthode exposée permet, à partir de quelques critères de calculs simples, de guider le concepteur dans le choix de la portée des asperseurs, de leur pression de fonctionnement et dans le choix de la dose par passage.

Le respect des quelques règles expliquées, ou l'utilisation de techniques spécifiques, permettent d'envisager l'irrigation par pivot ou rampe frontale dans des conditions optimales d'efficacité. Toute irrigation hors des limites définies se traduira par du ruissellement, donc une sous-irrigation à la périphérie du pivot, donc des pertes : d'eau, d'énergie, d'engrais, de produits chimiques et de rendement, et une accentuation du risque de pollutions diffuses.

En cas d'intensité excessive, les solutions pourront être :

- de décider de travailler au-dessus du pourcentage de réglage critique du doseur cyclique réduire la dose par passage ;
- d'utiliser des arroseurs de portée plus importante ;
- d'utiliser des petites rampes suspendues pour augmenter la distance mouillée (*i.e.* la portée) donc la durée d'arrosage à dose constante ;
- d'augmenter la capacité de stockage de surface du sol (augmentation de Δt) par des façons superficielles (binage, microbassins, *mulch*) ;
- d'envisager de travailler avec un pivot plus court.

A l'heure où l'agriculture irriguée est souvent accusée de gaspiller l'eau et de favoriser les pollutions diffuses, il faut améliorer les méthodes de conception des appareils. Il existe pour cela de nombreux outils : des normes (encadré 4), et des logiciels comme ceux conçus par le Cemagref :

- XERXES-RENFORS et ICARE permettent de calculer les réseaux collectifs d'irrigation ;
- CVI permet de calculer les installations de couverture intégrale à la parcelle ;
- WPDiBus (encadré 5) permet d'effectuer le diagnostic de fonctionnement ou le calcul du plan de busage des pivots et rampes frontales.

Encadré 4

L'apport de la normalisation

En matière d'irrigation par pivots la normalisation fournit des documents précieux pour l'utilisateur, comme pour le constructeur.

EN 12325 : Techniques d'irrigation

- Systèmes d'irrigation par pivots et rampes frontales
- Partie 1 : Description des caractéristiques techniques
- Partie 2 : Performances et caractéristiques techniques minimales

Ces deux normes ont permis la rédaction à la demande du Conseil Général des Landes de deux documents donnant un tableau des informations à fournir par un constructeur au client (partie 1), et la liste des exigences minimales de qualité d'une machine (partie 2).

ISO 11545 : Matériel d'irrigation

- Appareillage d'irrigation par rampe pivotante ou par rampe frontale équipées de buse de pulvérisation ou d'arrosage

- Mesure de l'uniformité de distribution sous les pivots et les rampes frontales

Une fiche de mesure a été rédigée à partir de cette norme, dans le cadre du RNED HA, et figure en annexe du chapitre Pivot du guide pratique irrigation.

EN 909 : Matériel agricole et forestier

- Machines à irriguer types pivot et rampe frontale
- Sécurité

Cette norme a été établie en conformité avec la directive Machine du CEN, et revêt un caractère obligatoire. Toute machine commercialisée sur le marché européen est présumée conforme à cette norme.

prEN XXXX : Intensité de la pluviométrie

- Principes, méthodes de calcul et de mesure

Projet de norme sur le calcul et la mesure de l'intensité de l'arrosage, ce projet en est à sa phase de démarrage.

On parle de plus en plus du concept d'*agriculture de précision*, si l'on souhaite un jour s'orienter vers le concept d'*agriculture irriguée de précision* il est indispensable de réfléchir à la conception des ins-

tallations d'irrigation de manière intégrée, Le raisonnement doit être global : demande climatique, capacités du sol, capacités de l'installation, méthode de conduite de l'arrosage.

Encadré 5

Plan et diagnostic de busage des pivots et rampes frontales sous Windows Fiche technique du logiciel WPDiBus

Réalisation : Cemagref, version 1.0, 1^o semestre 1998

Objectifs

- Diagnostic du fonctionnement hydraulique des installations d'arrosage du type pivot et rampe frontale
- Dimensionnement du busage des pivots et rampes frontales

Destinataires

Chambres d'agricultures, agriculteurs, bureaux techniques, - constructeurs d'arroseurs ou de pivots

Caractéristiques prises en compte

- Description de la structure de la machine et de la position des sorties
- Description des courbes caractéristiques des arroseurs, canons, régulateurs, surpresseurs

Diagnostic hydraulique des machines d'arrosage

A partir du débit en tête et de la pression à l'une des extrémités, le logiciel calcule le débit et la pression à chaque arroseur,

ainsi que la portée efficace pour le canon d'extrémité.

Les caractéristiques hydrauliques peuvent être modifiées : rugosité des conduites, diamètre intérieur des conduites, diamètre des buses des arroseurs, pour tenir compte du vieillissement, du colmatage, de l'usure des conduites et des buses, et des mesures de pression disponibles.

Calcul d'un nouveau busage

A partir des données générales, le logiciel calcule le busage en utilisant : la dose journalière requise par travée, la pression disponible en tête, le secteur arrosé, le rayon d'arrosage souhaité, l'écartement et la position précise des asperseurs. L'option présence de cannes de descente est disponible.

Contact

Cemagref, division ouvrage et équipements pour l'irrigation Aix-en-Provence.

Langue : française, logiciel adapté pour être traduit rapidement.

Résumé

Le pivot ou la rampe frontale sont capables de produire une irrigation très uniforme. Un des obstacles à l'extension de ces systèmes est la très forte intensité de l'arrosage qu'ils distribuent. Elle peut dépasser les capacités d'infiltration de certains sols.

Les principaux facteurs caractérisant l'irrigation par pivot pour une parcelle donnée sont rappelés : types d'asperseurs, buses, pression de fonctionnement, portée, sensibilité au vent, granulométrie. Ces éléments permettent de calculer la valeur maximum de l'intensité d'arrosage appliquée par un modèle d'asperseur donné. Les courbes d'apport d'eau obtenues sont ensuite mises en regard des courbes d'infiltration du sol pour choisir le type d'asperseurs terminaux convenables.

L'influence de la dose journalière et de la portée des asperseurs sur l'intensité d'arrosage est illustrée et discutée. Une méthode graphique de détermination de la dose maximum d'irrigation est proposée pour éviter le déclenchement du ruissellement.

Des compléments d'information sont donnés sur le calcul de l'intensité d'arrosage, la normalisation, l'évolution du marché, le coût des installations et le logiciel WPDiBus de calcul et de diagnostic de fonctionnement des appareils mis au point au Cemagref. Une synthèse bibliographique sommaire est présentée.

Abstract

Centre pivots or moving laterals are able to perform a very uniform irrigation. One of the obstacles to the extension of such systems is the very high distributed water application intensity. It can exceed some soil infiltration capacity.

The main factors that characterize pivot irrigation for a given plot are reviewed: types of sprinklers, nozzles, functioning pressure range, wind resistance, droplet diameters. These elements allow to compute the maximum value of the applied watering intensity by a given sprinkler type. The water application curves obtained are then compared to the soil infiltration curves to select the appropriate types of sprinkler.

The influence of the daily application and sprinkler range on watering intensity is illustrated and discussed. A graphical method is proposed for assessing the maximum amount of irrigation water avoiding runoff. Additional information is given on water application intensity calculation, standardisation, market evolution, system cost, and on the WPDiBus software, used to compute and diagnose the functioning of devices designed by Cemagref. A brief literature review is provided.

Bibliographie

- AARSTAD, J.-S., MILLER, D.-E., 1973. Soil management to reduce runoff under centre pivot sprinkler systems.
- ADDINK, J.-W., MILES, D.-L., 1972. Water infiltration under centre pivot sprinklers, *ASAE paper* n° 72-725, 18 p.
- ADDINK, J.-W., MILES, D.-L., *et al.*, 1975. Water intake under centre pivot from time varying application rates, *Transactions of the ASAE* 18(3): 523-525 et 528.
- ALLEN, R.-G., 1990. Application selection along centre pivots using soil infiltration parameters. Third irrigation national symposium, Phoenix, Arizona, ASAE.
- BITTINGER, M.-W., LONGENBAUGH, R.-A., 1962. Theoretical distribution of water from a moving irrigation sprinkler, *Transactions of the ASAE*, p.26-30.
- BREMOND, B., MOLLE, B., 1995. Characterization of rainfall under centre pivot : influence of measuring procedure, *Journal of irrigation and drainage engineering*, vol. 121, n°5, p.347-353.
- CALDER, J.-R., 1992. Comment on short duration rainfall intensity measured using calibrated time-of-tip data from a tipping bucket raingage, *Agricultural and forest meteorology* 61: 301-304.

- COSTELLO, T.-A., WILLIAMS, H.-J., 1991. Short duration rainfall intensity measured using calibrated time-of-tip data from tipping bucket raingage, *Agricultural and forest meteorology* 57: 147-155.
- DE BOER, D.-W., KOHL, R.-A., 1993. Performance characteristics of reduced pressure sprinklers, ICID Fifteenth Congress, The Hague, NLD.
- DILLON, R.-C., HILER, E.-A., *et al.*, 1972. Centre pivot sprinkler design based on intake characteristics, *Transactions of the ASAE*, 996-1001.
- HADAR, S., BAUDEQUIN, D., MOLLE, B., 1997. Choix du busage et conduite de l'irrigation par pivot, en tenant compte des caractéristiques du sol, *Irrigazette*, n° 43, p. 33-42.
- HASHEMINIA, S.-M., 1994. Controlling runoff under low pressure centre pivot irrigation systems, *Irrigation and drainage systems*, vol. 8, p. 25-34.
- HUBER, L., 1991. *Pertes par évaporation en irrigation par aspersion, État des connaissances et éléments d'estimation, étude effectuée pour le compte de l'agence de l'Eau Loire Bretagne.*
- JAMES, L.-C., BLAIR, S.-K., 1984. Effect of wind on center pivot application uniformity. *ASAE paper n°84 2581*: 10 p.
- KELSO, G.-L., GILLEY, J.-R., 1983. A system for measuring infiltration rates under center pivot irrigation systems.
- KINCAID, D.-C., HEERMANN, D.-F., *et al.*, 1969. Application rates and runoff in centre pivot sprinkler irrigation, *Transactions of the ASAE*, 12(6).
- KOHL, K.-D., KHOHL, R.-A., *et al.*, 1987. Measurement of low pressure sprinkler evaporation loss, *Transactions of the ASAE*, vol 30, n°4, p.1071-1074.
- MOHAMOUD, Y.-C., MAC, T.-R., *et al.*, 1992. Optimum center-pivot irrigation system design with tillage effects, *Journal of irrigation and drainage engineering*, vol. 118, n° 2, p.291-305.
- MORIN, J., BENYAMINI, Y., 1977. Rainfall infiltration into bare soils, *Water resources reseach* 13(5): 813-817.
- RAYMOND, D.-J., WILSON, K., 1973. Development of a new rainfall intensity gauge, *Journal of applied meteorology* 13: 180-182.
- RUTTEN, P., VIGNERON, J., 1978. Limites pédologiques et climatiques du domaine d'utilisation des grandes machines d'arrosage tournantes. XV^e journées de l'hydraulique, Toulouse, Société hydrotechnique de France.
- UNDERSANDER, D.-J., MAREK, T.-H., *et al.*, 1985. Effect of nozzle type on runoff and yield of corn and sorghum under center pivot sprinkler systems, *Irrigation science*, vol. 6, p. 107-116.
- WILMES, G.-J., MARTIN, D.-L., *et al.*, 1993. Decision support system for design of center pivot, *Transactions of the ASAE* 37(1): p.165-175.