

Optimisation des réglages et de l'utilisation des systèmes d'irrigation par canon-enrouleur

Jacques.Granier ^a, Bruno Molle ^a, Jean-Marc Deumier ^b et Bernard Lacroix ^b

L'irrigation par canon-enrouleur est apparue dans les années 70, c'est-à-dire une quinzaine d'années après que l'irrigation sous pression ait commencé à se développer dans nos régions. On estime qu'en France, 70 % de la superficie irriguée actuellement par aspersion est équipée de ce type de matériel.

Le travail présenté ici a pour objectif de proposer des réglages et des modes d'utilisation optimaux, adaptés à chaque type d'enrouleur et à chaque condition pédoclimatiques. La méthodologie repose sur des études de scénarios. Un modèle intégré composé de plusieurs sous-modèles permet de simuler la pratique d'un irrigant dans une situation-type, dans une région donnée et pour une culture donnée. Des variantes de ces situations peuvent être simulées et évaluées. La comparaison de ces résultats permet de proposer des solutions optimales.

Description de l'équipement

Le principe du canon-enrouleur (figure 1) repose sur deux idées simples : d'une part, une seule source d'énergie est utilisée, celle de la pression hydraulique, qui sert à la fois pour l'alimentation en eau du canon et pour son déplacement sur la parcelle ; d'autre part, la conduite souple en polyéthylène qui amène l'eau est utilisée en même temps pour tracter le canon sur son support. Il en résulte un appareil simple et robuste, dont le coût d'équipement à l'hectare est relativement faible. Il exige peu de main d'œuvre, puisque le changement de poste ne demande que quelques dizaines de minutes par jour. Enfin, il est bien

adapté à des parcelles de taille moyenne et de forme quelconque, telles qu'on en trouve dans la plupart de nos régions.

Le canon arroseur est porté par un chariot mobile, et il est raccordé à un tube en polyéthylène qui l'alimente en eau. L'autre extrémité du tube est fixée sur un tambour-treuil sur lequel il s'enroule. Ce tambour est entraîné par un moteur hydraulique, qui peut être un moteur à turbine ou un système pneuride. Dans les situations où la pression est insuffisante, c'est un moteur thermique qui assure l'enroulement.

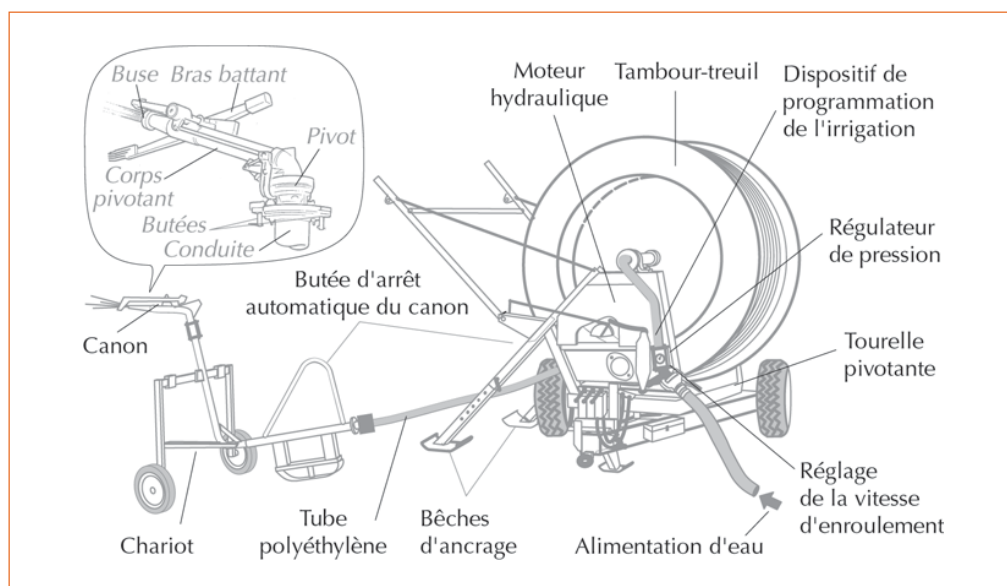
L'appareil arrose donc une bande dont la longueur est au maximum la somme de la longueur du tube déroulé et de la portée du canon ; la largeur irriguée est déterminée par cette même portée. L'usage le plus courant consiste à définir des longueurs de bande et des vitesses d'avancement telles que l'irrigation puisse s'effectuer en un peu moins de 24 heures, ce qui permet d'effectuer les changements de poste à heure fixe. Pour chaque poste, le tambour-treuil est placé au début de la bande à arroser, puis le tube polyéthylène est déroulé avec le chariot mobile jusqu'à l'autre extrémité de la parcelle. Dès la mise en route de l'irrigation, le tube peut commencer à s'enrouler sur le tambour jusqu'à ce que le chariot soit ramené à sa position initiale. Mais afin d'assurer un apport d'eau suffisant au sol en début et en fin de bande, il est possible de laisser le canon fonctionner sans déplacement pendant quelques minutes au départ et à l'arrivée ; ce système de temporisation est automatique et la durée en est réglable par l'irrigant.

Les contacts

a. Cemagref, UR
Ouvrages hydrauliques
et équipements pour
l'irrigation,
Le Tholonet, BP 31,
13612 Aix-en-Provence
Cedex

b. Arvalis-Institut du
végétal, 3, rue Joseph
et Marie Hackin,
75116 Paris

► Figure 1 – Schéma de principe d'un enrouleur et d'un canon d'irrigation.



La régularité de l'avancement est assurée soit de façon mécanique grâce à un palpeur qui détecte le nombre de couches de tube enroulées sur le tambour, soit de façon électronique, ce qui permet éventuellement de moduler la vitesse de déplacement en fonction du terrain. Cette dernière solution tend à se généraliser.

Le chariot mobile doit pouvoir se déplacer sur un terrain sec ; c'est pourquoi le canon n'arrose qu'un secteur angulaire, le jet étant dirigé à l'opposé de la direction d'avancement. On préconise en général un angle de secteur de 220° environ.

Les constructeurs proposent de larges gammes de matériels. La dimension des parcelles constitue pour l'irrigant la contrainte principale, et c'est surtout ce facteur qui conditionne le choix du modèle, en fonction notamment de la longueur et du diamètre du flexible. Les ordres de grandeur des principales caractéristiques d'un enrouleur sont les suivantes :

- les longueurs de tubes peuvent être entre 200 m et 600 m ;
- les diamètres du tube polyéthylène vont de 50 mm à 125 mm ;
- les débits varient entre 10 m³/h et 100 m³/h ;
- les pressions requises au canon sont entre 3 et 6 bars, mais on observe des pressions pouvant

atteindre 10 à 12 bars à l'entrée de l'enrouleur, compte tenu des pertes de charge dans le tube et dans l'enrouleur.

Les réglages

Bien qu'un apport d'eau parfait soit pratiquement impossible à obtenir avec un canon-enrouleur, l'irrigant dispose d'un certain nombre de possibilités de réglages pour modifier les caractéristiques de l'apport d'eau (figure 2).

LE CHOIX DU TYPE DE CANON

Le choix du type de canon est le premier point. Les caractéristiques techniques de chaque modèle sont à prendre en considération. En particulier, l'angle de tir par rapport à l'horizontale peut varier entre 15° à 27,5° et il joue directement sur la portée ainsi que sur la sensibilité au vent.

LA PRESSION DE SERVICE

La pression de service au niveau du canon détermine le débit et permet d'augmenter la portée ; mais elle produit un jet plus sensible au vent.

LE DIAMÈTRE DE LA BUSE

Le diamètre de la buse détermine le débit du canon pour une pression donnée, et la forme de la buse joue sur la cohérence du jet pendant les premiers mètres et donc sur la portée.

LE SCHÉMA D'IRRIGATION DE LA PARCELLE

Les différentes possibilités d'implantation du canon-enrouleur sur la parcelle donnent une certaine liberté de choix à l'irrigant : en particulier, la largeur des bandes, ou leur orientation peuvent être modifiées, si la géométrie de la parcelle le permet.

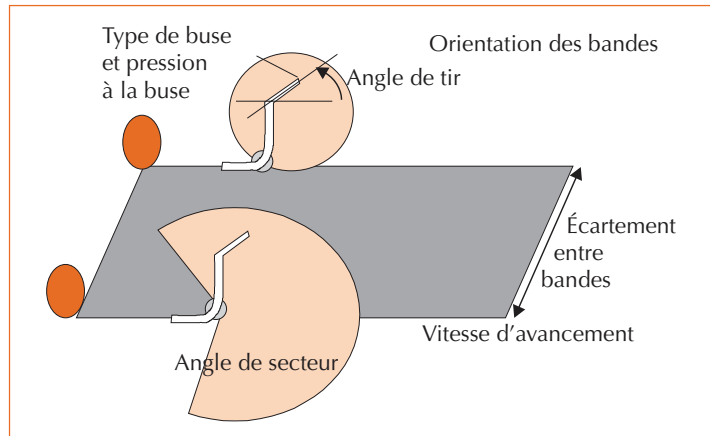
Enfin, les **vitesse d'avancement** ou **l'angle de secteur** sont les paramètres les plus faciles à adapter en temps réel ; certains irrigants se déclarent prêts à les adapter quotidiennement en fonction des conditions météorologiques, pour peu qu'on leur fournisse des indications de réglages pertinentes. En pratique, d'autres irrigants ne changent jamais de réglage !

Avantages et inconvénients

Le faible coût, la souplesse d'utilisation et la robustesse du canon-enrouleur sont les principaux atouts qui lui ont valu son succès. Mais en contrepartie, il présente deux points faibles : une homogénéité de répartition spatiale médiocre, et une intensité pluviométrique élevée. La répartition spatiale des apports d'eau d'un canon-enrouleur n'est jamais très régulière :

- dans le sens transversal, même si le recouvrement entre deux passages est suffisant, des déficits d'apports d'eau peuvent apparaître dès que l'on irrigue en conditions ventées ;
- dans le sens longitudinal, l'uniformité de répartition dépend de la régularité d'avancement, et celle-ci est rarement parfaite, sauf si l'on dispose d'une régulation électronique ;
- d'autre part, les options de temporisation ne permettent de pallier que très imparfaitement les déficits d'irrigation au départ et à l'arrivée ;
- enfin, l'irrigation correcte des bordures longitudinales de la parcelle pose toujours un problème.

L'autre inconvénient du canon-enrouleur est sa forte intensité pluviométrique. En effet des pluviométries moyennes de 12 à 15 mm/h sont des valeurs minimales pour les petits enrouleurs, et ce chiffre dépasse fréquemment 25 à 30 mm/h pour les plus gros appareils. Ce problème est aggravé lorsque le vent s'y ajoute, car les hauteurs d'eau en certains points peuvent être multipliées par 3 ou 4. Ce problème est tel qu'il exclut souvent le choix de l'enrouleur sur des parcelles de sols lourds, dont la capacité d'infiltration est faible. De plus, si l'on considère les effets destructeurs sur le sol ou la végétation, c'est



en terme d'intensité locale instantanée qu'il faut raisonner : à l'échelle de quelques mètres carrés et pour des intervalles de temps de quelques secondes, on peut constater des valeurs dépassant 80 à 100 mm/h. À cette échelle, l'énergie de chute d'eau est considérable

▲ Figure 2 – Paramètres de réglages du canon enrouleur.

Les données de référence de répartition spatiale de la pluviométrie

À partir des caractéristiques techniques du canon et en connaissant ses conditions d'utilisation, c'est-à-dire les réglages, mais aussi les conditions météorologiques, on pourrait penser qu'il est possible de prédire la répartition au sol de la pluviométrie. Cette approche déterministe se révèle cependant extrêmement complexe à réaliser, car les phénomènes physiques en jeu sont mal connus dans leur détail.

En effet, la structure du jet évolue très rapidement dès la sortie de la buse à cause de la turbulence du liquide. L'air qui s'y introduit en plus ou moins grande quantité contribue à le désagréger et à former des paquets de taille et de forme irrégulières. Le frottement de l'air sur le jet compact ou sur les paquets d'eau provoque la formation de gouttes plus ou moins fines. Enfin les perturbations liées au vent rendent les choses encore plus complexes, et le batteur introduit une discontinuité importante.

Une approche empirique se révèle donc mieux adaptée, en s'appuyant sur des essais réalisés dans des conditions climatiques diverses.

Mais dans tous les cas, la connaissance de la répartition spatiale est une étape indispensable

pour modéliser la répartition de l'eau. Nous disposons pour cela de deux outils : un banc d'essai de mesures radiales, en conditions contrôlées et un banc d'essai de mesures spatialisées au champ (figure 3).

En conditions contrôlées, au laboratoire, les quantités d'eau sont recueillies dans des pluviomètres disposés en ligne à partir du canon et tous les 50 cm jusqu'à une distance de 80 m.

Au champ, les mesures sont faites sur un maillage carré de 5 m x 5 m, soit 400 pluviomètres distribués sur une parcelle de 1 hectare.

Le principe de mesure est le même dans les deux cas : un collecteur dirige l'eau dans un tube de mesure qui est relié à un capteur de pression mesurant la hauteur d'eau recueillie. Les collecteurs sont organisés en groupes de 10 dans le cas du laboratoire, et par groupe de 40 pour le dispositif au champ. Pour chaque groupe, un capteur de pression est relié alternativement à l'un des collecteurs. On peut donc effectuer automatiquement la scrutation des hauteurs d'eau sur l'ensemble du dispositif en moins de 10 minutes et avec un nombre restreint de capteurs de pression (16 pour le banc d'essais en laboratoire, et 10 pour le banc d'essais au champ). La précision de la mesure est de l'ordre du dixième de mm. Au cours de l'essai on enregistre les paramètres climatiques (température, humidité, vitesse et direction du vent à 2 m et à 3,5 m, rayonnement) toutes les 30 secondes, ainsi que la pression à l'asperseur et le débit délivré toutes les secondes.

La modélisation de la répartition pluviométrique en conditions ventées

Les objectifs de la démarche de modélisation sont :

– l'amélioration de la connaissance des phénomènes étudiés ; la confrontation des résultats de simulation avec les données expérimentales

▼ Figure 3 – Le banc d'essais au champ.



permet de vérifier que les paramètres physiques pris en compte dans le modèle décrivent bien les phénomènes observés et que l'on est capable de les formaliser correctement ;

– la prévision des comportements des objets étudiés ; le modèle est alors un outil pour prédire des situations que l'on pourrait avoir dans des conditions définies à l'avance.

Dans notre cas, c'est un modèle d'outil de prévision que l'on cherche à développer, capable de prendre en compte le vent, étant donné son effet sur ce type d'appareil. Nous avons expliqué plus haut qu'une approche entièrement déterministe était très difficile à mettre au point dans notre cas. En effet, même si des travaux sont en cours pour modéliser le jet du canon, ils sont destinés surtout à mieux comprendre les phénomènes physiques qui interviennent sur les tout premiers centimètres du jet, et ils ne permettront pas à court terme d'aboutir à des outils permettant de prédire les répartitions. Un modèle opérationnel devra donc s'appuyer sur une approche empirique.

Dans cet esprit, une première idée a été d'assimiler les courbes de distributions radiales des pluviométries à des lois de distributions statistiques. Plusieurs auteurs ont utilisé cette approche (Solomon et Bezdek, 1980 ; Elliott *et al.*, 1980), généralement en s'appuyant sur plusieurs séries de mesures. Le Gat et Molle (2000), à partir d'une méthode analogue, ont essayé de mettre en évidence la relation qui pouvait exister entre la distribution granulométrique des gouttes et les caractéristiques des courbes de distributions. Ce type d'approche peut être mené indépendamment des particularités de l'asperseur. Elles peuvent aussi s'appliquer sur un ensemble d'asperseurs : ligne ou maille de couverture intégrale (Karmeli, 1978), pivot (Heerman *et al.*, 1992). De telles méthodes conviennent parfaitement pour simuler le comportement d'un système d'irrigation dans le but d'en évaluer les performances globales.

Cette approche peut être complétée par un calcul balistique de la trajectoire des gouttes d'eau. Mais il faut pour cela connaître au préalable la taille des gouttes et leur vitesse initiale. Pour ce type d'évaluation, de nombreuses méthodes directes ou indirectes ont été mises au point : papier sensible, huile, bac à farine, photographie, vélocimétrie-laser, estimation à partir d'une courbe radiale (Von Bernuth, Gilley, 1984), atténuation d'un faisceau infra-rouge (Salles, 1995).

Connaissant la distribution granulométrique des gouttes le long d'un rayon en conditions contrôlées, on peut, pour chaque goutte, prévoir sa trajectoire en fonction des conditions ambiantes (vitesse du vent, humidité, température). Pour ajuster la réalité, on doit faire des approximations sur la nature des phénomènes aérodynamiques (Han *et al.*, 1994). En particulier, on admet souvent que les gouttes sont sphériques, voire qu'elles sont formées au sortir de la buse, ce qui ne semble pas toujours vrai (Kohl *et al.*, 1985 ; Augier, 1996). Ce problème est contourné en utilisant des coefficients de traînée pondérés fixés empiriquement.

Seginer *et al.* (1991), à partir de mesures de pluviométrie pour différentes vitesses du vent, calculent des cartes interpolées de pluviométrie qu'ils corrigent des pertes par évaporation et transport. La dérive du centre de gravité de la zone arrosée et la diminution de la surface arrosée sont proportionnelles à la vitesse du vent. Han *et al.* (1994) développent un modèle de simulation utilisant des courbes pluviométriques mesurées dans 4 directions par rapport au vent (0°, 90°, 180°, 270°) sous des asperseurs individuels. Les courbes obtenues sur le terrain (170 tests) sont classées en 10 familles, représentées chacune par une courbe moyenne qui sert de prototype. Cette approche est intéressante dans son principe mais reste lourde et délicate à mettre en œuvre.

Suivant la même logique, Richards et Weatherhead (1993) ont proposé un modèle capable de reproduire le déplacement des différents points de la surface mouillée sous l'action du vent. Il s'agit là d'un algorithme de transformation point par point, que l'on peut appliquer aisément à un appareil qui arrose en secteur, ce qui est le cas du canon.

Le modèle de répartition de Richards et Weatherhead

Le modèle de répartition pluviométrique est une composante essentielle de la méthodologie que nous proposons de mettre en œuvre pour optimiser les réglages et l'utilisation des canons-enrouleurs. Parmi les différents modèles proposés ci-dessus, le modèle de Richards et Weatherhead nous a paru être celui qui convenait le mieux. Il repose sur les cinq hypothèses suivantes :

1) le volume flexible représentant la masse d'eau apportée au sol est déformé sous l'effet du vent ; il s'agit d'une déformation point par point qui

conserve la cohérence du volume, c'est-à-dire que les gouttes qui sont projetées le plus loin par vent nul vont se retrouver également le plus loin en conditions ventées (figure 4) ;

2) l'ensemble du volume est soumis à un déplacement parallèlement à la direction du vent (*wind drift*) ;

3) en même temps, la portée du jet est réduite à cause de l'introduction d'air dans le jet, qui en accélère la dispersion (*range shortening*) ; cette réduction est d'autant plus importante que la direction du vent fait un angle fort avec celle du jet ;

4) l'amplitude de ces déformations est proportionnelle à la vitesse du vent ;

5) les pertes d'eau par évaporation sont négligées.

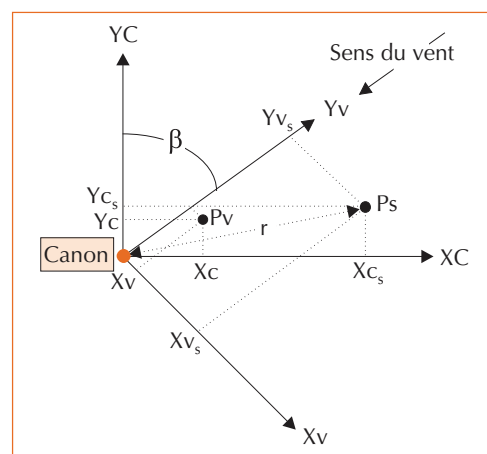
Le modèle se décompose en trois étapes :

- répartition spatiale de l'apport d'eau par vent nul ;
- modélisation de la dérive et de la réduction de portée du jet ;
- calcul de la répartition spatiale de l'apport d'eau en conditions ventées.

Étape 1 : répartition spatiale de l'apport d'eau par vent nul

La répartition par vent nul, qui sert de référence, peut être mesurée sur un seul rayon, puisque la courbe de distribution est supposée identique

▼ Figure 4 – Changement de repère en conditions ventées (Al Naeem, 1993).



dans chaque direction. La distribution spatiale sur l'angle de secteur arrosé (ω) peut être facilement déduite par le calcul. On peut aussi obtenir cette distribution directement par une mesure faite sur un maillage de collecteurs en conditions climatiques calmes (Al Naeem, 1993). Cette distribution spatiale est positionnée dans un repère orthonormé centré sur le canon (X_c, Y_c). En conditions ventées, ce repère subit une rotation telle que son axe des ordonnées soit parallèle au

vent et en sens contraire (X_v, Y_v), comme illustré figure 4. L'angle entre les axes Y_c et Y_v est calculé à partir de la direction du vent.

Tout point $P_s(X_{c_s}, Y_{c_s})$ recevant de l'eau par vent nul dans le repère (Canon X_c, Y_c) aura pour coordonnées (X_{v_s}, Y_{v_s}) dans le repère (Canon X_v, Y_v). Respectivement tout point PV recevant de l'eau en conditions ventées aura pour coordonnées (X_c, Y_c) et (X_v, Y_v) en fonction du repère choisi.

Encadré 1

La modélisation de la dérive et de la réduction de portée du jet

WD (Wind Drift) = dérive due au vent

RS (Range Shortening) = réduction de portée du jet

R = Rayon de portée

V_v = vitesse du vent

S = sinus de l'angle formé entre le vecteur vent et la direction du jet en sortie de buse

$$WD = \left(A + B \times \left(\frac{r}{R} \right) + C \times \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \times V_v \quad (1)$$

où r est la distance entre le point de calcul P_s et la buse du canon en m qui s'écrit :

$$r = \sqrt{X_{v_s}^2 + Y_{v_s}^2} = \sqrt{X_{c_s}^2 + Y_{c_s}^2} \quad (2)$$

A, B et C sont des paramètres sans signification physique, exprimés en m par m/s.

$$RS = \left(D \left(\frac{r}{R} \right) + E \left(\frac{r}{R} \right)^2 + F \left(\frac{r}{R} \right)^3 \right) \times V_v \times S \quad (3)$$

avec $S = \sqrt{\sin^2 \alpha \times \cos^2 \theta + \sin^2 \theta}$, (4)

α étant l'angle en ° du jet par rapport à l'horizontale, et θ l'angle en ° entre la direction du jet et celle du vent, dans le plan horizontal. Les paramètres D, E et F , sont exprimés en m et n'ont pas de signification physique. La réduction de portée est également exprimée en m par m/s de vent.

Le déplacement d'un point $P_s(X_{v_s}, Y_{v_s})$, au point $P_v(X_v, Y_v)$ sous l'effet du vent s'écrit :

$$X_v = X_{v_s} - (Range\ Shortening) \sin \theta \quad (5)$$

$$Y_v = Y_{v_s} - (Wind\ Drift) - (Range\ Shortening) \cos \theta \quad (6)$$

soit encore :

$$\begin{cases} X_v = X_{v_s} - \left(D \left(\frac{r}{Rm} \right) + E \left(\frac{r}{Rm} \right)^2 + F \left(\frac{r}{Rm} \right)^3 \right) V_v S \sin(\theta) \\ Y_v = Y_{v_s} - \left(A + B \left(\frac{r}{Rm} \right) + C \left(\frac{r}{Rm} \right)^2 \right) V_v - \left(D \left(\frac{r}{Rm} \right) + E \left(\frac{r}{Rm} \right)^2 + F \left(\frac{r}{Rm} \right)^3 \right) V_v S \cos(\theta) \end{cases} \quad (7)$$

$$\cos(\theta) \text{ et } \sin(\theta) \text{ s'expriment par : } \cos(\theta) = \frac{Y_{v_s}}{r} \text{ et } \sin(\theta) = \frac{X_{v_s}}{r} \quad (8)$$

Étape 2 : modélisation de la dérive et de la réduction de portée du jet

La dérive due au vent (WD) et la réduction de portée du jet (RS) sont représentées en distinguant les deux phénomènes : en chaque point, on calcule séparément les valeurs en mètres des deux variables WD et RS. Le raisonnement suivi dans cette modélisation est indiqué dans l'encadré 1.

Étape 3 : calcul de la répartition spatiale de l'apport d'eau en conditions ventées

Le calcul de la répartition spatiale de l'apport d'eau en conditions ventées sur l'ensemble de la surface irriguée est réalisé en utilisant la transformation de Richards et Weatherhead : à partir de l'équation de transformation de R&W, on établit la fonction inverse, qui à chaque point de la zone arrosée fait correspondre le point où l'eau serait tombée s'il n'y avait pas eu de vent ; cette méthode se décompose en deux phases :

a) pour chaque point de la maille d'arrivée (« point venté »), on calcule le point correspondant de la maille de départ (« point non venté ») ; cela requiert une inversion de la transformation de R&W exécutée au moyen de l'algorithme de Newton-Raphson ;

b) pour chacun de ces points ventés, on calcule la pluviométrie tombée réellement, en appliquant à la pluviométrie du point non venté un facteur correctif égal au rapport des surfaces élémentaires au cours de la transformation (Jacobien) :

$$h_v(r, \theta) = \frac{h_0(r)}{\left(\frac{\partial X_v}{\partial X_{vs}}\right) \times \left(\frac{\partial Y_v}{\partial Y_{vs}}\right)} \quad (9)$$

Cette méthode permet de caler les paramètres du modèle pour chaque type de canon et chaque configuration matérielle. Cependant deux remarques peuvent être faites :

1) par vent fort, la reconstitution des volumes, faite par comparaison entre le débit obtenu par simulation et le débit mesuré au cours de l'essai, n'atteint une valeur acceptable que lorsque le maillage de calcul est suffisamment dense ;

2) des discontinuités anormales ou des gradients exagérés peuvent apparaître en simulation. Ceci s'explique du fait que le modèle suppose que

les conditions de vent sont stables au cours de l'irrigation, alors qu'en réalité des fluctuations de sa vitesse et de sa direction occasionnent un lissage des hauteurs d'eau reçues au sol. Cette hypothèse a été confirmée en rajoutant un « facteur de lissage », obtenu en faisant fluctuer légèrement les vitesses et directions de vent autour de leurs valeurs moyennes ; on vérifie que cette technique permet de reproduire plus fidèlement les cartographies réelles d'apport d'eau.

Les outils de simulation

Le modèle décrit précédemment permet de calculer la répartition des apports d'eau d'un canon fixe fonctionnant dans des conditions météorologiques déterminées. Notre objectif est ici d'analyser un système d'irrigation en fonctionnement sur une parcelle ou un groupe de parcelles, pendant toute une campagne d'irrigation. Outre les aspects concernant la répartition spatiale de l'eau que nous venons d'évoquer, un modèle global de l'irrigation à la parcelle doit intégrer également :

- un modèle de gestion de l'équipement au cours de la campagne d'irrigation ;
- un modèle de culture (bilan hydrique au niveau sol-plante-atmosphère).

Le modèle intégré IRRIPARC est constitué de la juxtaposition de trois sous-modèles (figure 5), en charge respectivement de la distribution spatiale d'apport d'eau, de l'établissement du calendrier d'irrigation, de la croissance des plantes.

Le modèle de répartition

Ce modèle (Granier *et al.*, 2003) est celui que nous venons de décrire, basé sur le principe décrit par Richards et Weatherhead. Il calcule la répartition de l'eau d'irrigation en tenant compte des vitesses et directions de vent observées au cours de la saison d'irrigation et pour les différents réglages répertoriés dans le scénario d'irrigation. Ce calcul est fait sur l'ensemble de la parcelle, en cumulant les résultats obtenus pour chaque position d'enrouleur.

La vitesse et la direction du vent sont fournies par Météo-France avec un pas de temps de 3 heures : le calcul fait sur un transect perpendiculaire à l'axe de passage du canon est considéré comme représentatif de la répartition pluviométrique pendant ces 3 heures. La qualité de la répartition sur

un transect puis sur la parcelle, est évaluée par le coefficient d'uniformité de Christiansen :

$$CUC = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |l_i - l_m|}{n \times l_m} \right] \times 100 \quad (10)$$

Avec : l_i : irrigation en mm sur la placette i du transect,

l_m : irrigation moyenne sur le transect,

n : nombre de placettes sur le transect.

Le modèle décisionnel

C'est le modèle qui génère un calendrier d'irrigation. Ce modèle décisionnel reproduit les règles de décision d'irrigation de l'agriculteur. Par exemple, « je déclenche l'irrigation à partir du stade 10 feuilles du maïs quand le déficit en eau du sol atteint 50 mm ». Quatre types de règles permettent de gérer les différents épisodes d'une campagne d'irrigation :

– règle de déclenchement d'irrigation en début de saison, ou après accumulation d'un déficit ;

– règle de retour des irrigations en fonction de la durée du tour d'eau ;

– règle de prise en compte des pluies dans le bilan hydrique ;

– règle d'arrêt des irrigations en fin de saison ;

Ce corps de règles est relié à des modèles agronomiques pour que la « règle » soit convertie en « action » et afin de connaître les conséquences de l'action.

Les modèles agronomiques

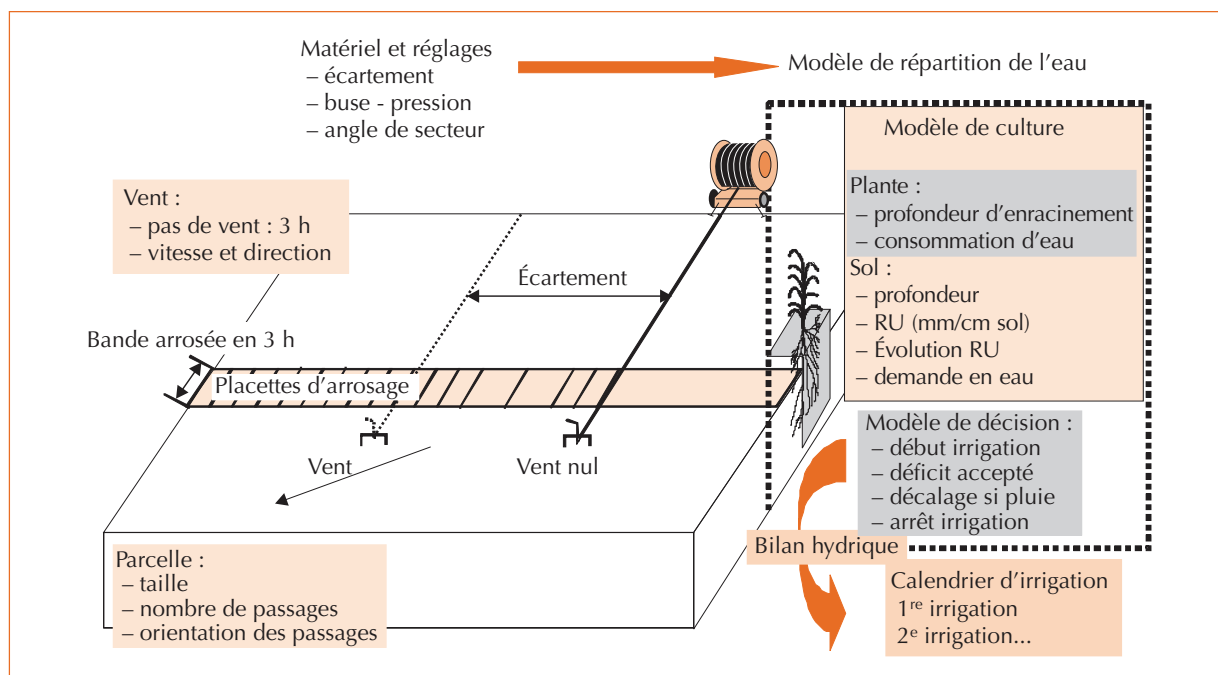
Ils comprennent un modèle de culture et un modèle de bilan hydrique sommaire.

LE MODÈLE PLANTE PILOTE :

– le développement de la culture à partir de somme de température depuis le semis (ainsi pour le maïs le stade 10 feuilles est atteint pour une somme de température de 450°C depuis le semis) ;

– et la croissance des racines qui permet à la plante d'accéder à une réserve en eau plus élevée à chaque stade.

▼ Figure 5 – Schéma de principe du modèle intégré IRRIPARC.



LE MODÈLE DE BILAN HYDRIQUE

Il calcule l'état de la réserve en eau du sol. Les besoins en eau de la plante sont calculés en appliquant à l'ETP un coefficient cultural K_c dont les valeurs dépendent des stades de développement. Le sol est considéré comme un réservoir avec une réserve utile (RU) et une réserve facilement utilisable (RFU) par la plante.

La parcelle est découpée en placettes (figure 5) de taille réduites, organisés en transects perpendiculaires à l'axe d'avancement du canon. Le modèle de bilan hydrique calcule l'évolution du stock d'eau du sol de chacune des placettes. On peut ainsi évaluer le statut hydrique de la culture et calculer les pertes d'eau par drainage, ou plus précisément par migration au-delà de la zone racinaire.

Les simulations de scénarios IRRIPARC

Une « unité de simulation » va d'abord être décrite dans ce paragraphe. Les études régionales, évoquées dans le paragraphe suivant, comprennent plusieurs unités de simulation. Chaque unité de simulation est gérée à partir d'un scénario de simulation. Le scénario de simulation décrit le contexte de la simulation :

- **la culture irriguée** : l'espèce, le type variétal, la date de semis ou de plantation, tout ceci en mobilisant le modèle de développement des parties aériennes (stades de développement) et des racines (profondeurs racinaires) ;
- **le sol** : les humidités caractéristiques (H_{cc} et $H_{pf4.2}$) le taux de cailloux, la profondeur du sol avec ou sans obstacle, c'est-à-dire toutes les variables qui permettent de calculer la réserve utile (RU) et la réserve facilement utilisable du sol (RFU). Le modèle ne permet pas de prendre en compte les remontées capillaires ;
- **le climat**, soit :
 - les températures journalières pour définir les stades de développement de la culture,
 - la pluie et l'ETP journalière,
 - la vitesse et la direction du vent, par tranche horaire de 3 h, soit 8 tranches horaires par jour à : 0 h, 3 h, 6 h, 9 h, 12 h, 15 h, 18 h, 21 h TU (TU = heure universelle calculée à l'observatoire de Greenwich). Un poste météorologique et une série de donnée de 20 à 30 années sont nécessaires pour chaque unité de simulation ;

- **les règles d'irrigation** qui permettent de générer chaque année le calendrier d'irrigation ; ces règles font appels au modèle plante et sol ;

- **le matériel d'irrigation et les réglages**, c'est-à-dire la marque et le type de canon, avec l'angle de jet (généralement fixe). Il faut préciser également le diamètre de la buse, la pression, l'écartement entre passages d'enrouleur, l'orientation des passages par rapport aux vents dominants et l'angle de secteur ;

- **la parcelle, les horaires des positions**. Avec le modèle IRRIPARC, on peut prendre en compte des parcelles de formes variables et les découper en positions de canons enrouleurs. Les horaires de ces positions peuvent être gérées avec un pas de temps de 3 h. On peut donc simuler de manière très réaliste la répartition de l'eau sur une parcelle agricole.

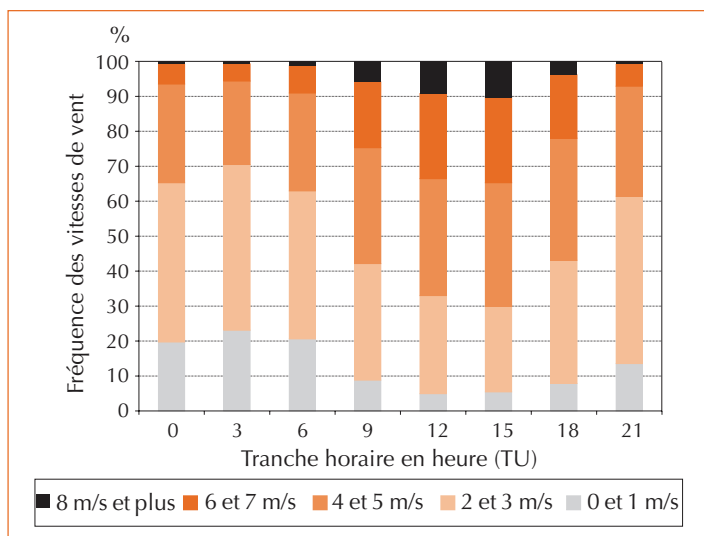
Étant donnée la taille de la combinatoire obtenue, il a fallu schématiser les scénarios pour diminuer le temps de calcul et la masse de données à gérer. Les bordures des parcelles n'ont pas été prises en compte (bien qu'elles soient la cause de pertes de rendements) ; les simulations ont été effectuées pour des tranches horaires dont les gammes de vitesses de vent sont similaires, et ces tranches horaires ont été juxtaposées. Par exemple, dans le cas de la figure 6, une série de simulations à 3h, 12 h et 9 h TU permettent de reproduire les conditions de vent observées au cours d'une journée : 3 h TU est représentative de la vitesse du vent à 0 h, 6 h et 21 h TU ; 12 h TU est représentative de la vitesse du vent à 15 h TU et 9 h TU est représentative de la vitesse du vent à 18 h TU. Cette méthode a été validée grâce à une étude spécifique sur plusieurs types de climats en France.

Les simulations sont effectuées sur des scénarios qui représentent des cas-types, et non pas des situations réelles.

Les études régionales

La recherche des réglages optimaux a été réalisée pour des régions agricoles sur lesquelles on pouvait disposer de chroniques de données météorologiques suffisantes. L'étude comporte alors 4 étapes :

- **l'élaboration des scénarios d'irrigation** en liaison avec les conseillers agricoles locaux ; description de la culture (type variétal, stades physiologiques), du sol, du poste météo, du matériel d'irrigation (marques/types de canon,



▲ Figure 6
– Répartition des vitesses de vents par tranche horaire (Poste Météo-France de St-Quentin, 1968-1997).

diamètre de buse, pressions, réglages à tester), des tranches horaires à simuler, des orientations par rapport aux vents dominants, des règles de conduite d'irrigation ;

– **les simulations et la synthèse** qui permettent de dégager un premier conseil sur les meilleurs choix et réglages ;

– **les tests terrain** qui permettent de mettre à l'épreuve le conseil dans des conditions réelles d'utilisation ;

– **la diffusion des résultats** par l'intermédiaire des conseillers agricoles, par la presse agricole ou par les distributeurs de matériels.

Ces études allient les contributions de cinq types d'intervenants :

- les agriculteurs, cibles privilégiés du conseil ;
- les promoteurs de la démarche ARVALIS-Institut du végétal et le Cemagref, qui proposent et garantissent la qualité scientifique et technique de la méthode employée ;

– les techniciens du conseil en irrigation qui participent à la mise au point du conseil, aux tests avec les agriculteurs et à la diffusion du conseil ;

– les techniciens de la distribution du matériel d'irrigation, partenaires actifs de la diffusion du conseil ;

– les fabricants de matériels souhaitant améliorer la compréhension du fonctionnement de leurs produits.

Étude de cas dans la région du Santerre

Le Santerre est une petite région de Picardie située dans le Nord de la France. Les sols de limons profonds et son climat océanique en font une région très fertile où l'agro-industrie est très développée. Les cultures de blé à haut rendement côtoient les cultures contractuelles telles que la betterave, les légumes de plein champ et la pomme de terre.

L'étude porte ici sur la pomme de terre, principale culture irriguée de cette région et particulièrement sur les variétés à cycle long comme la variété Russet Burbank, produite pour faire des frites. Le cycle cultural est décrit à la figure 7 et les caractéristiques du sol sont un limon profond, une profondeur d'enracinement de la pomme de terre égale à 80 cm et une réserve totale de 150 mm. Les simulations ont été effectuées à partir des données climatiques de St-Quentin de 1968 à 1997 (données Météo-France).

LES RÈGLES DE CONDUITE DE L'IRRIGATION :

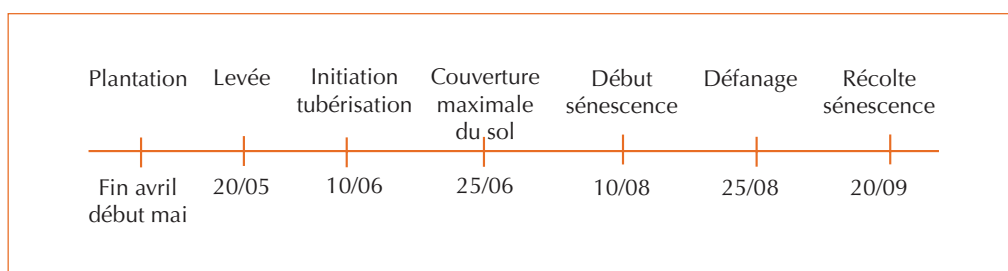
– déclenchement de l'irrigation : à partir du stade initiation de la tubérisation si le déficit en eau du sol atteint 40 mm ;

– retour des irrigations : dose 25 mm tous les 8 jours (3,1 mm/jour) ;

– en cas de pluie (P = pluviométrie en mm), interruption des irrigations pendant n jours, $n = P/3,5$;

– arrêt des irrigations au stade « sénescence du feuillage » à 50 %.

► Figure 7 – Cycle cultural indicatif de la variété Russet Burbank dans le Santerre.



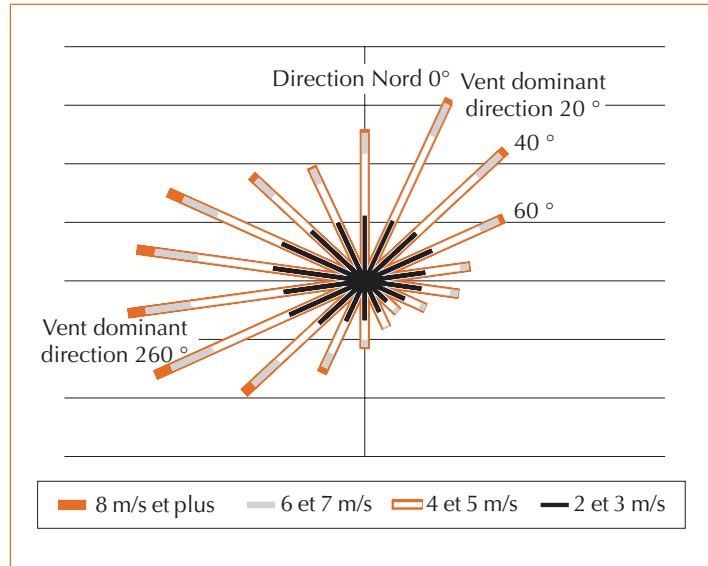
LE MATÉRIEL D'IRRIGATION ET LES RÉGLAGES TESTÉS

Les simulations ont été réalisées pour le canon Nelson SR150 avec un angle de tir de 24°, très représenté dans cette région. La gamme des réglages est indiquée dans le tableau 1. Les buses de diamètre 24 mm et 26 mm sont les plus utilisées : 24 mm en début de saison car moins agressive vis-à-vis des buttes puis 26 mm quand la plante couvre bien le sol. Pour chaque buse et pression, on a fait varier l'écartement entre 1,2 et 1,8 fois la portée sans vent, avec un pas de 3 m, et l'angle de secteur entre 180° et 260° avec un pas de 20°. Une cinquantaine de réglage ont donc été testés pour chaque combinaison buse-pression.

La région du Santerre est relativement ventée, comme le prouve la rose des vents représentée figure 8. Les vents dominants sont de secteur ouest (260° par rapport au nord) puis nord-nord-est (20° par rapport au nord). Une analyse des vitesses de vent par tranche horaire (figure 6) montre que les vitesses maximales sont atteintes à 12 h et 15 h TU et les vitesses minimales, la nuit de 21 h à 6 h TU.

Les tranches horaires représentatives qui ont été choisies pour effectuer les simulations sont présentées dans le tableau 2. Ce choix permet de limiter le nombre de simulations par la méthode évoquée précédemment.

Avant de constituer les scénarios, une première série de simulations a permis de tester différentes orientations de passage du canon par rapport aux



vents dominants. Cette pré-étude a montré que l'incidence de l'orientation était au maximum de 3 % sur le CUC. On a donc convenu de ne réaliser la totalité des simulations que pour une seule orientation à 20°.

▲ Figure 8 – Répartition fréquentielle des vitesses et directions du vent (St-Quentin, 1968-1997).

Ces simulations permettront de déterminer les réglages optimaux pour toutes les orientations, en signalant néanmoins aux agriculteurs que les performances des réglages sont généralement meilleures quand l'axe de passage du canon est perpendiculaire aux vents dominants.

▼ Tableau 1 – Matériel et gamme des réglages testés.

Type	Angle de tir	Buse (mm)	Pression (bar)	Débit (m ³ /h)	Portée sans vent (m)	Ecartements testés (m)	Angle de secteur (degrés)
SR150	24°	24 mm	5,5	45,6	51,5	63 m-93 m	180° à 260° avec un pas de 20°
			4,5	41,6	48	57 m-87 m	
		26 mm	5,5	54,9	53	63 m-96 m	
			4,5	49,6	50	60 m-90 m	
		28 mm	5,5	64,6	57,5	69 m-105 m	
			4,5	58,4	52	63 m-93 m	

Vitesse de vent	Tranches horaires	Tranches horaires retenues pour la simulation
Très faible	3 h TU	3 h TU
Faible	9 h et 18 h TU	9 h TU
Moyenne	21 h, 0 h et 6 h TU	21 h TU
Forte	12 h et 15 h TU	15 h TU

▲ Tableau 2 – Sélection des tranches horaires représentatives à simuler.

Par ailleurs, on a voulu tester les deux principales pratiques rencontrées dans la région, c'est-à-dire :

- les positions jour-nuit de durée proche de 24 h sur des parcelles longues (plus de 500 m), ou pour des exploitations peu équipées ;
- les positions nuit de durée proche de 12 h sur des parcelles plus courtes (300 m), ou des exploitations bien équipées, en évitant les périodes ventées : début de position 18 h TU et fin de position à 12 h TU.

Un exemple de tableau de réglage proposé aux agriculteurs à partir des simulations

Les éléments du tableau 3 peuvent être utilisés pour le réglage d'un canon existant ou pour effectuer le choix de la meilleure configuration avant achat. Pour chaque réglage :

- l'intensité croissante de couleur indique une qualité croissante de la répartition de l'eau ;
- le chiffre correspond à la valeur du CUC.

Pour la buse de 24 mm, le choix d'un écartement de 72 m est très pratiqué car les agriculteurs ont l'habitude de faire passer le canon sur les passages du pulvérisateur, appareil dont la largeur est souvent de 24 m. Enfin l'angle de secteur de 220° est couramment pratiqué.

La lecture des tableaux montre qu'il vaut mieux opter pour une irrigation de nuit et une pression de 5,5 bars, en conservant un écartement de 72 m et un angle de secteur de 220°.

On constate d'ailleurs une assez grande souplesse de réglage de l'angle de secteur pour cet écartement : de 200° à 260°, les performances varient

peu, ce qui permet de s'adapter facilement aux bordures de parcelles.

À 4,5 bars, le réglage à 72 m et 220° donne encore de bons résultats en « irrigation de nuit », en évitant donc les heures les plus ventées de la journée.

Si pour des raisons d'exiguïté de parcelle on veut réduire les écartements entre deux passages de canon, il faudra alors réduire l'angle de secteur pour conserver les performances initiales.

Enfin en « irrigation jour-nuit » il faudra réduire les écartements à 63 m et l'angle de secteur à 200° pour obtenir des performances similaires.

Ainsi l'agriculteur peut-il, grâce à ces tableaux, trouver un réglage adapté à ses contraintes, les adaptations pouvant porter sur le diamètre de la buse, la pression d'utilisation, l'écartement entre passage et l'angle de secteur. Pour des cultures comme la pomme de terre, très délicates à irriguer, ces réglages sont d'une importance particulière.

Les tests sur le terrain

Il est important de tester la faisabilité de ces réglages par les agriculteurs. Aussi les partenaires régionaux des études IRRIPARC ont-ils proposé à quelques agriculteurs de réaliser un audit de l'utilisation des enrouleurs et d'appliquer les conseils IRRIPARC.

C'est ainsi que le GITEP a proposé à Monsieur X, agriculteur dans la Somme, un audit sur l'utilisation de son enrouleur (figure 9). Monsieur X irrigue chaque année 20 hectares de pommes de terre avec un enrouleur BAUER Ø 110 mm à régulation électronique avec un flexible de 500 m. Il est équipé d'un canon NELSON SR150 24° avec des buses de 24 mm et 26 mm suivant les besoins.

La figure 9 présente l'organisation du chantier d'irrigation.

La majorité des positions a une longueur de 480 à 500 m avec une durée moyenne de 9 à 12 h. Quelques positions courtes ont lieu pendant le jour, donc pendant les heures ventées. La durée du tour d'eau sur le bloc d'irrigation est de 5 jours. La dose objectif est de 15 mm. On a donc un objectif d'apport de 3 mm/j, ce qui correspond bien aux besoins moyens de la culture. Le taux moyen d'utilisation de l'enrouleur est de 44 % : 10 h 30 pour 24 h. La vitesse d'avancement du canon est de 44,3 m/h.

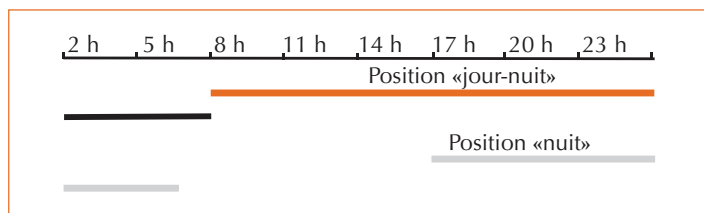
Buse 24 mm – pression 4,5 bars												
Irrigation jour et nuit		Écartement entre passage du canon en mètres										
		57	60	63	66	69	72	75	78	81	84	87
Angles de secteur en degrés	180	81	81	79	77	74	70	66	62	58	54	50
	200	80	80	80	79	77	75	71	67	63	59	55
	220	79	79	79	79	78	76	74	71	66	62	58
	240	75	77	78	78	78	77	75	72	68	64	59
	260	74	75	77	77	78	76	74	71	68	63	59

Buse 24 mm – pression 4,5 bars												
Irrigation jour et nuit		Écartement entre passage du canon en mètres										
		57	60	63	66	69	72	75	78	81	84	87
Angles de secteur en degrés	180	84	84	82	80	78	74	70	66	61	57	53
	200	81	82	83	82	81	78	75	71	67	63	59
	220	78	80	81	81	81	80	78	74	70	66	62
	240	76	78	79	80	81	80	78	75	72	68	63
	260	74	76	78	79	80	79	78	75	71	67	62

Buse 24 mm – pression 4,5 bars												
Irrigation jour et nuit		Écartement entre passage du canon en mètres										
		63	66	69	72	75	78	81	84	87	90	93
Angles de secteur en degrés	180	83	82	80	77	74	70	66	62	58	54	51
	200	82	82	82	80	78	75	74	74	74	74	74
	220	80	81	81	81	80	78	75	71	68	64	59
	240	78	80	80	81	80	79	76	73	69	65	61
	260	77	78	79	80	79	78	76	72	69	65	60

Buse 24 mm – pression 4,5 bars												
Irrigation jour et nuit		Écartement entre passage du canon en mètres										
		63	66	69	72	75	78	81	84	87	90	93
Angles de secteur en degrés	180	85	85	83	80	77	74	70	66	62	58	54
	200	84	84	84	83	81	78	75	71	67	63	59
	220	81	82	83	83	82	81	78	75	71	67	63
	240	78	80	82	82	82	81	79	76	73	68	64
	260	77	79	81	82	82	81	79	76	72	68	63

▲ Tableau 3– Réglage pour le canon Nelson SR150 24° et buse de 24 mm dans le Santerre.



▲ Figure 9 – Organisation du chantier d'irrigation.

Après audit, il a été décidé de privilégier les irrigations de nuit pour bénéficier des périodes de vents faibles, et donc permettre une meilleure répartition de l'eau et une moindre agressivité par rapport aux buttes et à la végétation. La buse 26 mm est utilisée à la pression de 5,5 bars pour les mêmes raisons et l'écartement proposé est de 78 m d'après les tableaux de réglage IRRIPARC. La dose d'irrigation de 15 mm est augmentée à 20 mm, voire à 25 mm en période sèche. L'angle de secteur est réduit en moyenne de 20° pour éviter un surdosage dans les zones de recoupement des jets, souvent constaté en irrigation de nuit.

La majorité des positions a une durée moyenne de 12 à 15 h. La durée du tour d'eau est de 7 jours : elle est donc allongée, mais le rythme dose-fréquence est de 2,9 à 3,6 mm/j, ce qui est conforme aux préconisations. Le taux d'utilisation de l'enrouleur 47 % reste faible. L'agriculteur a accepté d'appliquer le conseil IRRIPARC : il constate une amélioration de l'organisation et considère l'arrosage plus efficace, avec moins de risque d'effets négatifs sur les pommes de terre et les buttes.

La répartition de l'eau d'irrigation a été mesurée au cours de trois tours d'eau.

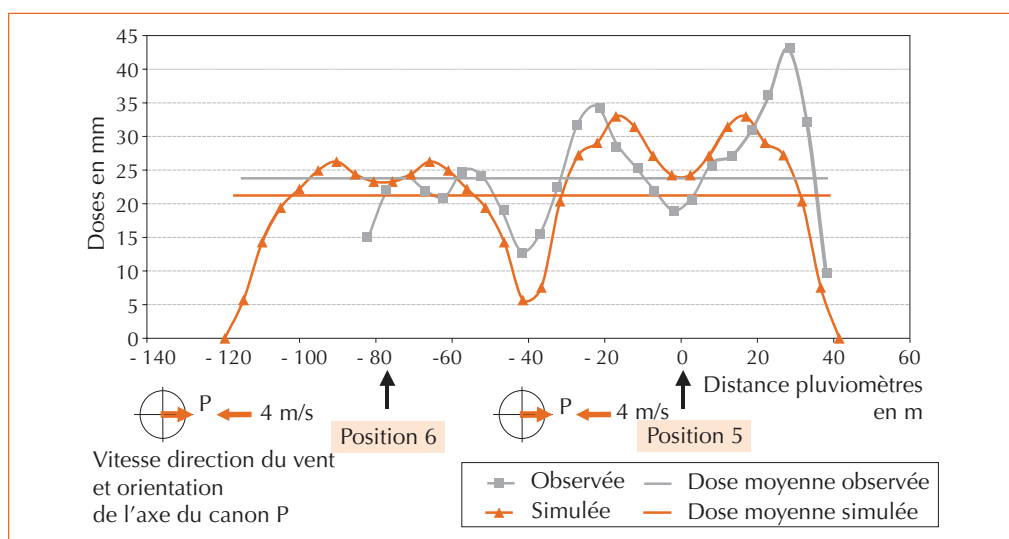
La répartition obtenue lors du 3^e tour d'eau sur les positions 5 et 6 avec un vent de face de 4 m/s orienté à l'est est représentée sur la figure 10. La simulation IRRIPARC est proche de la réalité. Les variations observées sont dues à la variabilité du vent au cours du passage sur le point de mesure, variabilité qui ne peut pas être prise en compte puisque l'on travaille avec des vitesses et direction de vent moyennes

La conclusion de l'ensemble des 8 tests a été de constater que l'application des réglages IRRIPARC permettait d'améliorer l'organisation en général et souvent la répartition de l'eau d'irrigation. Par ailleurs, les agriculteurs recevaient plutôt bien le conseil et étaient décidés à le mettre en pratique.

La diffusion des conseils de réglages

La stratégie de diffusion a été de faire connaître les résultats au niveau des responsables professionnels et des techniciens de la filière pomme de terre, relais de diffusion, et au niveau des agriculteurs producteurs de pommes de terre, cible principale de la diffusion. Par la suite, des fiches de réglage par modèle de canon et par petites régions ont été diffusées aux partenaires régionaux du conseil et de la distribution : ils ont en charge de diffuser ces fiches auprès de leurs clients.

► Figure 10 – Répartition de l'eau d'irrigation simulée et mesurée lors du troisième tour d'eau chez Mr X (02 au 04/07/01) – GITEP.



Par ailleurs, des articles de journaux nationaux et régionaux ont fait la promotion de l'opération IRRIPARC et des fiches de réglage.

Les réunions réalisées jusqu'à présent avec les agriculteurs montrent qu'ils sont généralement motivés pour appliquer au moins en partie les réglages.

Perspectives

Les études régionales ont donc été réalisées dans 8 petites régions agricoles. Elles ont montré la réceptivité des agriculteurs vis-à-vis de la maîtrise du matériel d'irrigation. Le modèle intégré IRRIPARC est opérationnel et pourrait être diffusé plus largement vers d'autres pays utilisateurs dans le cadre d'opération de coopération.

Il nous faut étudier maintenant comment généraliser les conseils IRRIPARC à toutes les régions

d'irrigation. Une voie possible est de réaliser une typologie et une cartographie des roses des vents, puis d'élaborer un conseil de réglage par canon et type de rose des vents.

Une étape ultérieure serait de formuler des réglages journaliers, adaptés à des grands types de vitesse et direction du vent. L'utilisation des prévisions météorologiques permettrait alors à l'utilisateur de régler son matériel en fonction du vent prévu.

Enfin une collaboration pourrait être envisagée avec des fabricants de canon pour réaliser un canon dont certains réglages (angle de jet, angle de secteur au moins) pourraient s'adapter aux conditions de vent moyennant sa connexion avec des capteurs de vitesse et direction de vent. □

Résumé

L'irrigation par canon-enrouleur est le système d'irrigation par aspersion le plus répandu en France, mais la qualité de l'arrosage reste souvent médiocre. En particulier, la sensibilité au vent perturbe fortement la répartition de l'eau et accroît localement l'intensité pluviométrique. Un modèle semi-empirique de répartition des apports d'eau en conditions ventées a été mis au point au Cemagref. Des essais en conditions réelles ont été réalisés avec la collaboration d'Arvalis-Institut du végétal, ce qui a permis de calibrer le modèle. L'intégration de ce modèle de répartition avec un modèle de conduite de l'irrigation permet de simuler la répartition spatiale de l'eau sur une parcelle cultivée et sur plusieurs campagnes d'irrigation. On a ainsi pu réaliser un outil qui permet de faire un diagnostic sur les pratiques des irrigants, mais aussi de tester des scénarios améliorants les performances de l'apport d'eau. Cet outil a pu être utilisé dans différentes régions pour proposer des réglages optimaux en fonction des conditions climatiques. Un exemple est donné concernant la pomme de terre en Picardie.

Abstract

Irrigation by hose reel gun is the most popular irrigation method in France, but water application quality remains often poor. Specially, the sensitivity to wind strongly affects water distribution and increases local rainfall intensity. A semi-empirical model was developed in Cemagref, calculating spatial water distribution accounting for wind. Tests were carried out in field conditions in co-operation with Arvalis-Institute, to calibrate the model. This model was integrated with a crop model and an irrigation scheduling model allowing to simulate water distribution in an agricultural plot over several irrigation seasons. This simulation tool has been used to diagnose farmers practices and to evaluate scenarios improving water application performance. This tool was used in various areas to propose optimal settings according to climatic conditions. An example is given on potatoes in Picardie (Northern France).

Bibliographie

- AL-NAEEM, M., 1993, A hose reel raingun irrigation system computer simulation to predict water distribution and crop yield: optimising trajectory angle, sector angle, sector position and lane spacing in different wind conditions, PhD thesis, Silsoe college, Cranfield University (UK).
- AUGIER, P., 1996, *Contribution à l'étude et à la modélisation mécaniste-statistique de la distribution spatiale des apports d'eau sous un canon d'irrigation : application de la méthode à la caractérisation des effets du vent sur l'uniformité d'arrosage*, Montpellier, ENGREF, 248 p.
- CHRISTIANSEN, I., 1942, Irrigation by Sprinkling, *Bull. n° 670, California Agricultural Experiment Station*, California.
- DEUMIER, J.-M. ; LACROIX, B. ; MANGIN, M. ; VALLADE, S. ; MOLLE, B. ; GRANIER, J., IRRIPARC Part2: Hose reel gun settings according to wind conditions – Utilisation of the IRRIPARC methodology in 3 regions.
- ELIOTT, R.-L. ; NELSON, J.-D. ; LOFTIS, J.-C. ; HART, W.-E., 1980, Comparison of sprinkler uniformity models, *ASCE Journal of irrigation and drainage division*, December 1980, p. 321-330.
- GRANIER, J., MOLLE, B., FOLTON, C., (Cemagref), DEUMIER J.M. (Arvalis), 2003, *Modelisation of water spatial distribution under a sprinkler in windy conditions*, ICID Meeting Montpellier, France.
- GROSE, D.-J. ; PARKIN, C.-S. ; WEATHERHEAD, E.-K. ,1998, Modelling a multi-phase plume in a cross flow – an agricultural application, in *Proceedings of the 14th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, p 487-492, Manchester, July 1998, UMIST, Manchester.
- HAN, S. ; EVANS, R.-G. ; KROEGER, M.-W., 1994, Sprinkler distribution patterns in windy conditions, *Transactions of the ASAE*, vol. 37 (5), p. 1481-1489.
- HEERMAN, D.-F. ; DUKE, H.-R. ; SERAFIM, A.-M. ; DAWSON, L.-J., 1992, Distribution functions to represent center pivot water distribution, *Transactions of the ASAE*, p. 1465-1472.
- KARMELI, D., Estimating sprinkler distribution patterns using linear regression, 1978, *Transactions of the ASAE*, p. 682-685.
- KOHL, R.-A. ; DE BOER, D.-W. ; EVENSON, P.-D., 1985, Kinetic Energy of Low Pressure Spray Sprinklers, *Transactions of the ASAE*, vol. 28, n° 5, p. 1526-1529.
- KOHL, K.-D ; KOHL, R.-A ; DEBOER, D.-W., 1987, Measurement of low pressure sprinkler evaporation loss, *Trans. ASAE*, 30 (4), p. 1071-1074.
- LE GAT, Y. ; MOLLE, B., 2000, Water application simulation under pivot sprinklers, Part1: Theoretical ground, *Journal of Irrigation and Drainage engineering*, vol. 126(6), p. 343-348.
- MOLLE, B. ; GRANIER, J. ; BAUDEQUIN, D. ; ZANOLIN, A., 1999, Management of sprinkler irrigation spatial variability: consequences on crop yield, water amounts used and nitrates leaching, ICID Congress proceeding, Granada, Spain.
- RICHARDS, P.-J. ; WEATHERHEAD, E.-K., 1993, Prediction of Raingun Application Patterns in Windy Conditions, *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 54(4), p. 281-291.
- SALLES, C., 1995, Analyse microphysique de la pluie au sol : mesure par Spectro-Pluviomètre Optique et méthodes statistiques d'analyse spectrale et de simulation numérique, thèse de l'université Joseph Fourier, Grenoble.

SEGINER, I. ; KANTZ, D. ; DOV NIR, D, 1991, The distortion by wind of the distribution patterns of single sprinkler, *Agricultural Water Management*, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, vol. 19, p. 341-359.

SEGINER ; KANTZ, D. ; NIR, D., 1991, The distortion by wind of the distribution patterns of single sprinklers, *Agricultural water management*, vol. 19, p. 341-359.

SOLOMON, K.-H. ; BEZDEK, 1980, Characterizing sprinkler distribution patterns with a clustering algorithm, *Transactions of the ASAE*, p. 899-906.

VON BERNUTH ; GILLEY, 1984, Sprinkler droplet size distribution estimation from single leg test data, *Transactions of the ASAE*, vol. 27, n° 5, p. 1435-1441.

VORIES, E.-D., VON BERNUTH, R.-D., MICKELSON, R.-H., 1987, Simulating sprinkler performance in wind, *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 113 (1), p. 119-130.