



Revue semestrielle – Université Ferhat Abbas Sétif 1

REVUE AGRICULTURE



Évaluation Expérimentale de l'Irrigation par Aspersion Non Mécanisée dans le Contexte Tunisien

Experimental Evaluation of Non-Mechanized Sprinkler Irrigation in the Tunisian Context

Youssef M'SADAK^{1*}, Afoua MANAI¹, Nahed EL JANDOUBI¹ et Mahmoud Elies HAMZA²

⁽¹⁾ Institut Supérieur Agronomique - BP 47, 4042 Chott-Mariem, Université de Sousse, Tunisie

⁽²⁾ Institut National Agronomique - 43, Avenue Charles Nicolle, 1082 Tunis- Mahrajène, Université de Carthage, Tunisie

^(1*) E-mail : msadak.youssef@yahoo.fr

ARTICLE INFO

Reçu : 27-02-2017

Accepté : 11-07-2017

Keywords:

Sprinkling Non-mechanized, Sprinklers, Tests of uniformity, Wind speed, Working pressure.

Mots clés :

Aspersion non mécanisée ; Asperseurs ; Tests d'uniformité ; Vitesse du vent ; Pression de fonctionnement.

ABSTRACT

The research carried out in this work is a contribution to the improvement of water management for irrigation, by making a diagnosis of the performance of a non-mechanized sprinkling irrigation system at the parcel. It involved the operation of four identical sprinklers on a bare field in a private farm located in the delegation of Bourj El Amri, governorate of Manouba (Northern Tunisia) and to assess the quality of the irrigation carried out. The operating diagnosis made it possible to establish experimentally the pluviometric curves of the four sprinklers by collecting water in rain gauges. These curves reflect the dose delivered over the entire irrigated area. The uniformity tests have covered a range of prevailing wind speeds of 1 to 6 m/s and a pressure range of 1.6 to 2.0 bars. The operating balance showed that the sprinklers are in good working order, given the correspondence between the theoretical and practical buses. The study also detected a sensitivity of the classic spray to the wind. The evaluation of the effect of the operating pressure showed that with a low pressure, the drops of water are large, while with a slightly higher pressure, the range of the jet is greater and the drops are finer, whereby wind transport is favored, and consequently a pressure regulation is essential.

RÉSUMÉ

L'investigation menée dans ce travail constitue une contribution à l'amélioration de la gestion de l'eau utilisée pour l'irrigation, en établissant un diagnostic de la performance d'un système d'irrigation par aspersion non mécanisée dite classique, à l'échelle de la parcelle. Elle a concerné le fonctionnement au champ de quatre asperseurs identiques sur un terrain nu chez une exploitation privée, située dans la délégation de Bourj El Amri, gouvernorat de Manouba (Nord de la Tunisie) et d'évaluer la qualité de l'irrigation réalisée. Le diagnostic de fonctionnement a permis d'établir expérimentalement les courbes pluviométriques des quatre asperseurs en collectant l'eau dans des pluviomètres. Ces courbes traduisent la dose apportée sur toute la surface irriguée. Les tests d'uniformité ont couvert une gamme de vitesses du vent dominant de 1 à 6 m/s et une gamme de pressions de 1,6 à 2,0 bars. Le bilan de fonctionnement a montré que les asperseurs sont en bon état de fonctionnement, vu la correspondance entre débits de busage théorique et pratique. L'étude a décelé également une sensibilité de l'aspersion classique au vent. L'évaluation de l'effet de la pression de service a montré qu'avec une pression faible, les gouttes d'eau sont grosses, alors qu'avec une pression un peu plus élevée, la portée du jet est plus importante et les gouttes sont plus fines, d'où le transport par le vent est favorisé, et par conséquent, une régulation de la pression est indispensable.

1. INTRODUCTION

Le développement de l'agriculture irriguée était et continue à être indispensable pour atteindre les objectifs des stratégies alimentaires à long terme (Hanafi, 2011). L'agriculture irriguée est confrontée à de nombreux défis en termes de production et de rentabilité (Jamin et al., 2011 ; Kuper, 2011 ; Hanafi et al., 2015). L'irrigation est considérée comme une des pratiques culturales que l'agriculteur est amené à gérer (Sabatier et al., 1991). Elle est depuis longtemps une composante essentielle de l'agriculture. Les plus grands progrès en matière agricole ont été obtenus par l'irrigation (Renoux, 2011). Cette composante a pour vocation principale de favoriser une activité agricole stable en l'affranchissant, au moins partiellement, des aléas climatiques. À l'échelle mondiale, elle a fourni 30% de toute la production agricole (Hillel, 2000). Cependant elle est la principale consommatrice d'eau du secteur agricole (Katerjia et al., 2002). En effet, cette consommation, en Tunisie, a représenté 83,4% du total des prélèvements. L'eau est consommée en majeure partie dans la région du Nord du pays, où sont situées 56,7% des superficies irriguées (MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, 1994). En Europe, l'agriculture a représenté 24% de l'utilisation de l'eau (EEA, 2010). L'importance des besoins en eau pour le secteur agricole et la nécessité de réaliser l'équilibre production et économie d'eau, imposent la recherche des techniques d'irrigation plus efficaces, qui garantissent la fourniture de l'eau à l'ensemble du terrain de manière uniforme, de sorte que chaque plante ait le volume d'eau dont elle a besoin, ni trop, ni trop peu (EIJKELKAMP AGRISearch EQUIPMENT, sd).

Suivant la manière dont l'eau est amenée sur le terrain puis y est distribuée, on distingue habituellement trois grands modes d'arrosage : l'irrigation gravitaire, l'irrigation localisée et l'aspersion scindée en plusieurs systèmes (Dunglas, 2014). L'irrigation par aspersion qui consiste à fournir l'eau nécessaire aux cultures sous une forme analogue à la pluie naturelle (Louis Jean, 2009) et permet d'économiser l'eau dans une proportion allant jusqu'à 50% par rapport à l'arrosage par ruissellement (Olier et Poirée, 1983), est largement répandue, en Tunisie, dans plusieurs régions du Nord et du Centre du pays. Elle ne cesse de se développer surtout avec les encouragements financiers pour économiser l'eau d'irrigation (Yacoubi et al., 2005). Cette technique est applicable à tous les types de culture. Les sols ne sont pas saturés, ce qui limite les pertes et évite les phénomènes d'asphyxie. L'eau arrive naturellement, comme avec la pluie. Le système peut aussi servir à la lutte antigel (Dunglas, 2014).

Les systèmes d'irrigation, par aspersion non mécanisée dite classique, sont ceux dont le déplacement est réalisé manuellement. Ils comportent toujours des organes d'arrosage, appelés asperseurs, montés sur des tuyauteries. Ce type d'aspersion peut être utilisé pour l'irrigation de petites et moyennes exploitations (2 à 10 ha) avec un faible débit de 2 à 5 l/s (Lamrani et al., 1992). Il nécessite des conditions de pression moyenne à forte : de 3 à 6 bars à la buse de l'asperseur (Anonyme, sd). Dans ce cadre, une étude a été entreprise, visant l'évaluation expérimentale de l'irrigation par aspersion non mécanisée. Les essais ont été conduits sur un terrain nu pour éviter la perturbation des cultures, chez une exploitation privée dans le Nord Tunisien. Les paramètres pertinents retenus sont essentiellement la pression de fonctionnement (ou de service) et la vitesse du vent. Plusieurs combinaisons entre ces facteurs ont été essayées.

2. Matériel et Méthodes

Présentation de la zone d'étude

L'étude expérimentale a été accomplie au sein d'une exploitation privée, située dans la délégation de Bourj El Amri, gouvernorat de Manouba, Nord de la Tunisie (figure 1).

Le climat du gouvernorat de Manouba est méditerranéen appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride supérieur. Les vents les plus fréquents soufflent des secteurs septentrionaux surtout de l'Ouest au Nord-Ouest. Les précipitations, fréquentes pendant la période hivernale, ne sont pas toujours répandues. De même, les vents qui soufflent du Sud-Est au Sud ne sont pas négligeables et peuvent devenir importants et actifs surtout au printemps et en été. Ces vents sont responsables des fortes élévations de températures pendant la période estivale. (MINISTÈRE DU TRANSPORT ET DE L'ÉQUIPEMENT, 2011).

Les relevés à Manouba de température journalière moyenne et de pluviométrie annuelle moyenne sont respectivement de 18,7 °C et de 450 mm.

Le dynamisme économique s'y distingue par l'implantation des activités agricoles et le savoir-faire des agriculteurs de la région, conjugués à un potentiel en irrigué d'environ 26 milles ha (APII, 2015).

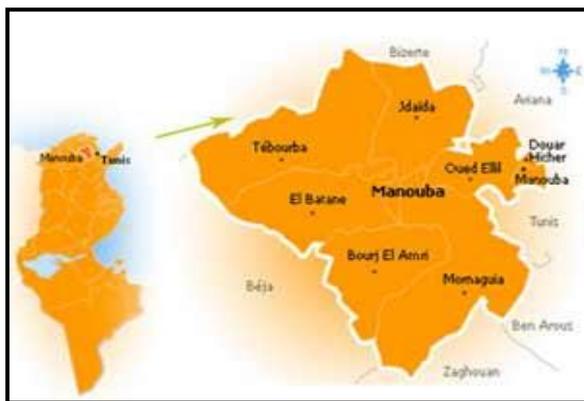


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

Caractérisation technique des asperseurs testés

Les essais ont été conduits sur un matériel neuf (au cours de sa première campagne d'emploi). L'investigation a été réalisée sur quatre asperseurs de même marque « BAUER » (figure 2) dont les données techniques sont éclairées dans le tableau 1.

Au niveau de l'asperseur, pièce maîtresse du dispositif d'aspersion, une buse crée un jet et l'oriente vers la cuillère (figure 3). Le bras mobile est activé par le jet. Le ressort de rappel provoque le retour du bras mobile et assure ainsi la rotation de l'asperseur (Anonyme, sd).



Figure 2 : Asperseur BAUER B 62

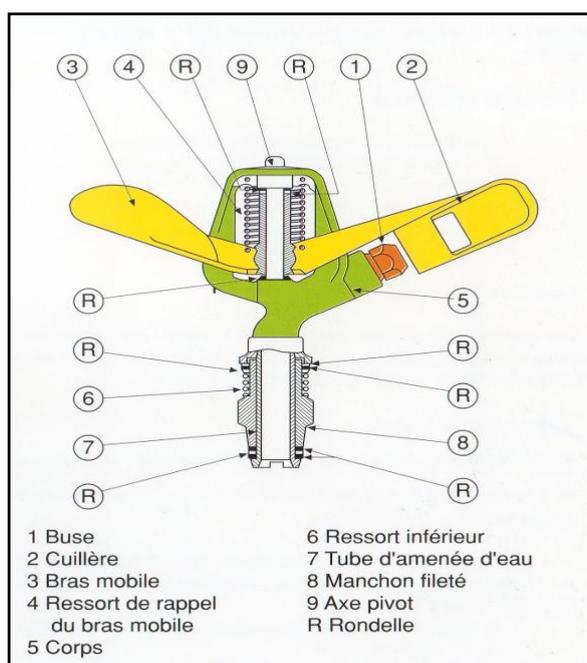


Figure 3 : Schéma général d'un asperseur (Anonyme, sd)

Tableau 1 : Caractéristiques techniques des asperseurs étudiés (BAUER, sd)

Marque des asperseurs	BAUER
Type	B 62
Diamètre de buse (mm)	4
Pression de service (bars)	---
Débit (m ³ /h)	---
Hauteur (cm)	70
Fixe/Mobile	Mobile
Marque des rampes	BAUER
Diamètre de la rampe principale (mm)	108
Diamètre de la rampe secondaire (mm)	72
Écartement entre lignes (m)	12
Écartement entre asperseurs (m)	12
Longueur des flexibles (m)	---

Matériel de mesure mis en œuvre

Les essais ont été entrepris dans des conditions conformément à la Norme ISO 11545 (ISO, 2001) et aux recommandations expérimentales du CEMAGREF, tout en faisant aussi appel à la Norme ISO 7749 (ISO, 1995), relative au calcul de la pluviométrie moyenne. Les différents instruments de mesure employés lors des essais sont présentés dans le tableau 2.

Lors des essais, l'anémomètre a été installé à une hauteur de 2 m dans un rayon de 200 m du site d'étude. La vitesse du vent est la moyenne d'une mesure durant 30 s, et sa direction est indiquée chaque 10 mn.

Les pluviomètres utilisés sont de diamètre 18 cm et d'une hauteur de 17 cm. En outre, pour simplifier la lecture des résultats, deux fiches modèles ont été établis. Ces fiches inspirées à partir d'autres fiches de contrôle (ISO 11545, ...) sont divisées en trois parties :

- Identification de l'appareil ;
- Conditions climatiques ;
- Résultats du contrôle.

Tableau 2 : Instruments de mesure utilisés et rôles correspondants

Matériel de mesure	Fonction
Pluviomètre	Recueillir le volume d'eau délivré par l'asperseur
Anémomètre	Mesurer la vitesse du vent
Manomètre à lecture directe	Déterminer la valeur exacte de la pression de service
Éprouvette	Mesurer le volume d'eau recueilli
Décamètre	Ajuster l'emplacement des pluviomètres
Chronomètre	Mesurer le temps
Boussole	Déterminer la direction du vent
Seau	Mesurer le volume d'eau donné par l'asperseur

Paramètres mesurés**Débit d'alimentation de l'asperseur**

Le débit est estimé à l'aide d'un compteur en mesurant sur une période le volume d'eau qui passe à travers la bouche d'alimentation. Pour l'évaluer, on a mesuré le temps nécessaire pour véhiculer un volume de 1 m³.

Le débit peut être calculé par la formule suivante :

$$Q_m \text{ (m}^3\text{/h)} = V/T$$

Avec Q_m et V désignent respectivement le débit moyen et le volume d'eau recueilli pendant la durée T .

Débit de l'asperseur

Le débit q est estimé à l'aide d'un seau qui permet de collecter un volume d'eau v délivré de l'organe d'arrosage pendant un temps fixe t . La formule appliquée est la suivante :

$$q \text{ (l/s)} = v/t$$

Pression de fonctionnement de l'asperseur

La pression de fonctionnement, qui correspond à un certain degré d'ouverture de la vanne en tête est mesurée à l'aide d'un manomètre monté à l'entrée. On peut déterminer aussi la pression sur l'asperseur ou directement à la sortie de la buse au moyen d'un Pitot-tube. Cette tâche nécessite un soin particulier puisque l'embout du Pitot ne doit pas être enfoncé à l'intérieur de la buse pour éviter de modifier le débit et la pression.

Dans certains cas, une pression d'entrée trop forte, ou une dénivelée trop importante nécessitera de monter des régulateurs de pression sur les arroseurs (Gabriel et Nedellec, 2012).

Pluviométrie délivrée par les asperseurs

La mesure de la pluviométrie a été effectuée, en faisant varier deux paramètres, à savoir : la vitesse du vent et la pression de fonctionnement qui ont une grande influence sur l'uniformité d'arrosage.

Les récipients utilisés ont été disposés selon treize lignes au niveau de la zone de recouvrement des quatre asperseurs considérés. Les écartements ont été choisis (1 m x 1 m) comme il est indiqué sur la figure 4.

La pluviométrie moyenne P a été calculée par la formule suivante :

$$P = 10 V/S$$

Avec :

P : Pluviométrie (mm)

V : Volume d'eau collecté par récipient (cm³)

S : Section supérieure du récipient (cm³)

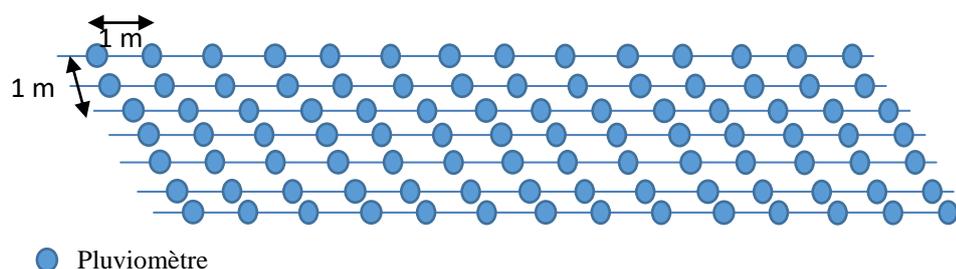


Figure 4 : Disposition expérimentale des pluviomètres dans la zone de recouvrement des asperseurs testés

Coefficient d'uniformité

Le programme d'évaluation d'un système d'irrigation sous pression (par aspersion ou par goutte à goutte) repose principalement sur la détermination d'un indice de performance : l'uniformité de la distribution d'eau (Nadon, 2016) ou efficacité d'uniformité.

L'efficacité d'uniformité décrit l'homogénéité spatiale de la dose d'irrigation par rapport à la surface irriguée. Cette homogénéité dépend de nombreux facteurs liés à la technique d'irrigation, la topographie, la perméabilité du sol, et les caractéristiques hydrauliques (pression, débit, ...) du système d'irrigation (Howell, 2003). L'uniformité au niveau de la zone du recouvrement des quatre asperseurs mis en œuvre a été appréciée par la formule de Christiansen (1942), qui était le premier à étudier l'uniformité de distribution au moyen d'un coefficient d'uniformité, ayant l'expression ci-après.

$$Cu = 100 \left[1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|V_i - V_m|}{S_i} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|V_i|}{S_i} \right)} \right] \right]$$

Avec :

Cu : Coefficient d'uniformité (%)

V_i : Volume d'eau récolté dans le récipient i (cm³)

V_m : Volume moyen de l'eau dans les n récipients (cm³)

S_i : Section supérieure du récipient i (cm²)

3. Résultats et discussion

Appréciation générale de l'arrosage

En se référant à la figure 5 et à partir de la comparaison entre les deux courbes de la répartition des débits des buses sur toute la longueur de la rampe, on peut dire que les quatre asperseurs étudiés sont en bon état de fonctionnement, vu que l'écart entre les deux courbes est très faible et n'est amplement dû qu'aux pertes d'eau occasionnées lors des mesures.

La répartition pluviométrique est illustrée par la figure 6. On remarque une forte variabilité de la pluviométrie. Elle est assez élevée sous la partie centrale du recouvrement des quatre asperseurs en question. Ce résultat est dû à l'allure parabolique de la courbe du jet de l'asperseur. Généralement, la portion de terrain, toujours en surdosage, favorise les pertes d'eau par infiltration profonde et par évaporation. En contrepartie, une diminution du surdosage est remarquable à la périphérie de la zone considérée.

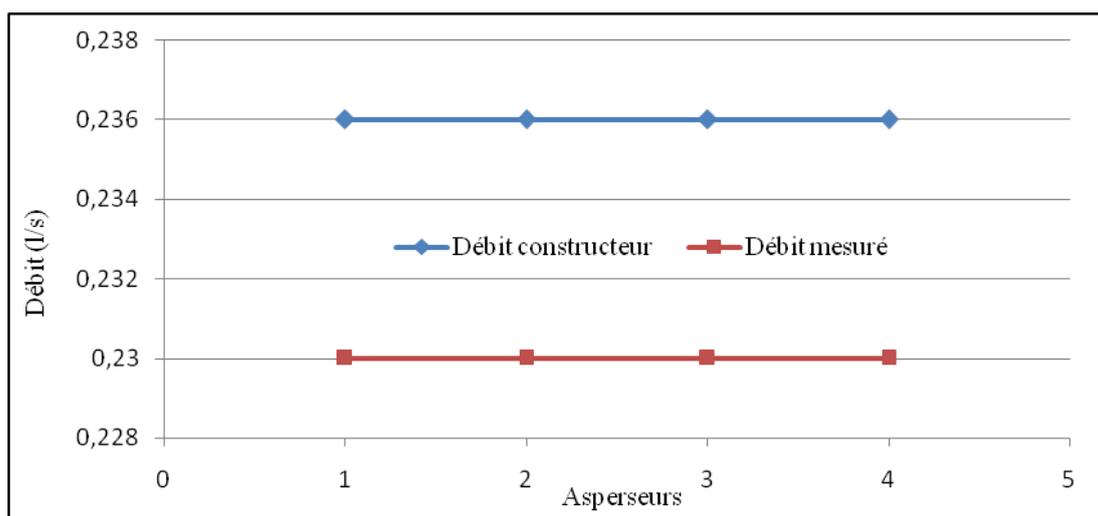


Figure 5 : Conformité entre débits de busage théorique et pratique des asperseurs

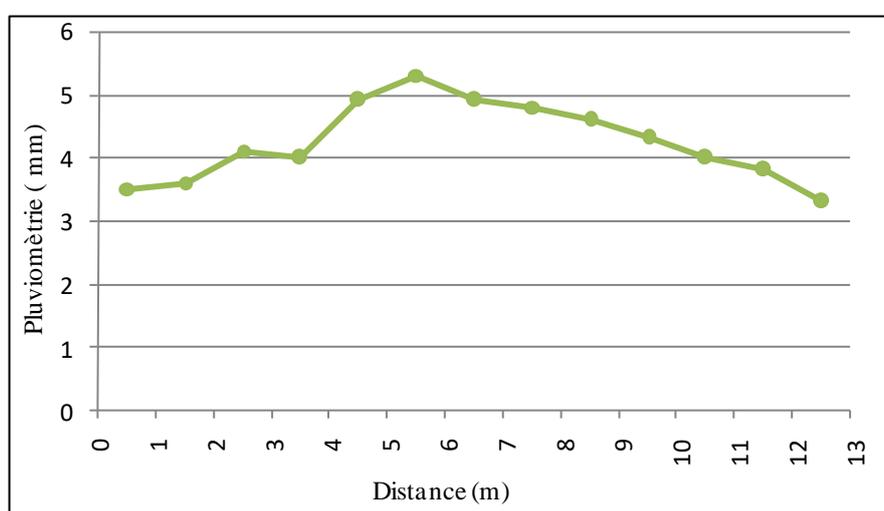


Figure 6 : Répartition pluviométrique de l'irrigation par aspersion classique avec pression constante (2 bars) et sous vent faible

Évaluation de la qualité de l'arrosage

Le Coefficient d'uniformité (Cu) permet de caractériser la qualité de l'application d'eau, sachant que, pour une dose requise donnée, l'uniformité de son application est fortement conditionnée par la vitesse du vent et le système d'irrigation utilisé (Hanafi, 2011).

D'après Pereira (1999), l'uniformité de distribution, en irrigation par aspersion, dépend : de la pression de service, de la variation de cette pression durant l'irrigation, de l'espacement entre les asperseurs, de la nature des buses, des caractéristiques de l'asperseur et de la vitesse du vent. Dans ce qui suit, l'incidence du vent et de la pression de service est discutée de point de vue qualité d'application de l'eau.

Effet du vent

L'observation de la variation de la pluviométrie au niveau de la zone testée (figure 7) avec deux vitesses de vent et une pression constante (2 bars) montre une déformation de la répartition pluviométrique dans l'espace selon la direction du vent et sa vitesse. D'une façon générale, on observe une forte augmentation de pluviométrie et une diminution de la surface mouillée. La répartition spatiale de l'eau est fortement déformée, avec une déviation des apports selon la direction du vent, présentant des zones sous-dosées et des autres sur-dosées. La figure 8 révèle qu'avec une vitesse de vent de l'ordre de 1,8 m/s, le CU se dégrade fortement par rapport à celui sous vent d'environ 3,6 m/s, il passe de 72,9% à 63,0%, ce qui implique une détérioration de l'homogénéité de la répartition pluviométrique. D'après Clément et Galand (1979), une valeur de CU de 75%

correspond à un système d'aspersion de performance moyenne, on peut dire alors que sous un vent faible (1,8 m/s) et une pression de 2 bars, la distribution d'eau relevée est bonne.

L'aspersion classique est ainsi sensible au vent à partir d'une certaine vitesse. Généralement, si la vitesse est supérieure à 6 m/s, il vaut mieux arrêter l'aspersion. En effet, on peut également réduire l'effet perturbateur du vent fort responsable des chutes du rendement, en diminuant l'écartement entre les asperseurs, ce qui entraînera une réduction de la surface irriguée par asperseur (disposition en triangle). Ouerfelli (1997) a indiqué que la vitesse du vent altère l'uniformité, alors que la diminution de l'écartement des arroseurs a des effets positifs sur la répartition de l'eau. Par ailleurs, Hermi (1995) a révélé que la meilleure uniformité d'irrigation à la surface est obtenue quand la vitesse du vent est inférieure à 6 m/s.

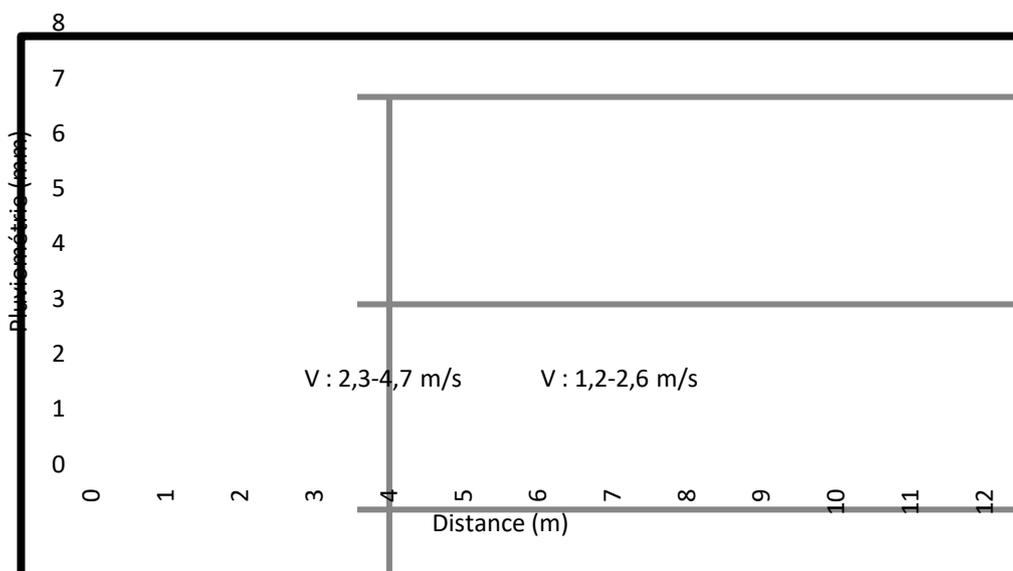


Figure 7 : Effet de la variation de la vitesse du vent sur la répartition pluviométrique à pression constante (2 bars)

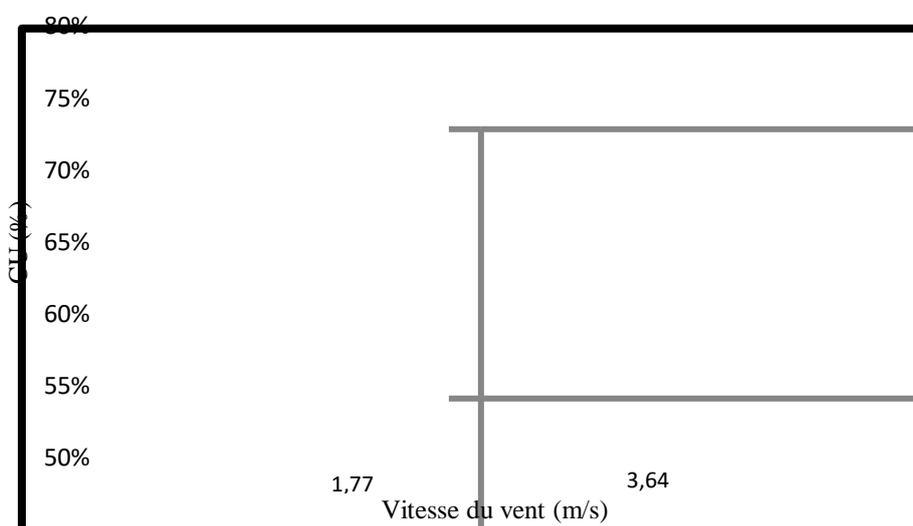


Figure 8 : Effet de la variation de la vitesse du vent sur le coefficient d'uniformité de l'irrigation par aspersion classique à pression constante (2 bars)

Effet de la pression de fonctionnement

Vu les conditions hydrauliques du réseau d'irrigation mis à l'essai, une forte variation de la pression n'est pas toujours commode.

La figure 9 dévoile deux allures différentes des courbes pluviométriques. Celles-ci ont été établies sous le même vent, mais avec directions différentes, ce qui explique bien la déformation de l'allure de chacune à l'égard de la direction du vent.

Pour une faible pression de fonctionnement, les gouttelettes sont plus grosses, donc moins déviées et moins sensibles au vent. L'observation sur le terrain du fonctionnement de l'asperseur avec une pression de service égale à 1,6 bars, montre que sa vitesse de rotation est relativement lente, ce qui fait que l'eau est aspergée sous forme de grosses gouttes, d'où le risque de dégât hydrique de la surface du sol. A l'opposé, avec une pression un peu plus élevée (2 bars), la portée du jet est plus importante et les gouttes sont plus fines. La pression de service ne doit être, en effet, ni trop faible (pulvérisation insuffisante, jet compact à faible portée) ni trop importante (pulvérisation excessive, jet trop sensible au vent) (Clément et al., 1979).

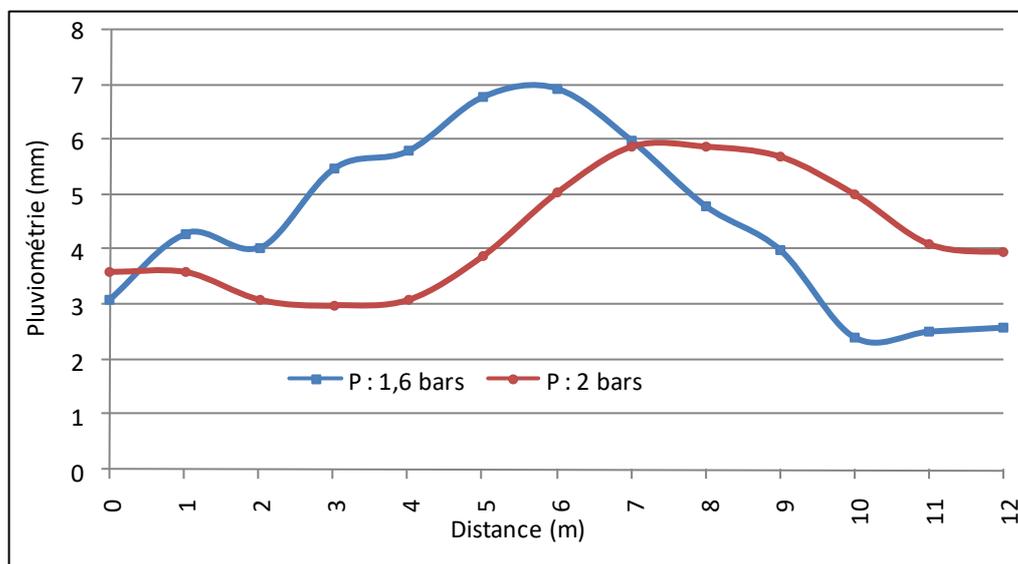


Figure 9 : Effet de la variation de la pression sur la répartition pluviométrique avec une vitesse du vent de 2,3 à 4,7 m/s

La figure 10 montre une dégradation du CU d'environ 10% entre les deux pressions de service testées. Tous les résultats acquis amènent à déduire que l'aspersion classique est très exigeante en énergie, quant à l'assurance d'une pluviométrie relativement homogène.

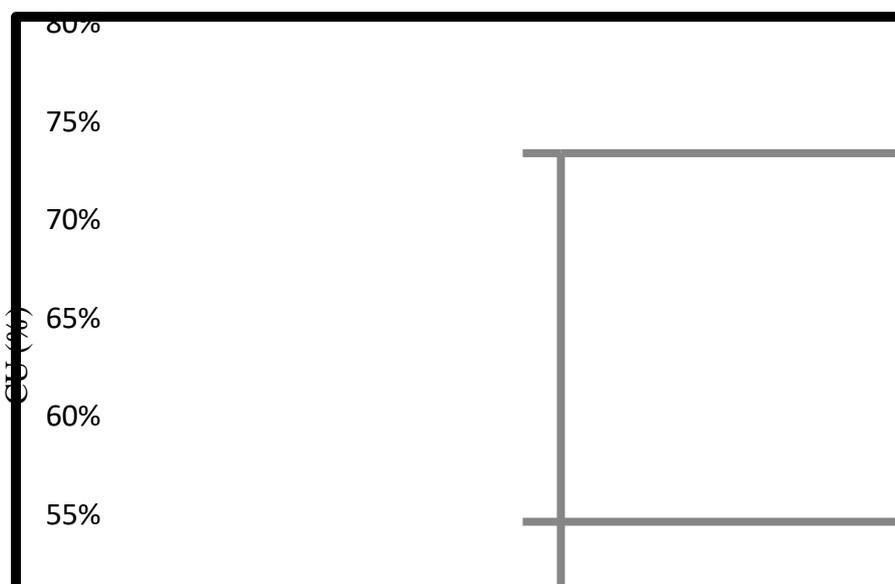


Figure 10 : Effet de la variation de la pression sur le coefficient d'uniformité de l'irrigation par aspersion classique avec une vitesse du vent de 2,4 à 4,7 m/s

4. Conclusion

L'aptitude à une distribution la plus uniforme possible de l'eau est la caractéristique essentielle d'un système d'irrigation pour des raisons de reproductibilité et de rentabilité. Les essais expérimentaux ont été effectués

dans une zone couverte de quatre asperseurs, en vue d'évaluer cette distribution d'eau donnée par le mode classique de l'aspersion.

L'étude entreprise sur la qualité d'arrosage obtenue par l'aspersion classique, a révélé une sensibilité au vent. La sensibilité au vent d'un asperseur est généralement fonction de :

- la taille des gouttes : plus les gouttes sont de faibles dimensions, plus elles sont faciles à être transportées par le vent ;

- la pression de fonctionnement : plus elle est faible, moins il y a un transport par le vent.

En guise de conclusion, les résultats acquis lors de cette étude ont dévoilé que l'aspersion classique est une méthode qui nécessite une surveillance des conditions climatiques et de la pression de service pour homogénéiser la répartition pluviométrique délivrée. Pour plus d'opportunité, à part la conduite des essais sur parcelle non cultivée, il faudrait également réaliser des approches expérimentales sur différentes zones de culture, et ce, pour une connaissance plus affinée sur les performances de l'aspersion classique et les interactions entre les contextes hydraulique et agronomique.

Références bibliographiques

- [1]. ANONYME, « Irrigation de la canne à sucre : 3. L'aspersion et le goutte à goutte », sd, 5.
<https://ja.scribd.com/document/81093509/Irrigation-03>
- [2]. APII, « Études et Monographies, Monographie Régionale, Gouvernorat Manouba », Agence de Promotion de l'Industrie et de l'Innovation (APII), Direction Régionale de Manouba, Tunisie, 2015.
<http://www.tunisieindustrie.nat.tn/fr/doc.asp?docid=598&mcat=13&mrub=105>
- [3]. BAUER, « Produits Tubes pièces façonnées, Arroseurs, Arroseur circulaire et à secteur », sd.
<http://www.bauer-at.com/fr/produits/tubes-pieces-faconnees/arroseurs/arroseur-circulaire-et-a-secteur>
- [4]. R. CLÉMENT, A. GALAND, J. MEYLAN, « Systèmes d'irrigation », Techniques de l'Ingénieur, 1978, 48.
- [5]. R. CLÉMENT, A. GALAND, « Irrigation par aspersion et réseaux collectifs de distribution sous pression », Éd. Eyrolles, Paris, 1979.
- [6]. J.E. CHRISTIANSEN, « Irrigation by Sprinkling. Bulletin 670 », University of California, College of Agriculture, Agricultural Experiment Station, Berkeley, California, USA, 1942.
- [7]. J. DUNGLAS, « Les techniques d'irrigation », Groupe Eau, Notes de Travail n°6, Académie d'Agriculture de France, 2014, 6.
- [8]. EEA, « Annual report 2009 and Environmental statement 2010 », European Environment Agency, Denmark, 2010, 92.
- [9]. EIJKELKAMP AGRISearch EQUIPMENT, « Équipement de Recherche pour la Gestion de l'Irrigation », Brochure (Fr), Pays-Bas, sd, 12. www.eijkelkamp.com
- [10]. H. GABRIEL, J. NEDELLEC, « Maîtriser l'irrigation par enrouleur », Chambre d'Agriculture de Tarn, France, 2012, 4.
- [11]. S. HANAFI, « Approche d'évaluation de la performance des systèmes irrigués à l'échelle des exploitations agricoles : Cas du périmètre irrigué de Borj Toumi (Vallée de la Medjerda-Tunisie) », Thèse de Doctorat AgroParisTech, France, 2011, 103.
- [12]. S. HANAFI, A. FRIJA, J.Y. JAMIN, A. ZAÏRI, A. HAMDANE, J.C. MAILHOL, « Les performances des petites exploitations irriguées de la basse vallée de la Medjerda en Tunisie », Cahiers Agricultures, vol. 24, n° 3, 2015, 170-176.
- [13]. M. HERMI, « Étude de l'uniformité en irrigation par aspersion sous différentes conditions de vent, de pression et d'écartement. Cas des périmètres irrigués de Jendouba », Mémoire de fin d'études de l'INAT, spécialité GREF, Tunisie, 1995, 140.
- [14]. D. HILLEL, « Salinity Management for Sustainable Irrigation. Integrating Science, Environment and Economics. Environmentally and socially sustainable development », The World Bank, Washington, 2000, 102.
- [15]. T.A. HOWELL, « Irrigation efficiency ». In: B.A. Stewart and T.A. Howell eds. Encyclopedia of Water Science, Marcel-Dekker, New York, USA, 2003, 467-472.
- [16]. J.Y. JAMIN, S. BOUARFA, J.C. POUSSIN, P. GARIN, « Les agricultures irriguées face à de nouveaux défis », Cahiers Agricultures 20, 2011, 10-5.
- [17]. ISO, « Agricultural irrigation equipment - Rotating sprinklers - Part 1: Design and operational requirements », 1995.
- [18]. ISO, « Agricultural irrigation equipment Center pivot and moving lateral irrigation machines with sprayer or sprinkler nozzles: Determination of uniformity of water distribution », 2001.
- [19]. N. KATERJIA, L. BRUCKLERB, P. DEBAEKE, « L'Eau, l'Agriculture et l'Environnement : Analyse introductive à une réflexion sur la contribution de la recherche agronomique », Courrier de l'Environnement de l'INRA N°46, 2002, 39-50.

- [20]. M. KUPER, « Des destins croisés : Regards sur 30 ans de recherches en grande hydraulique », Cahiers Agricultures 20, 2011, 16-23.
- [21]. H. LAMRANI, M. TOUZANI, M. AZOUGAR, « Les techniques et la rentabilité de l'irrigation d'appoint » Hommes Terre et Eaux 22, 1992, 35-48.
- [22]. J. LOUIS JEAN, « Étude de faisabilité de l'aménagement hydro-agricole de la plaine de Lhomond dans la 11^{ème} section communale d'Aquin : zone Frangipagne », Mémoire de Fin d'Études, Université d'Etat d'Haïti (U.E.H), 2009, 60.
- [23]. MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, «Rapport Technique », Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE), République Tunisienne, 1994.
- [24]. MINISTÈRE DU TRANSPORT ET DE L'ÉQUIPEMENT, « Atlas du gouvernorat de Manouba », Direction Générale de l'Aménagement du Territoire (DGAT), République Tunisienne, 2011, 109.
- [25]. S.NADON, D. BERGERON, C. BOIVIN, J. VALLEE, « Création et validation d'un feuillet technique sur la performance de systèmes d'irrigation par aspersion et par goutte à goutte en champ », Rapport final remis au RLIO, IRDA, Québec, Canada, 2016, 59.
- [26]. C. OLIER, M. POIREE, « Irrigation : Les réseaux d'irrigation, théorie, technique et économie des arrosages », Éd. Eyrolles, Paris, France, 1983, 380-407.
- [27]. N. OUERFELLI, « Possibilités d'amélioration des performances de l'irrigation par aspersion dans les périmètres de Siliana, Tunisie ». Mémoire de fin d'étude en Génie Rural de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Maroc, 1997, 137.
- [28]. L.S. PEREIRA, « Higher performance through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion », Agricultural Water Management 40, 1999, 153-169.
- [29]. J.P. RENOUX, « L'irrigation pour une agriculture durable », Fondapol : Fondation pour l'innovation politique, 2011, 37.
- [30]. J.L. SABATIER, T. RUF, P. LE GOULVEN « Dynamiques des systèmes agraires irrigués anciens : représentations synchroniques et diachroniques. L'exemple d'Urququi en Équateur », Les Cahiers de la Recherche-Développement 29, 1991, 30-43.
- [31]. S. YACOUBI, A. ZAIRI, T. OUESLATI, A. SLATNI, H. AMAMI, « Influences des performances de l'irrigation par aspersion et du pilotage de l'irrigation et impact sur le rendement de la pomme de terre », Séminaire sur la Modernisation de l'Agriculture Irriguée, 2004, IAV Hassan II, Rabat, Maroc, Actes 2005, 14.