



Comparative performances of mecanized systems of irrigation by spraying: Single ramps pivot and front

Y. M'Sadak^{*(1)}, A. Manai⁽¹⁾, M.E. Hamza⁽²⁾

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

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

* Corresponding Author: msadak.youssef@yahoo.fr

Simple systems of mechanized water spraying use mainly the swivel ramp and the front ramp, which are mainly used in large irrigated farms. The present study includes the diagnosis of operation of a swinging ramp and a frontal ramp, and the assessment of the quality of watering carried out by each system. This work has particularly affected the comparison of the rainfall distribution of the water and the coefficient of uniformity of each system with respect to the other under climatic conditions and with close operating pressures. The operating balance noted that both systems were capable of ensuring a homogeneous rainfall distribution Given their uniformity coefficients still close to 90%. When the wind is strong, this distribution becomes more dispersed for the pivot relative to that produced by the frontal ramp which remains relatively homogeneous. The front ramp is then slightly sensitive to the wind with respect to the pivoting ramp. This comparison also revealed that the frontal ramp is the least demanding in terms of energy, since the coefficient of uniformity remains largely high ($C_u = 93.5\%$) even with operating pressure considered low of the order of 1.8 bars relative to the coefficient got for the pivot ($C_u = 84\%$).

Received: 27 April 2017
Accepted: 22 May 2017
Available online: 1 June 2017

Keywords:

Coefficient of uniformity.
Front ramp
Pluviometric distribution
Swivel ramp

Introduction

En Tunisie, les précipitations sont généralement insuffisantes et variables dans le temps et l'espace. La pluviométrie moyenne annuelle varie de moins de 100 mm dans l'extrême Sud à plus de 1500 mm dans l'extrême Nord-Ouest [1]. Ce régime pluvial ne pourrait plus combler les exigences en eau des cultures et garantir une production agricole stable et suffisante, d'où le recours à l'irrigation, afin de se prémunir

contre les chutes des rendements de la production agricole [2].

L'évolution de l'agriculture irriguée était nécessaire pour aboutir aux objectifs des stratégies de sécurité alimentaire à long terme. Pour cela, depuis des décennies d'importants efforts pour la mobilisation et la gestion des ressources en eau ont été accomplis par les pouvoirs publics [3], ainsi que pour le développement des systèmes d'irrigation adaptés.

Le développement de l'irrigation, a constitué un axe privilégié de la politique publique Tunisienne. Anciennement, le secteur irrigué a couvert 400 000 ha, ce qui représente seulement 7% de la surface agricole utile, mais il a contribué pour 35% de la production agricole [4]. Aussi, il convient de rappeler la contribution de 20% de l'exportation agricole [5], et la consommation de 83,4% du total des prélèvements d'eau [6]. Une gamme variée des techniques d'irrigation est généralement adoptée, particulièrement, les variantes relevant de l'irrigation de surface et de l'irrigation sous pression. L'objectif principal de l'irrigation par aspersion (parmi les modes d'irrigation sous pression) est d'assurer une distribution d'eau aussi uniforme que possible, et par suite, garantir l'humidification adéquate de la zone racinaire des plantes [7]. Cette méthode est moins efficace que l'irrigation localisée, mais moins chère et plus répandue dans le monde, car elle est relativement facile et s'adapte à presque tous les types de culture et de terrain [8].

L'évolution technique des systèmes d'irrigation par aspersion, qui a été influencée par le souci d'économiser de l'eau et de diminuer la pénibilité du travail [9], a abouti à la conception de machines d'aspersion de l'eau, telles que les rampes mécanisées d'arrosage [10].

En Tunisie, 10 000 ha de la superficie irrigable sont équipés en machines d'aspersion mécanisée (9% de la surface totale irriguée par aspersion) [11]. C'est vers la fin des années 1970 que ces machines ont commencé à apparaître sur les exploitations Tunisiennes. Parmi les facteurs qui se sont opposés à leur expansion, on peut évoquer le morcellement des terres et le niveau d'instruction des agriculteurs qui préfèrent utiliser un système classique.

Actuellement, un grand nombre de machines (simples ou combinées) est mis sur le marché, confrontant l'agriculteur à un choix difficile. Parmi ces machines, les rampes pivotante et frontale sont destinées pleinement aux grandes exploitations irriguées. Pour faire le bon choix, il est indispensable de connaître leurs caractéristiques techniques, leur fonctionnement et leurs performances.

Le but de ce travail est de diagnostiquer le fonctionnement au champ des deux rampes mécanisées simples, l'une pivotante et l'autre frontale, adoptées respectivement dans le gouvernorat de Ben Arous (Nord Tunisien) et dans le gouvernorat de Béja (Nord-Ouest Tunisien) et de comparer la qualité de l'arrosage réalisé. Les paramètres pertinents retenus dans l'étude sont principalement la vitesse du vent et la pression de fonctionnement.

Matériel et méthodes

Contexte général de l'étude

Les statistiques opérées, en Tunisie, par le Département Génie Rural du Ministère de l'Agriculture sur l'aspersion mécanisée, ont montré que le pivot reste le plus employé et le plus préféré par les agriculteurs, suivi par la rampe frontale (figure 1).

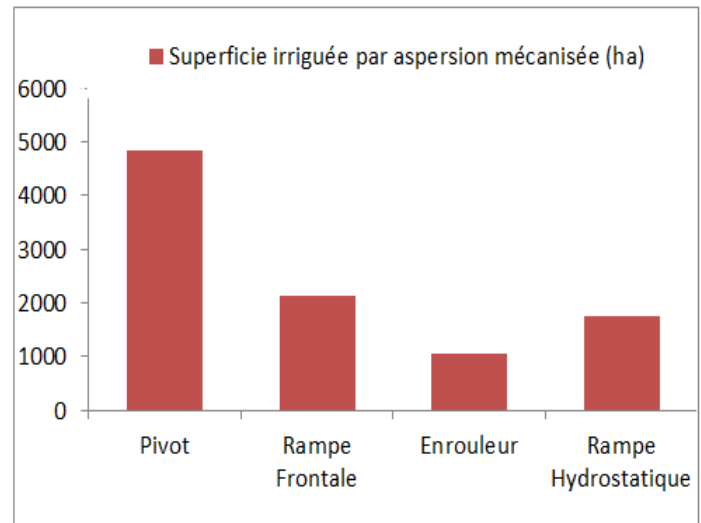


Figure 1 : Répartition de la surface irriguée par aspersion mécanisée suivant le matériel en Tunisie [11].

Les surfaces couvertes par les rampes hydrostatiques et l'enrouleur se dévoilent réduites par rapport aux deux machines considérées.

L'expérimentation sur la rampe pivotante a été effectuée au sein de la Société de Mise en Valeur et de Développement Agricole (SMDVA) El Khir, délégation de M'Hamdia, gouvernorat de Ben Arous (Nord de la Tunisie), alors que celle sur la rampe frontale a été accomplie au sein de la Société des Fermes Laitières (SFL), sise à la délégation de Medjez El Bab, gouvernorat de Béja (Nord-Ouest Tunisien). Les caractéristiques géographiques et climatiques des deux sites expérimentaux sont dévoilées par le tableau 1 ci-après.

Conditions des essais

Les essais ont été conduits avec du matériel en bon état de fonctionnement, dans des conditions conformément à la Norme ISO 11545 [16], à la Norme ISO 7749 [17], à la Norme ASAE [18] et aux recommandations expérimentales du CEMAGREF, relatives au calcul de la pluviométrie moyenne. Lors des essais, l'anémomètre, indiquant la vitesse et la direction du vent, 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 donnée chaque 10 mn.

Tableau 1 : Présentation générale des sites d'étude

	Rampe Pivotante Simple	Rampe Frontale Simple
Campagne d'utilisation	En cours	Première
Site expérimental	SMVDA El Khir	SFL
Délégation	M'Hamdia	Medjez El Bab
Gouvernorat	Ben Arous	Béja
Coordonnées géographiques	Latitude : 36°45'11" Nord Longitude : 10°13'08" Est Altitude par rapport au niveau de la mer : 12 m	Latitude : 36°43'32" Nord Longitude : 9°10'54" Est Altitude par rapport au niveau de la mer : 248 m
Climat	Méditerranéen semi-aride avec des hivers doux et humides et des étés secs et chauds [12]	Au Nord, un climat humide et au Sud, un climat assez sec [14]
Température moyenne annuelle	20°C [MEDD, 2007] [13]	Entre 15° et 19°C du Sud au Nord [15]
Pluviométrie moyenne	Entre 400 mm et 500 mm [13]	Au Sud : entre 350 et 450 mm [15]
Vents	Soufflant du secteur Ouest à Nord-Ouest, et du secteur Est. Aussi, Vents du Sud, Sirocco de Sud-Ouest et de Sud-Est [13]	Parmi les zones les plus ventées du territoire national. Vents dominants de direction Nord et Nord-Ouest [15]

Description technique des systèmes d'aspersion mécanisée considérés

Les caractéristiques techniques essentielles du matériel testé sont illustrées dans le tableau 2 ci-après.

Appréciation de la répartition pluviométrique

Le programme d'évaluation d'un système d'irrigation sous pression repose principalement sur la détermination d'un indice de performance : l'uniformité de la distribution d'eau [21]. Cette uniformité est appréciée moyennant l'installation d'une grille de pluviomètres régulièrement espacés. La dispersion des lames d'eau collectées dans les divers pluviomètres permet d'évaluer l'uniformité d'arrosage.

Pour mener les essais de caractérisation, 270 pluviomètres identiques ont été utilisés pour le pivot, et 230 pluviomètres pour la rampe frontale, ayant chacun un diamètre de 18 cm et une hauteur de 17 cm. Ces pluviomètres ont été disposés

selon deux rayons irrigués pour le pivot et selon deux lignes transversales irriguées pour la rampe frontale. Les écartements sont respectivement à 2 m pour le pivot et (2,5 m x 2 m) pour la rampe frontale (tableau 3 ci-après).

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

$$P = 10 V/S$$

Avec :

P : pluviométrie (mm)

V : volume d'eau récolté par récipient (cm³)

S : section supérieure du récipient (cm²)

Tableau 2 : Caractérisation technique comparée des rampes d'aspersion mécanisée étudiées [19-20]

Système étudié	Rampe Pivotante	Rampe Frontale
Principale spécificité	Arrose en rotation une parcelle circulaire ou semi-circulaire.	Arrose une parcelle rectangulaire et avance en translation.
Marque & Origine	LINDSAY ZIMMATIC & Lindsay Europe, France (Filiale de Lindsay Corporation US)	VALMONT & USA
Tour centrale	Stationnaire	Déplaçable linéairement
Longueur du système (m)	394	300
Longueur du champ irrigué (m)	-	2700
Diamètre de la conduite (mm)	168	168
Longueur du porte à faux (m)	25	25,08
Longueur d'une travée (m)	61,5	54,8
Nombre de buses	170	102
Nombre de travées	6	5
Espacement entre asperseurs (m)	2	2,88
Canne de descente flexible (m)	Calée par rapport au sol : 1,2	Calée par rapport au sol : 2
Débit total d'alimentation (m³/h)	97	180
Pression de service (bars)	1,2	2,7
Vitesse d'avancement maximale (m/h)	155,0	123,8
Guidage de la rampe	Par traineau	Par sillon

Détermination du coefficient d'uniformité

Coefficient d'uniformité surfacique

L'efficacité d'application ne permet pas d'évaluer l'uniformité de l'irrigation [22]. 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 dont les caractéristiques hydrauliques (pression,

débit, etc) du système d'irrigation [23]. La définition utilisée par Christiansen [24] pour évaluer l'uniformité de l'irrigation par aspersion demeure la plus utilisée, moyennant le coefficient d'uniformité qui s'exprime comme suit (équation 1).

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

Avec :

C_u : Coefficient d'uniformité (%)

V_i : volume d'eau collecté dans le récipient i (cm^3)

V_m : volume moyen de l'eau dans les n récipients (cm^3)

S_i : section supérieure du récipient i (cm^2)

Coefficient d'uniformité radiale

L'uniformité sous pivot est appréciée par la formule de Hermann et Hein [25] selon ISO 11545 [16] (équation 2)

$$CU_H = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (|V_i - V| * S_i) / \sum_{i=1}^n (V_i * S_i)}{\sum_{i=1}^n (V_i * S_i)} \right] \quad (2)$$

Avec :

CU_H : Coefficient d'uniformité de Hermann et Hein (%)

n : nombre de collecteurs utilisés pour l'analyse des données

i : indice de repérage commençant, en général, par le collecteur situé le plus près du point du pivot

V_i : volume d'eau recueillie dans l' i ème collecteur (cm^3)

S_i : distance entre l' i ème collecteur et le point de pivot (m)

Calcul du coefficient d'uniformité du pivot

Le coefficient d'uniformité globale pour le pivot est le produit de l'uniformité radiale par l'uniformité circulaire. Pour calculer ce terme, on a décidé d'adopter une procédure aux conditions de l'expérimentation. Dans ce cadre, on a limité l'étude sur un secteur, tout en prévoyant, l'installation d'une douzaine de pluviomètres sur un rayon r , espacés chacun de 1,5 m (l'espacement entre les pluviomètres n'est pas un critère très important, puisque ce terme est évalué par la formule de Christiansen). Pendant le temps nécessaire à l'essai, on a indiqué toutes les perturbations climatiques et on a aussi évalué les pertes par évaporation à l'aide de bacs d'évaporation témoin.

Tableau 3 : Disposition expérimentale des pluviomètres respectivement sous le pivot et sous la rampe frontale suivant la Norme ASAE [18] et la Norme ISO 11545 [16]

	Disposition expérimentale des pluviomètres
Sous le pivot	
Sous la rampe frontale	

Résultats et discussion

Effet du vent sur la qualité d'irrigation

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 [26], du fait d'une probable modification de la taille des gouttes [27]. 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 caractéristique. La déformation de la courbe pluviométrique est d'autant plus importante que la vitesse du vent est élevée et la dimension des gouttelettes est petite [28]. L'effet de la variation de la vitesse du vent sur la répartition pluviométrique sous les deux appareils testés est illustré par les deux figures 2 et 3, et résumé par le tableau 4.

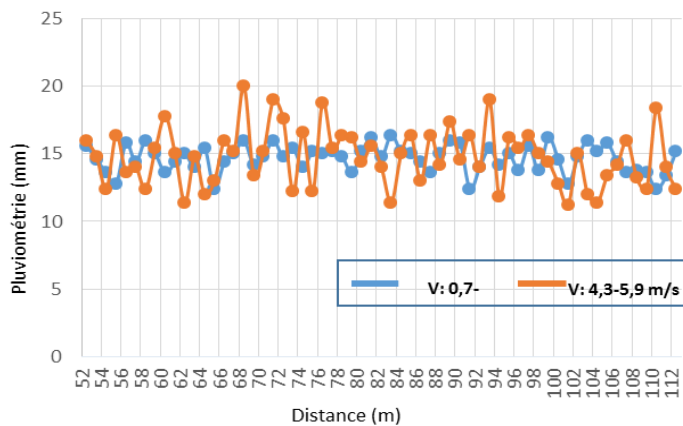


Figure 2 : Incidence de la variation de la vitesse du vent sur la répartition pluviométrique sous la deuxième travée de la rampe frontale (VALMONT) à pression constante (3 bars)

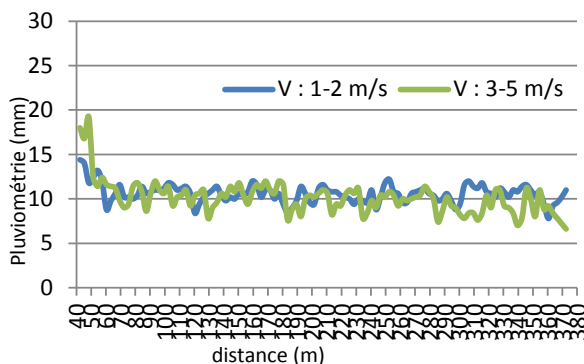


Figure 3 : Effet de la variation de la vitesse du vent sur la répartition pluviométrique sous le pivot (LINDSAY ZIMMATIC) à pression constante (1,4 bars)

Tableau 4 : Effet de la variation de la vitesse du vent sur la répartition pluviométrique selon la rampe étudiée

Tests à pression constante	Répartition pluviométrique	
	Vent faible	Vent fort
Rampe pivotante	Homogène	Dispersée
Rampe frontale	Homogène avec dose moyenne de 15 mm	Relativement homogène, tout en s'éloignant légèrement de la dose moyenne

Selon les résultats obtenus sur le pivot simple, la variation de la pluviométrie sous pivot avec différentes vitesses du vent a montré que sous vent faible, la variation entre les deux rayons est faible, alors que sous un vent fort, une dispersion entre les deux est remarquable. En conséquence, la répartition de la pluviométrie est hétérogène à une vitesse du vent de l'ordre de 5,9 m/s, alors que pour la même vitesse du vent, la répartition pluviométrique de la rampe frontale est relativement homogène. D'où, la rampe frontale est légèrement sensible au vent par rapport au pivot. Les matériels d'irrigation peuvent être classés selon leur efficacité d'irrigation, définie par Burt et al. [29], comme le rapport entre le volume d'eau utilisable par la plante et le volume délivré à la parcelle. Le paramètre par excellence exprimant la qualité d'irrigation est le coefficient d'uniformité [30]. En se référant aux résultats de Keller et Bleinsner [31], le coefficient d'uniformité doit être compris entre 90 et 98%, afin d'assurer une bonne répartition de l'eau. Les machines d'arrosage permettent d'atteindre des rendements hydrauliques nets voisins de 85-90%. Ces rendements peuvent néanmoins être bien inférieurs, si les arroseurs sont mal disposés ou encore par vent fort [32]. Malgré la détérioration du coefficient d'uniformité sous l'effet de l'augmentation de la vitesse du vent qui se trouve plus importante pour la rampe frontale (Tableau 5), cette dernière reste la plus performante dans les deux conditions ventées étudiées. Le meilleur coefficient d'uniformité obtenu correspond constamment à une vitesse faible.

Tableau 5 : Variation du coefficient d'uniformité en fonction du vent suivant la rampe considérée

Tests à pression constante	Coefficient d'uniformité (%)	
	Vent faible	Vent fort
Rampe pivotante	91,0	88,0
Rampe frontale	94,8	89,6

L'effet du vent paraît très net. En effet, les asperseurs installés, du type à déflecteur, projettent l'eau en fines gouttelettes à faible distance. Ces gouttelettes sont très sensibles à l'action

du vent (elles vont être généralement évaporées, déviées ou transportées). Pour réduire la sensibilité au vent, on peut réduire la pression ou utiliser des buses de plus gros diamètre [25], ou encore utiliser des cannes de descente de même longueur pour minimiser l'effet du vent [33].

Effet de la pression sur la qualité d'irrigation

Le tableau 6 présente les résultats acquis relatifs au coefficient d'uniformité des deux machines considérées, par temps calme, en variant la pression de service.

Tableau 6 : Variation du coefficient d'uniformité en fonction de la pression de fonctionnement selon la rampe considérée

Tests par temps calme	Coefficient d'uniformité (%)	
	Pression faible	Pression plus élevée
Rampe pivotante	89,0	84,0
Rampe frontale	93,5	96,7

Selon les résultats des mesures sur le pivot, une légère variation de pression de 1,4 bar à 1 bars, entraîne une détérioration de 5% du coefficient d'uniformité qui passe de 89% à 84%. Ce coefficient paraît très sensible à la variation de la pression. Dans le cas de la rampe frontale, l'augmentation de la pression emmène à une élévation du coefficient d'uniformité qui passe de 93,5% pour une pression de 1,8 bars à 96,7% pour une pression de 3,5 bars. Cette machine d'arrosage est moins exigeante en énergie, vu que le coefficient d'uniformité reste largement élevé même avec une pression de fonctionnement jugée faible de l'ordre de 1,8 bars par rapport au coefficient obtenu pour le pivot.

Conclusion

Les systèmes de rampe pivotante et de rampe frontale sont des installations utilisées essentiellement dans les grandes exploitations. Pour que ces appareils d'aspersion mécanisée tiennent toutes leurs promesses, il est essentiel que l'utilisateur connaisse leur fonctionnement leur performances et tienne compte de leurs contraintes spécifiques.

L'investigation entreprise sur les rampes simples pivotante et frontale considérées, a révélé que ces deux systèmes assurent une bonne distribution pluviométrique, étant donné leurs coefficients d'uniformité toujours à proximité de 90%, même sous vent fort. Cependant, la rampe frontale s'est montrée la moins sensible au vent en présentant un coefficient d'uniformité supérieur à celui du pivot (89,6% vs 88%). En raison de son coefficient d'uniformité, restant largement élevé même avec une pression de fonctionnement jugée faible de

l'ordre de 1,8 bars, cette machine est, également, la moins exigeante en énergie que le pivot (93,5% vs 84%).

Dans l'ensemble, l'aspersion mécanisée par rampe simple est une technique efficiente susceptible de concourir à une irrigation durable dans les zones de grandes cultures, sous réserve notamment de ne pas dépasser les conditions de vent fort.

References and notes

1. MEDD. Guide pour une gestion durable des ressources en eau. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD). Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE), **2009**, 41.
2. Y M'Sadak, B Douh, M.E Hamza. Diagnostic de fonctionnement des systèmes d'aspersion par pivot utilisés dans une grande exploitation irriguée de la Tunisie centrale. Larhyss Journal, n°11, **2012**, 97-107.
3. 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 de l'Agro Paris Tech, France, **2011**, 101.
4. R Al Atiri. Analyse des politiques hydrauliques. Cas de la Tunisie. In Bachta M.S. (ed) Les instruments économiques et la modernisation des périmètres irrigués, Sousse, Tunisie, **2005**, 22.
5. Ministère de l'Agriculture. IXe Plan de développement économique et social (1997-2001) : le développement agricole et les ressources naturelles, Tunisie, **1997**.
6. Ministère de l'Agriculture. Rapport de la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE), Tunisie, **1994**.
7. M Kay. Sprinkler Irrigation: Equipment and Practice. Bats ord, London, **1983**.
8. Anonyme. Les techniques d'irrigation simples et efficaces. Extrait E52, Wikiwater, **2012**, 10. <http://www.wikiwater.fr/e52-les-techniques-d-irrigation.html>
9. J.C Mailhol. Contribution à l'amélioration des pratiques d'irrigation à la raie par une modélisation simplifiée à l'échelle de la parcelle et de la saison. Thèse de Doctorat USTL. II, France, **2001**, 260.
10. Valmont. Offre pour la fourniture de transport, de montage et de mise en service du matériel d'irrigation par aspersion mécanisée pour la SMVDA El Amra, Medjez El Bab, Tunisie, Devis estimatif, **1994**.
11. Ministère de l'Agriculture. Aspersion mécanisée, statistiques. Département Génie Rural, Tunisie, **2003**.
12. Ministère de l'Équipement de l'Aménagement du Territoire et du Développement Durable. [Atlas de gouvernorat](#) de Ben Arous, Tunisie, **2012**, 73.
13. MEDD. Indicateurs Régionaux d'amélioration des conditions de vie. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD), République Tunisienne, **2007**, 161.
14. M Souissi. Situation géographique de Béja, Ministère de l'Intérieur et du Développement Local, Observatoire SERVAGRI, **sd**, 16.
15. Ministère de l'Équipement de l'Aménagement du Territoire et du Développement Durable. Atlas Numérique du Gouvernorat de Béja, Tunisie, **2016**, 106.
16. ISO. Agricultural irrigation equipment Center pivot and moving lateral irrigation machines with sprayer or sprinkler nozzles: Determination of uniformity of water distribution, **2001**.
17. ISO. Agricultural irrigation equipment - Rotating sprinklers - Part 1: Design and operational requirements, **1995**.
18. American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Test Procedure for Determining the Uniformity of Water Distribution of Center Pivot and Lateral Move Irrigation Machines Equipped with Spray or Sprinkler Nozzles, Report No. ANSI/ASAE S436.1 DEC01, St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers, USA, **2001**.

19. LINDSAY. Solutions d'irrigation : produits. [Pivots fixes](http://www.lindsayeuropefr.com/pivots-fixes), sd. <http://www.lindsayeuropefr.com/pivots-fixes>
20. VALLEY. Produits pour l'irrigation : Rampes Frontales, sd. http://www.valleyirrigation.com/valley-irrigation/fr/informations_soci%C3%A9t%C3%A9/historique
21. S Nadon, D Bergeron, C Boivin, J Vallée. 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.
22. X Wang, N.G Zelenski, J Yang, J Sakai, M.S Brown, J.L Goldstein. Cleavage of sterol regulatory element binding proteins (SREBPs) by CPP32 during apoptosis. EMBO J. 15, **1996**, 1012-1020.
23. T.A HOWELL. Irrigation efficiency. pp. 467-472. In: B.A. Stewart and T.A. Howell (eds.) Encyclopedia of Water Science, Marcel-Dekker, Inc., **2003**.
24. J.E Christiansen. Irrigation by Sprinkling. Bulletin 670. University of California, College of Agriculture, Agricultural Experiment Station, Berkeley, California, USA, **1942**.
25. D.F Heermann, R Hein. Performance characteristics of self-propelled center pivot sprinkler irrigation system, Transactions of the ASAE 11(1), **1968**, 11-15.
26. B Molle, D Baudequin, S Haidar. Choix du busage et conduite de l'irrigation par pivots - Prise en compte de la capacité d'inaltération du sol. Ingénieries - Eau Agriculture & Territoires (E A T), IRSTEA, **1998**, 57-69.
27. D.W De Boer, R.A Kohl. Performance characteristics of reduced pressure sprinklers, ICID Fifteenth Congress, The Hague, NLD. **1993**, 1033-1044.
28. M Hendawi. Étude des pertes d'eau par évaporation et dérive sur un jet d'asperseur, Thèse de Doctorat, Université de la Méditerranée, Marseille, France, **2006**, 226.
29. C.M Burt, A.J Clemmens, T.S Strelkoff, K.H Solomon, T Howell, D Eisenhauer, R Bleisner. Irrigation performance measures, efficiency and uniformity. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 123 n°6, **1997**, 423-442.
30. J.R Tiercelin, A Vidal. Traité d'Irrigation, édition Lavoisier, France, **1998**, 470-497.
31. J Keller, R Bleisner. Sprinkler and trickle irrigation, 1990, 247-385.
32. R Rieul. Les techniques modernes d'irrigation et les économies d'eau. Etat de l'agriculture en Méditerranée : Ressources en eau : développement et gestion dans les pays méditerranéens. Bari : CIHEAM, **1993**, 177-197.
33. B Douh, S Chehaibi, M Zouaghi. Analyse diagnostique du maintien en état de fonctionnement des systèmes d'irrigation mécanisée par aspersion cas d'une rampe frontale dans la région de Bousselem, Tunisie. Larhyss Journal, n°11, **2012**, 47-61.