

Performances comparées des rampes mécanisées d'aspersion de l'eau en Tunisie : pivotante simple, frontale simple et combinée (pivotante/frontale)

Y. M'Sadak ^{1*}, A. Manai Afoua¹, H. M. Elies²

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

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

Résumé. La présente étude consiste à diagnostiquer le fonctionnement au champ des deux systèmes mécanisés simples d'aspersion (rampe pivotante et rampe frontale) et d'un autre combiné (rampe pivotante/frontale), et à comparer la qualité de l'arrosage réalisé. Ce travail a touché particulièrement la comparaison de la répartition pluviométrique de l'eau et du coefficient d'uniformité de chaque système par rapport à l'autre suivant deux variantes, à savoir : pivot simple avec mode pivot combiné et rampe frontale simple avec mode frontal combiné, selon diverses conditions de vent et de pression. Le bilan de fonctionnement a montré que les trois systèmes testés, plus ou moins neufs, ont présenté des buses en bon état, répondant à la conformité entre débits théorique et pratique. En outre, le pivot simple est moins sensible au vent et moins exigeant en énergie que le mode pivot combiné. De même, le mode frontal d'une machine combinée est plus sensible au vent et plus exigeant en énergie par rapport à une rampe frontale simple. Cette comparaison a dévoilé, dans l'ensemble, qu'un système mécanisé simple d'aspersion de l'eau, tant pivot que rampe frontale, est plus performant qu'un système combiné, fonctionnant alternativement selon ces deux modes.

** Corresponding author.*

msadak.youssef@yahoo.fr

Received 15 Nov 2017,

Revised 18 Nov 2017,

Accepted 18 Dec 2017

Abstract. The present study consists in diagnosing the field operation of the two simple mechanized spray systems (swivel ramp and frontal ramp) and another handset (swivel / frontal ramp), and to compare the quality of the irrigation carried out. 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 according to two variants, namely: single pivot with pivot combined mode and single frontal ramp with frontal mode combined, under various wind and pressure conditions. The operating balance showed that the three systems tested, more or less new, presented nozzles in good condition, matching the theoretical and practical flows. In addition, the single pivot is less

wind sensitive and less demanding on energy than the pivot combined mode. Similarly, the front-end mode of a combined machine is more wind-sensitive and more energy-demanding than a single front ramp. This comparison revealed, on the whole, that a simple mechanized system of sprinkling water, both pivot and frontal ramp, is more efficient than a combined system, operating alternately in these two modes.

Mots clés : Aspersion mécanisée, Rampe pivotante, Rampe frontale, Rampe combinée, Répartition pluviométrique, Coefficient d'uniformité.

Keywords: Mechanized spraying, Swivel ramp, Front ramp, Combined ramp, Pluviometric distribution, Coefficient of uniformity.

1. Introduction

La Tunisie occupe un territoire soumis principalement à un climat aride à semi-aride marqué par des précipitations irrégulières dans le temps et l'espace [1]. La plupart des pays à climat aride et semi-aride sont en situation de stress hydrique important, en raison d'une forte demande en eau agricole, d'une part, et de la rareté des ressources en eau disponibles, d'autre part [2]. Le secteur irrigué, en Tunisie, est le plus grand consommateur des ressources en eau toutes qualités confondues. Ce secteur consomme près de 83% des volumes d'eau distribués [3]. Ainsi, le choix d'une stratégie d'irrigation adaptée aux conditions pédoclimatiques, en particulier, dans les régions à ressources en eau limitées, est essentiel pour l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau par la culture [4, 5]. Cette efficacité dépend, d'une part et dans une large mesure, des technologies employées, et d'autre part, de la technicité des irrigants [6]. L'ensemble des techniques d'irrigation utilisées en Tunisie couvre un large éventail. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories : irrigation de surface, irrigation localisée et irrigation par aspersion. L'irrigation par aspersion consiste à fournir l'eau nécessaire aux cultures sous une forme analogue à la pluie naturelle [7] et permet d'économiser l'eau dans une proportion allant jusqu'à 50% par rapport à l'irrigation de surface [8]. Elle convient aux cultures en lignes de plein champ et à l'arboriculture [9].

Plusieurs machines d'aspersion ont été inventées afin d'économiser de la main d'œuvre et de diminuer la pénibilité du travail [10]. Les systèmes de rampe pivotante et de rampe frontale sont des machines utilisées essentiellement dans les grandes exploitations. Elles possèdent un mécanisme d'entraînement programmable qui sert à déplacer les éléments constitutifs [11]. Face, essentiellement, à la contrainte de la superficie plusieurs combinaisons entre ces machines ont été faites. Les rampes combinées sont des appareils hybrides entre le pivot et la rampe frontale, capables, de se déplacer en eau de rotation comme en translation [12].

Dans ce cadre, ce travail vise l'évaluation expérimentale du fonctionnement au champ des deux machines indépendantes (ou simples) d'aspersion de l'eau (rampe pivotante et rampe frontale) et d'une


machine hybride (dénommée rampe combinée), ainsi que la comparaison de leur comportement et de leur efficacité selon les conditions ventées (gamme de 0,7 à 8,0 m/s) et la pression de service (gamme de 1,0 à 3,5 bars), suivant deux variantes, à savoir : pivot simple avec mode pivot combiné et rampe frontale simple avec mode frontal combiné.

2. Matériel et méthodes

2.1. Présentation générale du site d'étude

L'étude sur la rampe pivotante a été opérée au sein de la Société de Mise en Valeur et de Développement Agricole (SMDVA) El Khir (Nord de la Tunisie), alors que celle sur la rampe frontale a été accomplie au sein de la Société des Fermes Laitières (SFL), sise au Nord-Ouest Tunisien. Concernant la rampe combinée (pivotante/frontale), l'expérimentation a été réalisée dans une grande exploitation privée, située au Nord de la Tunisie. Les caractéristiques géographiques et climatiques des trois sites expérimentaux sont révélées par le tableau 1.

Tableau 1. Contexte général de l'étude

	Rampe Pivotante Simple	Rampe Frontale Simple	Rampe Combinée (Pivotante-Frontale)
Campagne d'utilisation	En cours	Première	Première
Site expérimental	SMVDA El Khir	SFL	Grande exploitation privée
Délégation	M'Hamdia	Medjez El Bab	Bourj El Amri
Gouvernorat	Ben Arous	Béja Sud	Mannouba
Localisation			
Climat	Méditerranéen semi-aride avec des hivers doux et humides et des étés secs et chauds [13]	au Nord, un climat humide et au Sud, un climat assez sec [15]	Méditerranéen appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride supérieur [17]
Température moyenne	20°C [14]	entre 15°et 19°C du Sud au Nord [16]	18,7 °C [18]
Pluviométrie moyenne	entre 400 mm et 500 mm [14]	au Sud : entre 350 et 450 mm [16]	450 mm [18]
Vents	Soufflant du secteur Ouest à Nord-Ouest, et du secteur Est. Aussi, Vents du Sud, Sirocco de Sud-Ouest et de Sud-Est [14]	Parmi les zones les plus ventées du territoire national. Vents dominants de direction Nord et Nord-Ouest [16]	Soufflant surtout de l'Ouest au Nord-Ouest et responsables des précipitations fréquentes pendant la période hivernale [17]

2.2. Description technique des systèmes d'aspersion mécanisée mis à l'essai

L'étude a été réalisée sur une rampe pivotante en usage de marque « LINDSAY ZIMMATIC », une rampe frontale neuve de marque « VALMONT » et une rampe combinée (pivotante/frontale) neuve de marque « BAUER » dont les caractéristiques techniques sont présentées dans le tableau 2. Les essais ont été entrepris dans des conditions conformément à la Norme ISO 11545 [19], à la Norme ISO 7749 [20], à la Norme ASAE [21] et aux recommandations expérimentales du CEMAGREF, relatives au calcul de la pluviométrie moyenne.

Tableau 2. Caractérisation technique comparée des rampes d'aspersion mécanisée [22- 24]

Système étudié	Rampe Pivotante	Rampe Frontale	Rampe Combinée
Principale spécificité	Arrose en rotation une parcelle circulaire ou semi-circulaire	Arrose une parcelle rectangulaire et avance en translation	Capable d'arroser en tournant comme le pivot ou en translation comme une rampe frontale
Marque & Origine	LINDSAY ZIMMATIC & Lindsay Europe, France (Filiale Lindsay Corporation US)	VALMONT & États-Unis	BAUER & Australie
Tour centrale	Stationnaire	Déplaçable linéairement	Mobile
Longueur du système (m)	394	300	223,5
Longueur du champ irrigué (m)	-	2700	230,2
Diamètre de la conduite (mm)	168	168	168
Longueur du porte à faux (m)	25,00	25,08	11,70
Longueur d'une travée (m)	61,5	54,8	52,8
Nombre de buses	170	102	74 (*) ; 37 (**)
Nombre de travées	6	5	4
Espacement entre asperseurs (m)	2,00	2,88	2,93 (*) ; 5,86 (**)
Canne de descente flexible (m)	Calée par rapport au sol : 1,2	Calée par rapport au sol : 2,0	Calé par rapport au sol : 3,1
Débit total d'alimentation (m ³ /h)	97,0	180,0	84,2
Pression de service (bars)	1,2	2,7	2,7
Vitesse d'avancement maximale (m/h)	155,0	123,8	105,0 (*) ; 125,0 (**)
Guidage de la rampe	Par traîneau	Par sillon	Par sillon

(*) : Mode rampe frontale ; (**) : Mode pivot

La figure 1 illustre le schéma de construction de la rampe combinée (pivotante/frontale) étudiée. La rampe frontale et la rampe pivotante possèdent le même principe de construction, toutefois, elles diffèrent essentiellement par leur plan de busage et leur mode de déplacement.

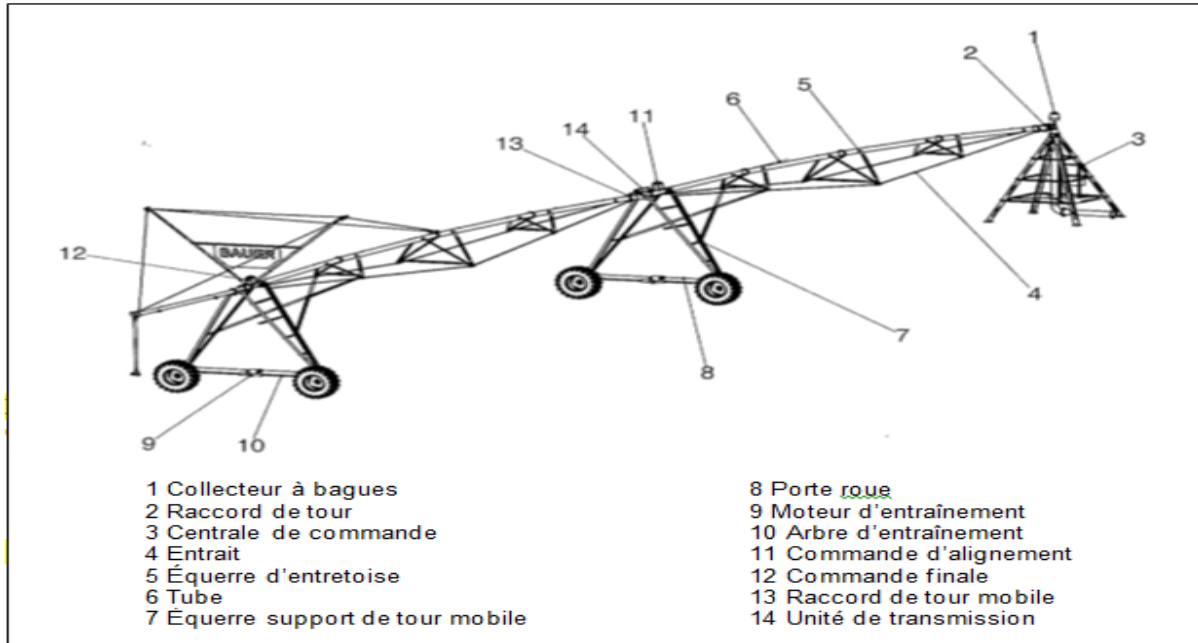


Figure 1. Schéma descriptif de la rampe combinée étudiée [25]

2.3. Détermination de la répartition pluviométrique

Le programme d'évaluation d'un système d'irrigation sous pression (par aspersion ou goutte à goutte) repose principalement sur la détermination d'un indice de performance : l'uniformité de la distribution d'eau [26]. L'uniformité d'arrosage 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 conduire les essais de caractérisation, 270 pluviomètres identiques ont été utilisés pour le pivot, 230 pluviomètres pour la rampe frontale, et 230 pluviomètres pour la rampe combinée (pivotante/frontale), ayant chacun un diamètre de 18 cm et une hauteur de 17 cm. Ils 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). Afin de bien caractériser les conditions expérimentales, on a eu recours, entre autres, à un anémomètre pour mesurer la vitesse du vent et à un manomètre à lecture directe pour relever la valeur de la pression de service.

La pluviométrie moyenne P est calculée par la formule ci-après, ramenée par SAIDI [27] :

$$P = 10 V/S$$

Avec :

P : Pluviométrie (mm)

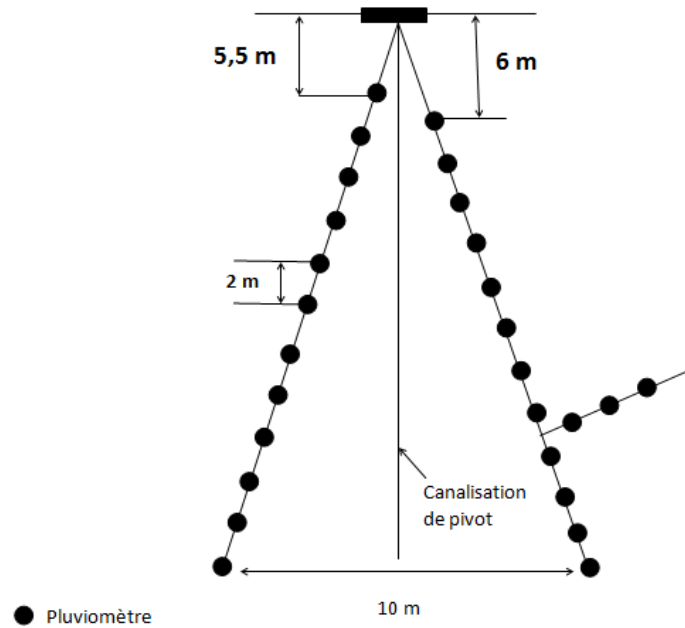
V : Volume d'eau récolté par récipient (cm^3)

S : Section supérieure du récipient (cm^2)

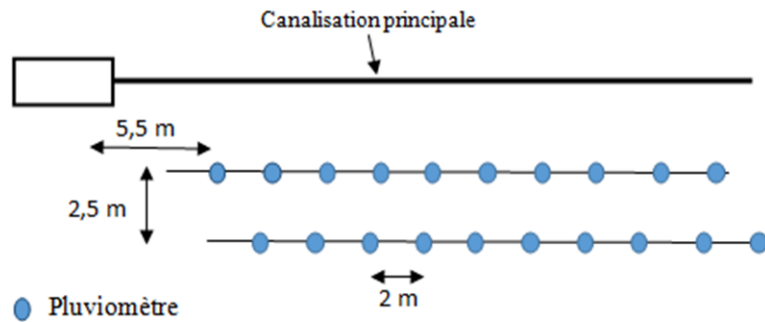
Tableau 3. Disposition expérimentale des pluviomètres respectivement sous le pivot et sous la rampe frontale suivant la Norme ISO 11545 [19] et la Norme ASAE [21]

Disposition expérimentale des pluviomètres

Sous le pivot



Sous la rampe frontale



2.4. Détermination du coefficient d'uniformité

2.4.1. Coefficient d'uniformité surfacique

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, ...) du système d'irrigation [28]. La définition utilisée par CHRISTIANSEN [29] pour évaluer l'uniformité de l'irrigation par aspersion demeure la plus utilisée dans l'évaluation de l'uniformité d'irrigation moyennant le coefficient d'uniformité, qui s'exprime comme suit.

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

Avec :

Cu : Coefficient d'uniformité (%)

V_i : Volume d'eau 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)

2.4.2. Coefficient d'uniformité radial

L'uniformité sous pivot est appréciée par la formule de HERMANN ET HEIN [30] selon ISO 11545 [19].

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

Avec :

CUH : 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 recueilli dans l'ième collecteur

S_i : Distance séparant l'ième collecteur du point de pivot

2.4.3. Coefficient d'uniformité globale du pivot

Le coefficient d'uniformité globale pour le pivot est le produit de l'uniformité radiale par l'uniformité circulaire (ou surfacique). Pour déterminer ce terme, on a décidé d'adopter une procédure expérimentale, au lieu de recourir aux formules de calcul. Dans ce cadre, on a limité l'essai 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 témoins.

3. Résultats et discussion

3.1. Appréciation générale

Souvent, une rampe simple est équipée du même type de buse et une rampe combinée possède un double busage, l'un fonctionnant en mode pivot et l'autre en mode rampe, grâce à des électrovannes, tandis que, dans notre cas d'étude, la machine combinée possède un seul plan de busage à double fonction. Les buses de base sont celles du pivot. Ensuite, on a essayé de monter des buses que l'on peut nommer d'adaptation, équipées d'électrovannes, qui vont s'ouvrir pendant le fonctionnement en mode rampe frontale. Dans les deux cas de fonctionnement de la machine combinée étudiée, on peut dire que les buses sont en bon état de fonctionnement sur toute la longueur de la rampe, car les débits des buses annoncés par le constructeur et ceux mesurés présentent un faible écart habituellement attribué aux erreurs de mesure.

Le respect du plan de busage donné par le constructeur et l'adoption d'un programme d'entretien approprié, au moins une fois par an [31], permettent d'assurer un fonctionnement adéquat des systèmes d'aspersion mécanisée mis en œuvre, et éventuellement, d'améliorer l'uniformité de la distribution des eaux d'irrigation [32]. Lors de cette étude, le diagnostic de fonctionnement a montré que le pivot, la rampe frontale et la rampe combinée sont en bon état de fonctionnement, étant donné que, dans l'ensemble, le plan de busage est bien appliqué, toutefois, il convient de signaler qu'après avoir examiné le plan de busage du pivot étudié, on a remplacé trois buses par d'autres procurées à partir d'autres pivots. Concernant la rampe frontale simple, toutes les buses ont donné des débits conformes.

3.2. Variante 1 : Comparaison du pivot simple avec mode pivot combiné

3.2.1. Effet du vent sur la qualité d'arrosage

L'analyse de la variation de la pluviométrie engendrée par les deux modes simple et combiné à l'égard des deux vitesses différentes du vent (vent faible et vent fort), a montré une même répercussion : répartition relativement homogène sous vent faible et hétérogène sous vent fort (tableau 4). Cependant, l'effet du vent sur la variation du coefficient d'uniformité (tableau 5) a dévoilé une détérioration du coefficient d'uniformité de l'ordre de 3% dans le cas du mode simple par rapport à une diminution de 5,5% dans le cas combiné, sous l'effet de l'augmentation de la vitesse du vent. Le meilleur coefficient d'uniformité correspond évidemment à une vitesse faible. D'où, le pivot simple est moins sensible au vent.

Tableau 4 : Effet de la variation de la vitesse du vent sur la pluviométrie (Variante 1)

Tests à pression constante	Répartition pluviométrique	
	Vent faible	Vent fort
Rampe pivotante simple	Variation faible entre les deux rayons	Dispersion remarquable entre les deux rayons
Mode pivot rampe combinée	Variation quasiment faible sur la ligne des moyennes pluviométriques	Forte dispersion entre les différents points d'une même ligne

Tableau 5 : Variation du coefficient d'uniformité en fonction du vent (Variante 1)

Tests à pression constante	Coefficient d'uniformité (%)	
	Vent faible	Vent fort
Rampe pivotante simple	91,0	88,0
Mode pivot rampe combinée	91,8	86,3

3.2.2. Effet de la pression de fonctionnement sur la qualité d'arrosage

Dans le cas du mode pivot combiné, on a noté un passage du coefficient d'uniformité d'une valeur de 88,9% pour une pression de 1,6 bars à une valeur de 91,9% pour une pression de 3,5 bars. On peut ainsi suggérer une faible sensibilité du coefficient d'uniformité à la variation de la pression de fonctionnement.

D'après les résultats obtenus sur le pivot simple, une légère diminution de pression de 1,4 bars à 1,0 bar, a engendré une réduction du coefficient d'uniformité de 5%. On peut dire qu'il y a sensibilité du coefficient d'uniformité à partir d'une certaine pression de fonctionnement jugée faible (<1,4 bars).

Le tableau 6 montre que sous le même vent, le mode simple est moins exigeant en énergie, puisqu'il assure un bon fonctionnement, même avec une pression faible. En effet, pour le mode simple sous une pression de 1,4 bars, on a relevé un coefficient d'uniformité similaire à celui enregistré pour le mode combiné sous une pression de 1,6 bars.

On peut ainsi conclure que le pivot simple est plus performant que le pivot d'une rampe combinée, vu qu'il est moins sensible au vent et moins exigeant en énergie.

Tableau 6. Effet de la variation de la pression de service sur le coefficient d'uniformité (Variante 1)

Vitesse du vent = 3,5 m/s	Coefficient d'uniformité (%)	
	Pression = 1,4 bars	Pression = 1,6 bars
Rampe pivotante simple	89,0	-
Mode pivot rampe combinée	-	88,9

3.3. Variante 2 : Comparaison de la rampe frontale simple avec mode frontal combiné

3.3.1 Effet du vent sur la qualité d'arrosage

Dans le cas du mode frontal de la rampe combinée, la variation de la vitesse du vent sur la répartition pluviométrique à pression identique (tableau 7), a montré une chute de la pluviométrie dans le cas d'un vent fort, alors que le fonctionnement de la rampe frontale simple est légèrement sensible au vent.

Tableau 7. Effet de la variation de la vitesse du vent sur la pluviométrie (Variante 2)

Tests à pression constante	Répartition pluviométrique	
	Vent faible	Vent fort
Rampe frontale simple	Homogène avec dose moyenne de 15 mm	Relativement homogène, tout en s'éloignant légèrement de la dose moyenne
Mode frontal rampe combinée	Homogène avec dose moyenne de 10 mm	Dispersée entre les différentes zones irriguées

Le coefficient d'uniformité (tableau 8), en cas du mode frontal combiné, s'est bien abaissé sous l'effet de l'augmentation de la vitesse du vent. La dégradation (de l'ordre de 7%) est considérée peu importante. Ce coefficient, en cas de la rampe frontale simple, a vécu une décroissance moins importante (d'environ 5%). On peut encore continuer l'irrigation avec un coefficient d'uniformité aussi élevé (de l'ordre de 90%), ce qui donne la possibilité d'irriguer même avec une vitesse du vent un peu plus élevée.

Ainsi, on peut dire que la rampe frontale d'une machine combinée est plus sensible au vent que la rampe frontale indépendante, vu qu'elle présente une dégradation du coefficient d'uniformité plus importante. Aussi, l'indice d'uniformité dans les conditions ventées pour la rampe frontale indépendante est plus élevé que celui relevé pour la rampe frontale combinée.

Tableau 8. Variation du coefficient d'uniformité en fonction du vent (Variante 2)

Tests à pression constante	Coefficient d'uniformité (%)	
	Vent faible	Vent fort
Rampe frontale simple	94,8	89,6
Mode frontal rampe combinée	90,3	86,3

3.3.2 Effet de la pression de fonctionnement sur la qualité d'arrosage

Généralement, une augmentation de la pression de fonctionnement entraîne une augmentation du volume d'eau délivré. Le coefficient d'uniformité est directement influençable par la variation de cette pression [31].

Les résultats de mesure de la répartition pluviométrique ont dévoilé que la variation de la pression est pratiquement sans effet sur la moyenne pluviométrique délivrée par les deux types de machines d'aspersion

mécanisée (simple et combiné). Ceci pourrait être également expliqué par l'existence d'un régulateur de pression au niveau de chaque buse.

Tableau 9. Effet de la variation de la pression de fonctionnement sur le coefficient d'uniformité (Variante 2)

Tests par temps calme	Coefficient d'uniformité (%)	
	Pression faible	Pression plus élevée
Mode frontal rampe combinée	89,9	90,7
Rampe frontale simple	93,5	96,7

Néanmoins, dans le cas de la rampe frontale simple, l'accroissement de la pression entraîne une augmentation du coefficient d'uniformité (tableau 9) qui passe de 93,5% pour une pression de 1,8 bars à 96,7% pour une pression de 3,5 bars. En contrepartie, dans le cas du mode combiné, cet accroissement engendre une légère incidence sur le coefficient d'uniformité.

On peut exprimer que la rampe frontale simple est la moins exigeante en énergie, vu que le coefficient d'uniformité reste énormément élevé, même avec une pression de fonctionnement considérée faible (de l'ordre de 1,8 bars dans le cas présent). On peut, en conséquence, arroser à faible pression pour économiser l'énergie.

4. Conclusion

Les rampes d'arrosage sont des systèmes mécanisés modernes d'aspersion, adoptés en agriculture irriguée pour mieux exploiter les ressources hydriques, dans les régions arides et semi-arides pour notamment les grandes cultures. L'examen diagnostique sur des rampes pivotantes simple, frontale simple et combinée (pivotante/frontale), adoptées au Nord et au Nord-Ouest de la Tunisie, a révélé un bon état de fonctionnement des trois machines mises à l'essai. L'étude comparative entreprise au niveau de ces machines, selon les deux variantes considérées (pivot simple avec mode pivot combiné et rampe frontale simple avec mode frontal combiné), a dévoilé des performances en faveur du mode simple par rapport au mode combiné. En effet, les rampes simples pivotante et frontale, se sont montrées moins sensibles au vent et moins exigeantes en énergie que respectivement le mode pivot combiné et le mode frontal combiné. De tels résultats ont été enregistrés, aussi bien sur le plan distribution pluviométrique que sur le plan coefficient d'uniformité dans des gammes voisines de vent et de pression. Dans l'ensemble, l'aspersion mécanisée de l'eau par rampe simple (pivotante ou frontale) a permis d'avoir une irrigation plus uniforme que celle opérée par une rampe combinée. L'aspersion mécanisée par rampe combinée se caractérise par sa complexité et par le manque de soutien d'une irrigation persévérante dans les régions à vocation céréalière.

Irrémédiablement, en raison des conditions expérimentales relativement différentes d'un site d'étude à l'autre, il serait souhaitable de poursuivre les investigations, en expérimentant les trois systèmes d'aspersion mécanisés sur chaque site d'étude considéré, tout en variant autant que possible les conditions pédoclimatiques. De même, il convient de procéder sur des machines pleinement neuves, en vue de conduire des comparaisons plus objectives, pouvant mieux orienter les agriculteurs dans leur choix. Un tel exercice, largement pénible demandant déplacement-montage-démontage-déplacement-remontage des installations à comparer, reste

indispensable pour une meilleure évaluation comparée des performances du matériel, tout en rajoutant d'autres paramètres à étudier, entre autres, vitesse d'avancement de la rampe.

Références

1. B. Douh, A. Boujelben. « Water saving and eggplant response to subsurface drip irrigation » ; **Agricultural Segment Journal**, 1 (2), AGS/1525, 12 (2010). <http://segmentjournals.com/?id=1525>
2. . S. Bhourri Khila, B. Douh, A. Mguidiche, A. Boujelben. « Synthèse des principaux indicateurs de performance des systèmes irrigués » ; Larhyss Journal, n°24, (2015) 263-279.
3. Ministère de l'Agriculture. « Rapport de la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) », **Tunisie**, 23 (1994).
4. Jt. Musick, Or. Jones, B. Stewart, Da. Dusek. « Water-yield relationship for irrigated and dry land wheat in the US southern plains ». **Agron. J.**, 86, 980-986 (1994).
5. N. Katerji, M. Mastrorilli, G. Rana. « Water use efficiency of crops cultivated in the Mediterranean region: Review and analysis »; **European Journal of Agronomy**, 28, 493-507 (2008).
6. F. Lebdi. « Contraintes de l'agriculture irriguée aux opportunités du marché Cas de la Tunisie ». **Les Notes d'Analyse du Ciheam**, 51, 83 (2009).
7. J. Louis Jean. « Étude de faisabilité de l'aménagement hydro-agricole de la plaine de Lhomond dans la 11ème section communale d'Aquin : zone Frangipagne»; **Mémoire de Fin d'Études, Université d'Etat d'Haïti (UEH)**, 60 (2009)
8. C. Olier, M. Poirée. « Irrigation : Les réseaux d'irrigation, théorie, technique et économie des arrosages » ; **édition Eyrolles, France**, 380-407 (1983).
9. C. Brouwer, K. Prins, M. Kay, M. Heibloem. « Manuel de formation, Méthodes d'irrigation, Irrigation par aspersion » ; **édition FAO**, 33-37 (1990).
10. JC. 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, 260 (2001).
11. Azougagh M. « Matériel d'irrigation : choix, utilisation et entretien » ; Bulletin Mensuel de Liaison et d'Information du PNTTA Transfert de Technologie en Agriculture, Sommaire n°81, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Maroc, (2001) 6 p.
12. CEMAGREF. « Collection Guide Pratique : Irrigation, Ouvrage Collectif », (1992) 324 p.
13. Ministère de L'Équipement de L'Aménagement du Territoire et du Développement Durable. « Atlas de gouvernorat de Ben Arous » ; **Tunisie**, 73 (2012).
14. MEDD. « Indicateurs Régionaux d'amélioration des conditions de vie » ; Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD), **République Tunisienne**, 161 (2007).
15. Souissi M. « Situation géographique de Béja, Ministère de l'Intérieur et du Développement Local, Observatoire SERVAGRI », (sd) 16 p.
16. Ministère de l'Équipement de l'Aménagement du Territoire et du Développement Durable. « Atlas Numérique du Gouvernorat de Béja » ; **Tunisie**, 106 (2016).
17. Ministère du Transport et de l'Équipement. « Atlas du Gouvernorat de Mannouba » ; Direction Générale de l'Aménagement du Territoire, Tunisie, 109 (2011).

18. APII « Études et Monographies, Monographie Régionale, Gouvernorat Mannouba » ; Agence de Promotion de l'Industrie et de l'Innovation (APII) Direction Régionale de Mannouba, (2015) <http://www.tunisieindustrie.nat.tn/fr/doc.asp?docid=598&mcat=13&mrub=105>
19. ISO «Agricultural irrigation equipment Center pivot and moving lateral irrigation machines with sprayer or sprinkler nozzles. **Determination of uniformity of water distribution** », 24 (2001).
20. ISO « Agricultural irrigation equipment - Rotating sprinklers - Part 1. **Design and operational requirements** » 12 (1995).
21. 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).** http://msue.anr.msu.edu/uploads/236/43605/ASAE_S436.1.pdf
22. LINDSAY « Solutions d'irrigation : produits. Pivots fixes ». <http://www.lindsayeuropefr.com/pivots-fixes>
23. VALLEY « Produits pour l'irrigation : Rampes Frontales ». http://www.valleyirrigation.com/valley-irrigation/fr/informations_soci%C3%A9t%C3%A9/historique
24. BAUER « Produits – IRRIGATION : Systèmes PIVOT/Rampes frontales ». <http://www.bauer-at.com/fr/produits/irrigation/systemes-pivot-rampes-frontales>
25. BAUER « BAUER - PIVOT / LINEAR. Instructions de service pour BAUER - CENTERSTAR 9000 » ; (2013) 104 p. <http://www.bauer-at.com/fr/downloads/produits/irrigation>
26. Nadon S, Bergeron D, Boivin C, Vallee J. « 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 pour RLIO, IRDA, Québec, Canada, 59 (2016).**
27. Saidi M.E., sd. Pluviométrie et intensités des précipitations. PPT, 19 Diapositives. www.saidi.ma/gc/5-pluviometrie.pdf
28. TA. Howell. « Irrigation efficiency ». In: STEWART BA. and HOWELL TA. (Eds.) **Encyclopedia of Water Science, Marcel-Dekker, Inc. 467-472 (2003)**
29. Christiansen JE. « Irrigation by Sprinkling » ; Bulletin 670, University of California, College of Agriculture, Agricultural Experiment Station, Berkeley, California, USA, (1942) p. 124.
30. DF. Heermann, R. Hein. « Performance characteristics of self-propelled center pivot sprinkler irrigation system ». **Transactions of the ASAE 11(1), 11-15 (1968).**
31. 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.**
32. M'Sadak Y, Douh B, Hamza ME. « Diagnostic de fonctionnement des systèmes d'aspersion par pivot utilisés dans une grande exploitation irriguée de la Tunisie centrale ». **Larhyss Journal, n°11, 97-107 (2012).**

(2017) ; <http://revues.imist.ma/?journal=mjpas&page=index>