

Évaluation de la productivité du chou pommé (*Brassica oleracea*), sous l'effet de l'irrigation avec une eau traitée magnétiquement, dans la région de Casablanca (Maroc)

H. TAIMOURYA¹, E.H. BOURARACH², A. EL HARIF³, N. HASSANAIN⁴, L. MASMOUDI³,

L. BAAMAL⁶, M. OUSSIBLE¹

(Reçu le 28/03/2015; Accepté le 07/04/2015)

Résumé

Le traitement de l'eau par un champ magnétique statique a montré des effets positifs comme la stimulation de la croissance et l'amélioration de la production des plantes, tout en respectant l'environnement. En vue de quantifier l'effet de l'application de cette technologie sur la production végétale dans les conditions de production marocaines, une expérimentation a été conduite au champ, pendant 2 campagnes (2012 et 2013) dans une exploitation située dans la région de Chaouia-Ouardigha. Les plantes de chou (*Brassica Oleracea*), irriguées par une eau traitée magnétiquement, étaient suivies à travers les mesures des paramètres de croissance végétale et de production (hauteur, circonférence, poids et rendement). L'analyse des résultats montre une amélioration persistante et hautement significative à travers une augmentation de la croissance en hauteur de l'ordre de 27,3% et 26,1%, une augmentation de la circonférence de la pomme de 22,7% et 19,3%, un gain en poids de 27,9% et 24,3% et une augmentation du rendement de 28,9% et 22,9% respectivement pour les deux campagnes. Cette technologie abordable ouvre la voie à des traitements spécifiques utilisant les propriétés électromagnétiques de l'eau.

Mots-clés: Technologie magnétique, Eau d'irrigation, Champ magnétique, Chou.

Abstract

Treatment of water by a static magnetic field showed positive effects such as stimulation of growth and the improvement of the production of plants, while respecting the environment. To quantify the effect of the application of this technology on crop production in Moroccan production conditions, an field experiment was conducted during 2 years (2012-2013) on a farm located in the Chaouia-Ouardigha region. Cabbage plants (*Brassica Oleracea*), irrigated by magnetically treated water were monitored through measurement of growth and production parameters (height, circumference, weight and yield). Analysis of the results showed a persistent and highly significant improvement through an increase in height in the order of 27.3% and 26.1%, an increase in the circumference of 22.7% and 19.3%, a gain in weight of 27.9% and 24.3% and an increase in yield of 28.9% and 22.9% respectively for the two seasons. This affordable technology opens the way for specific treatments using the electromagnetic properties of the water.

Keywords: Magnetic technology, Irrigation water, Magnetic field, Cabbage.

INTRODUCTION

Au Maroc, la disponibilité des ressources en eau représente un enjeu important dans le domaine de l'agriculture, l'industrie et l'eau potable. Il est à signaler que l'agriculture représente au Maroc l'activité la plus consommatrice d'eau, avec 80% de la consommation nationale totale (MAPM, 2011). Cependant, la rareté des ressources en eau, aussi bien en qualité et qu'en quantité, ainsi que sa répartition dans le temps et l'espace, sont parmi les principaux facteurs qui limitent le développement de l'agriculture marocaine. Ce problème s'intensifie avec les récents changements climatiques. En effet, la recherche s'oriente de plus en plus vers des stratégies qui visent la

préservation, la conservation et la valorisation aussi bien de la quantité que la qualité de ces ressources en eau, voire des innovations susceptibles d'améliorer l'efficacité et la productivité de l'eau d'irrigation.

Afin de répondre à ce besoin urgent d'économie de l'eau, de nouvelles techniques d'irrigation ont permis de passer des systèmes gravitaire et aspersion au système localisé. Ce dernier, subventionné par l'État, connaît actuellement une très large et rapide adoption par les agriculteurs dans les différents périmètres irrigués du Maroc (plus de 360.000 ha ont été équipés en goutte à goutte à fin 2013, alors qu'il a été prévu d'atteindre plus de 410.000 ha à la fin de l'année 2014 (Agriculture du Maghreb, avril 2014)).

¹ Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Département de production, protection et biotechnologie végétales, Rabat

² Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Département Énergie et Agro-équipement, Rabat

³ Université Mohammed V, Faculté des sciences, Département de Physique, Rabat

⁴ École le Normale Supérieure de l'Enseignement Technique, Rabat

⁶ Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Département de Statistiques et Informatiques appliquées, Rabat

Il est important de noter que l'utilisation de cette dernière technique en milieux arides et semi-arides peut, à moyen terme, favoriser la salinisation des sols au niveau des horizons superficiels.

En plus de ces techniques, la littérature rapporte la disponibilité d'une technique simple et facile d'utilisation par les agriculteurs pour améliorer les rendements (Lin, 1989). Il s'agit de la technologie du magnétisme basée sur l'exposition de l'eau d'irrigation à un champ magnétique statique. Différents chercheurs (Hameda, 2014; Shabrangi, 2009) ont rapporté que ce simple traitement physique de l'eau stimule la croissance des plantes, d'une manière saine biologiquement et sans porter préjudice à l'environnement. Ce champ magnétique peut être utilisé comme alternative à d'autres techniques polluantes.

Depuis de nombreuses années, les effets des champs magnétiques sur l'eau ont été l'objet d'intérêt des physiciens, des chimistes et des biologistes (Parsons, 1997). Smirnov (2003) a déclaré que l'eau en tant que conducteur d'ondes électromagnétiques peut recevoir des signaux émis par des forces magnétiques et devient donc le médiateur entre la source de champ magnétique et la plante. Ces résultats sont approuvés par Pang (2008) qui a ajouté que l'application d'un champ magnétique crée des changements dans les propriétés physiques et chimiques de l'eau aux échelles microscopique et macroscopique. De plus, Cai (2009) a expliqué ces changements par la formation d'un grand nombre de liaisons hydrogène. De nos jours, le traitement magnétique intéresse plusieurs secteurs d'activités tels que la santé, l'environnement, l'industrie, etc. Plus particulièrement, nous ciblons ses applications dans l'agriculture.

Certains auteurs réclament des effets favorables de la technologie du magnétisme sur les effets de l'eau comme l'élimination des dépôts calcaires (Chibowski, 2003; Alimi, 2006) dans les conduites d'eau, l'amélioration du taux de la germination et la stimulation de la croissance (Shabrangi, 2009). Il faut cependant noter que l'application en agriculture de cette technologie de magnétisme peut avoir lieu soit en exposant directement des organes de la plante (comme les semences) au champ magnétique (Flores, 2007), ce qui est justifié par la présence des propriétés paramagnétiques dans le chloroplaste, ou via une exposition de l'eau d'irrigation à ce champ magnétique (Hozayn, 2010). Cette amélioration peut être attribuée à la formation des nouvelles bandes de protéines (Hozayn, 2010). D'autre part, Çelik (2008) et Shabrang (2009) ont rapporté que ce traitement physique affecte l'expression génétique en augmentant les réactions biologiques comme la synthèse des protéines. Généralement, les rapports de la littérature montrent une possibilité que ce traitement physique de l'eau peut avoir des effets bénéfiques sur la productivité de l'eau ainsi

que sur les paramètres de croissance des plantes, rendant ainsi l'eau un facteur moins limitant pour la production. Pourtant, les explications du mécanisme d'action de ce traitement restent hypothétiques et restreintes. Il faut signaler que les recherches orientées dans ce cadre restent très limitées.

L'objectif de notre étude est de quantifier l'impact de l'application de cette nouvelle technologie sur la production végétale dans les conditions de production marocaines. Le présent travail vise également l'approfondissement des travaux préliminaires conduits en partenariat par des chercheurs de l'IAV Hassan II et la Faculté des Sciences de Rabat. Ces travaux ont montré un effet favorable de la technologie magnétique dans la phase germination-levée, en milieu contrôlé, sur des semences de la courgette verte et du melon (Taimourya, 2009).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Conditions pédo-climatiques du site expérimental

L'essai a été conduit dans l'exploitation de M. Hajji Miloud située à douar Ouled Ben Amour dans la caïdat d'Ouled Ziane au cercle d'El Gara de la région de Chaouia-Ouardigha à 12 Km du centre-ville de Berrechid. Ce site se trouve à une altitude de 206 m au-dessus de la mer, une latitude de 33°22' Nord et une longitude de 7°32' Ouest.

Le climat de la zone d'étude est semi-aride (Haddoudi, 2013) influencé par l'océan Atlantique, avec des hivers tempérés et des étés assez chauds et secs. Cette zone connaît une irrégularité de la pluviométrie dans le temps et dans l'espace. Les précipitations moyennes annuelles enregistrent des valeurs de 366 mm (centre des travaux de Berrechid, 2014). La durée annuelle d'ensoleillement dépasse 2800 heures, l'hygrométrie moyenne annuelle est d'environ 60 à 75 % et l'évaporation annuelle atteint 1500 mm avec des valeurs journalières variant de 2 à 7 mm selon les saisons. Les températures moyennes varient entre 11°C et 25°C; les gelées sont exceptionnelles alors que les températures maximales absolues peuvent atteindre 50°C lorsque souffle le chergui (El Assaoui, 2009). Cette zone est caractérisée par une sécheresse qui s'étale sur une période de cinq mois sur douze (mai - septembre). Elle est définie par l'irrégularité et la fluctuation des précipitations en termes de quantités.

Une analyse granulométrique et chimique du sol des deux parcelles d'expérimentation choisies pour les deux campagnes (en prélevant à l'aide d'une tarière des échantillons de sol à une profondeur de 30 cm), effectuée au laboratoire du département des sciences du sol de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, montre que les deux parcelles sont de type limoneux fins (Tableau 1).

Tableau 1: Texture du sol des deux parcelles expérimentales

	Profondeur	Argile	Limon fin	Limon grossier	Limon totaux	Sable fin	Sable grossier	Sables totaux
	cm	%						
Parcelle I	0-25	1,7	48,4	27,6	76,0	20,7	1,6	22,3
Parcelle II		2,2	44,9	28,6	73,5	22,5	1,8	24,3

En termes de fertilité, ces parcelles ont des caractéristiques identiques à savoir, un pH alcalin, une faible teneur en matière organique, des réserves très soutenues en potassium, des fortes réserves en phosphore et des réserves excessives en magnésium (Tableau 2). La mesure de la conductivité montre qu'il n'y a pas de risque de salinité. Ce type de sol est favorable à la culture de chou (Hallouin, 2013).

La conduite technique de la culture et le matériel végétal

- Le précédent cultural pour les deux parcelles d'expérimentation est la pomme de terre (variété: *Désirée*).
- Le travail du sol est effectué, avant la plantation, pour permettre une bonne aération du sol, une bonne circulation de l'eau et garantir un bon enracinement des cultures; à savoir: un passage du cover-crop suivi par un passage à la herse à dent pour la préparation du lit de semence.
- Le matériel végétal des deux essais est composé de la variété *SANTOS*.
- L'étude est menée pendant deux campagnes (juillet-septembre 2012 et octobre 2013 - janvier 2014).
- Le semis du chou en mottes est réalisé dans la pépinière (Tableau 3). Le nombre de jours nécessaires avant plantation sous des conditions optimales de croissance est de l'ordre de 35-40 jours, au stade 3 à 4 feuilles.
- La plantation est réalisée manuellement. Les plants sont repiqués en plein champ, en rangs simples. Ils sont plantés à plat manuellement, en enterrant les plants jusqu'au dessus du collet, et puis ils sont buttés tout en laissant un espace de 30 cm entre plants et 80 cm entre rangs.
- Le désherbage et le buttage des plantes: après la plantation, des buttages réguliers ont eu lieu avant le développement complet des plantes pour renforcer l'ancrage de ces plantes et pour assurer l'aération du sol. Le désherbage est effectué à la houe, en vue d'entretenir la propreté de la parcelle.
- La récolte est manuelle. Les choux cabus sont récoltés lorsqu'ils ont atteint la taille d'une belle pomme rigide et avant que les feuilles ne commencent à jaunir.

Tableau 2: Une analyse chimique du sol des deux parcelles d'expérimentation désignées pour les deux campagnes (parcelle I: campagne de juillet au septembre 2012 et parcelle II: campagne d'octobre 2013 au janvier 2014)

	pH	Matière organique	Calcaire total	Calcaire actif	Conductivité	Potasse	Phosphore	Azote ammoniacal	Azote nitrique
		MO	CaCO ₃ total	CaCO ₃ actif		K ₂ O	P ₂ O ₅	N-NH ₄	N-NO ₃
		%				CE	K	P	N-NH ₄
Parcelle I	7,55	2,26	0,20	Traces	0,27	707	118	3,8	6,1
Parcelle II	7,15	2,13	0,36		0,23	719	98	3,8	6,1

Tableau 3: Les créneaux de la conduite technique de la culture du chou

Conduite technique	Campagne I	Campagne II
Durée du cycle	Juillet 2012 - Septembre 2012	Octobre 2013 - Janvier 2014
Semis	05/06/2012	14/08/2013
Plantation	15/07/2012	23/09/2013
Désherbage	24/08/2012	08/11/2013
Récolte	25/09/2012	07/01/2014

L'irrigation

L'eau utilisée pour l'irrigation est l'eau de puits. Elle s'agit d'une eau légèrement alcaline (pH= 7,4), riche en minéraux (elle contient un résidu sec de 2,05 g/l) et dont la teneur en électro-conductivité révèle une charge très élevée en sels dissous (une conductivité électrique = 3,21 mS/cm). Alors, cette eau présente un risque de salinisation très élevé et des risques forts d'alcalinisation.

La méthode adoptée pour l'irrigation est le goutte à goutte puisqu'elle permet de toujours conserver le sol frais au pied des choux. Les besoins hydriques/cycle du chou se situent entre 300 et 400 mm pour des cycles de culture variant de 90 à 120 jours.

Le jour de la plantation, avant le repiquage des plants, la parcelle est irriguée pendant une durée de 6 h en vue d'assurer une bonne reprise des plantes. La parcelle est irriguée dès le troisième jour après plantation, avec une fréquence normale de 3 J et une durée pouvant varier de 1 h à 3 h. La fréquence et la durée de l'irrigation sont adaptées aux températures ambiantes.

Les traitements

L'objectif du présent travail est d'étudier *in situ* les effets de l'application de la technologie de traitement de l'eau par un champ magnétique statique sur la croissance et le développement des cultures tout en étudiant son impact sur la production végétale.

Pour atteindre cet objectif, l'étude expérimentale a examiné la différence entre deux traitements:

Le premier traitement (T1): l'eau de puits est traitée physiquement en l'exposant à un champ magnétique créé à l'intérieur d'un Magnétiseur commercial à base de NdFeB, produit par la société «MagneticTechnologies LLC» (Figure 1). L'eau est traitée en passant (une seule fois) à travers le Magnétiseur. Ce Magnétiseur est installé en amont de la parcelle traitée. Ainsi, l'eau qui circule dans les goutteurs se trouve déjà traitée. Le débit de ce Magnétiseur est suffisant pour ne pas modifier la pression des goutteurs en comparaison avec la parcelle témoin.

Le deuxième traitement (T2): la même eau qu'en T1 est utilisée pour l'irrigation goutte à goutte mais sans aucun traitement physique ou chimique. Celui-ci constitue le témoin.



Figure 1: Le Magnétiseur

Le protocole expérimental

Dans le but de comparer les deux traitements, nous avons adopté le dispositif décrit ci-dessous (Figure 2).

La superficie réservée à l'essai est de 2 ha. Cette superficie est divisée en deux parcelles de 1 ha chacune: parcelle I à laquelle on affecte le T1 et parcelle II à laquelle on affecte le T2. Chacune de ces deux parcelles a été divisée en trois sous-parcelles élémentaires de 35 m² (7 m de longueur sur 5 m de largeur), formant trois répétitions. L'espacement entre parcelles élémentaires a été fixé à 1 m.

Les points montrés sur le schéma ci-dessus représentent les points de contrôle. En se basant sur ces huit points de contrôle, nous avons suivi la croissance des plantes au niveau de chacune des six parcelles élémentaires. Ces points sont choisis de telle sorte que les pieds contrôlés se situent sur une ligne diagonale.

Sur le plan statistique, ce dispositif peut être analysé comme un dispositif complètement aléatoire avec un traitement (magnétisation) à deux niveaux et 3 répétitions (sous-parcelles). En effet, ce dispositif n'est pas, à proprement parler un dispositif complètement aléatoire, étant donné qu'en raison de contraintes pratiques, les

sous-parcelles magnétisées et non magnétisées ne sont pas réparties de manière aléatoire. Toutefois, étant donné qu'il n'y a pas de différence de fertilité entre les deux parcelles, le dispositif peut être analysé statistiquement comme un dispositif complètement aléatoire.

Les paramètres étudiés

L'étude de l'effet du traitement magnétique de l'eau d'irrigation sur la croissance, la production et la qualité du chou a porté sur des paramètres de croissance végétative et de production.

Les paramètres de croissance végétative

Ces paramètres sont mesurés pour la partie consommée (la pomme: feuilles empilées les unes sur les autres) de chaque point de contrôle mentionné sur le schéma du dispositif expérimental. La moyenne de ces valeurs est ensuite calculée:

- La hauteur moyenne des plantes (H, en cm) a été mesurée du collet à l'extrémité supérieure avec un mètre pliant, d'une manière régulière (chaque 10 j);
- La circonférence du chou pommé (C, en cm) a été mesurée d'une manière régulière et périodique (chaque 10 j) à l'aide d'un mètre ruban dès l'apparition de la pomme. Pour la première campagne, les mesures sont établies une semaine avant la récolte.

Les paramètres de production

Les mesures mentionnées ci-dessous sont prises le jour de la récolte:

- Le poids moyen d'un chou (Pds, en g): le poids d'un chou est pesé à l'aide d'une balance électronique de précision égale à 0,1 g;
- Le rendement (RdT, en t/ha): pour chaque traitement et répétition, le poids des choux récoltés est rapporté à la surface des parcelles élémentaires d'expérimentation. Cette valeur est exprimée en t/ha.

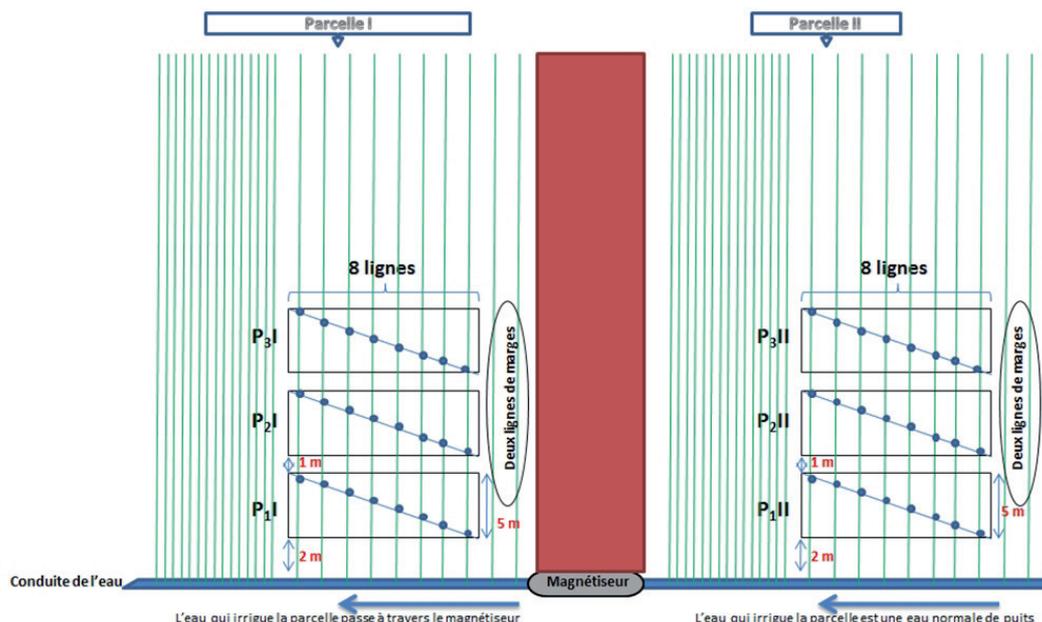


Figure 2: le schéma décrivant le dispositif expérimental

Pour étudier la différence entre les deux traitements, les résultats pour la première parcelle sont comparés avec ceux de la parcelle témoin.

L'analyse statistique

La saisie des données brutes a été effectuée sur le tableur Excel. Pour chaque paramètre étudié, nous avons calculé la moyenne des données collectées par parcelle élémentaire de chaque traitement.

Pour donner un aperçu global des données collectées, des statistiques descriptives (moyenne, écart-types, maximum, minimum,...) ont été effectuées. Par ailleurs, des courbes représentant l'évolution des paramètres en fonction du temps ont été réalisées.

Ensuite, l'effet du traitement magnétique a été étudié en réalisant une analyse de la variance à un critère de classification.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Paramètres de croissance

Au cours de l'expérimentation menée pendant les deux campagnes, les mesures prises montrent une augmentation significative au niveau de tous les paramètres de croissance mesurés due au traitement magnétique de l'eau.

La hauteur (H)

Les différentes moyennes de la hauteur calculée, pour les deux campagnes sont portées sur les tableaux 4 et 5.

La première campagne

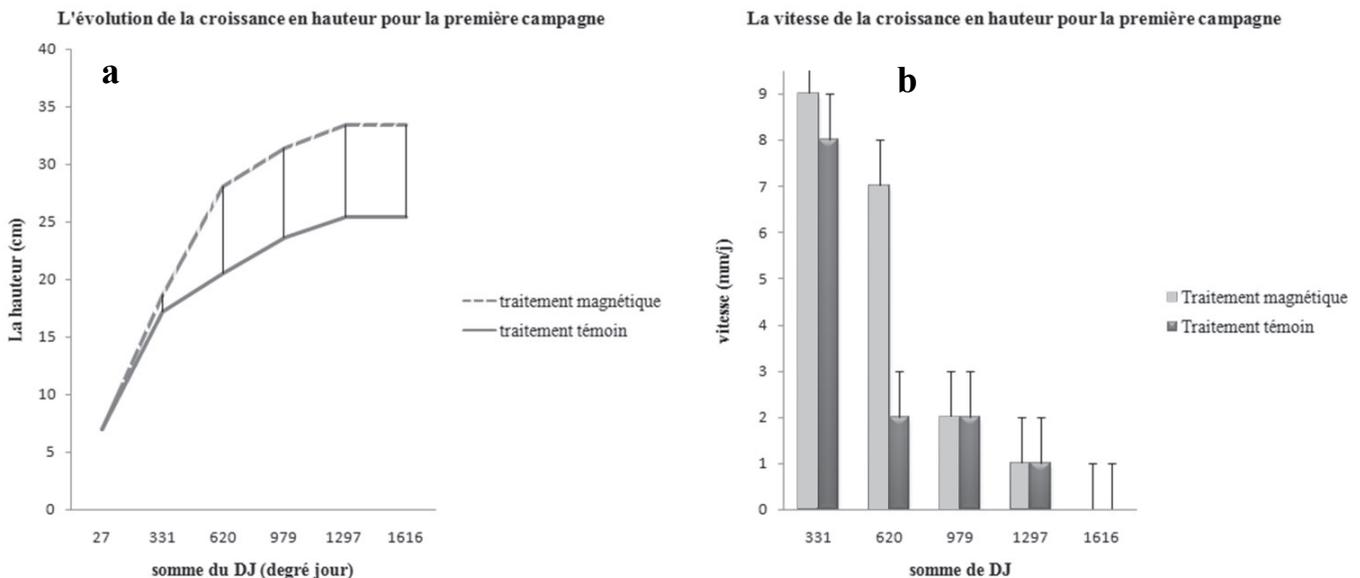
Les valeurs enregistrées montrent une augmentation de la croissance en hauteur des plantes irriguées avec une eau traitée pour les différentes prises effectuées. Ces améliorations sont de l'ordre de 27,3% en moyenne, mesurée sur 4 prises des données. L'analyse statistique montre que les différences sont significatives, voire très hautement significatives pour la majorité du cycle.

La plantation a été réalisée le 15/07/2012. Après 12 jours, les plantes de la parcelle irriguée par l'eau passant à travers le magnétiseur croissaient très rapidement par rapport au témoin. En effet, les plantes irriguées avec une eau traitée croissaient avec une vitesse moyenne de 7 mm/j alors que les plantes représentant le témoin croissaient avec une vitesse moyenne de 2 mm/j. Cependant, dès le 09/08/2012 (soit 40 jours après plantation), les deux courbes de croissance deviennent parallèles. Ce qui peut être expliqué par le fait que les plantes des deux parcelles croissaient d'une manière semblable comme si l'eau traitée ne réagit plus lors de ces derniers stades. Par conséquent, le traitement magnétique de l'eau influence positivement la croissance des plantes dans ses stades précoces.

Tableau 4: Hauteur (en cm) des plantes irriguées avec une eau traitée magnétiquement et une eau normale (première campagne)

	27/07/2012	09/08/2012	24/08/2012	07/09/2012
Traitement magnétique	18,5	28,0	31,4	33,4
Traitement témoin	17,2	20,4	23,6	25,4
Augmentation (%)	8,1*	37,0***	33,0***	31,4***

* Différence significative (p<0,05) , *** différence très hautement significative (p<0,001)



**Figure 3: a) L'évolution de la croissance en hauteur pour la première campagne
b) La vitesse de la croissance en hauteur pour la première campagne**

D'autre part, les plantes témoin ont atteint une hauteur maximale de 25,4 cm en 1297 DJ alors que les plantes irriguées avec une eau traitée ont eu besoin seulement de 600 DJ pour atteindre la même hauteur (Figure 3). Il est à signaler que ces dernières ont atteint une hauteur maximale de 33,4 cm en 1297 DJ.

La deuxième campagne

Les valeurs présentées au tableau 5, montrent également une augmentation en hauteur des plantes irriguées avec une eau traitée pour les différentes prises effectuées. Cette augmentation de hauteur est de 26,1% en moyenne, mesurée sur 4 prises des données, par rapport à la hauteur du témoin. L'analyse statistique montre que la différence est très hautement significative pour les 4 collectes.

La prise des données a débuté 14 jours après la plantation. On remarque d'après le graphe que la hauteur des plantes irriguées avec une eau traitée est supérieure à celle du témoin (Figure 4a). En effet, au début, les plantes irriguées avec l'eau soumise à un champ magnétique croissaient à une vitesse de 4 mm/j en comparaison avec 1 mm/j pour celles représentant le témoin (Figure 4b). Après, la vitesse de croissance s'est élevée pour les plantes des deux traitements, tout en restant supérieure pour les plantes de la parcelle traitée. Par la suite, les deux droites deviennent parallèles. Autrement dit, les plantes des deux parcelles croissaient avec la même vitesse.

Tableau 5: Hauteur (en cm) des plantes irriguées avec une eau traitée magnétiquement et une eau normale (deuxième campagne)

	07/10/2013	24/10/2013	08/11/2013	22/11/2013
Traitement magnétique	13,1	22,2	27,2	31,2
Traitement témoin	9,3	17,8	22,7	26,2
Augmentation (%)	41,9***	24,0***	19,8***	19,0***

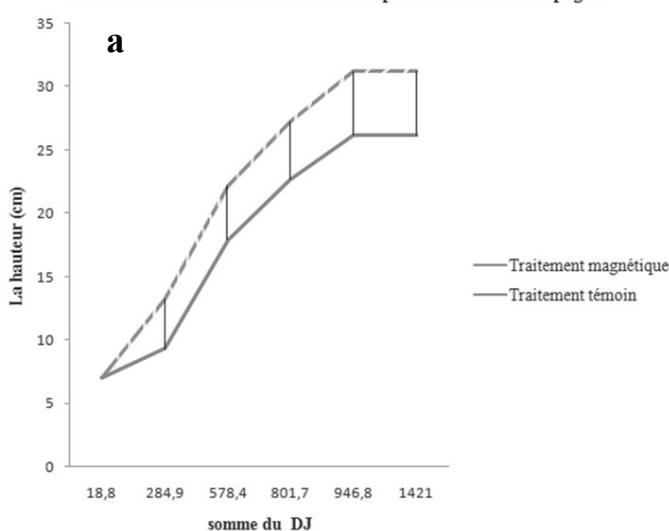
*** Différence très hautement significative $p < 0,001$.

D'autre part, on remarque que les plantes témoin ont atteint une hauteur maximale de 26,2 cm en 946,8 DJ alors que les plantes irriguées avec une eau traitée ont eu besoin seulement de 780 DJ pour atteindre la même hauteur (Figure 4a). Il est à signaler que ces dernières ont atteint une hauteur maximale de 31,2 cm en 946,8 DJ.

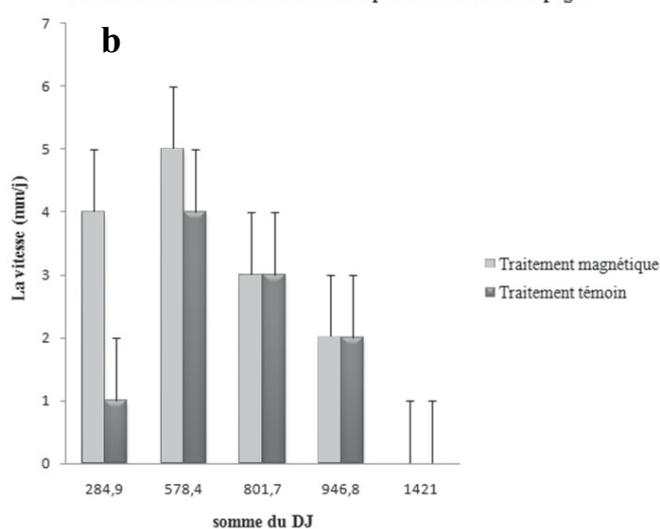
Discussion

On peut conclure que l'irrigation par une eau traitée par un champ magnétique statique a amélioré significativement la hauteur du chou. Nasher (2008) a trouvé dans ses recherches que les plantes du pois chiche irriguées avec une eau traitée magnétiquement sont plus hautes que celles irriguées avec une eau normale. La bibliographie a de même enregistré une amélioration significative en hauteur de 27,4%, 11,9%, 13,8% et 21,7% pour la fève, le pois chiche, le blé et la lentille respectivement (Hamed, 2014; Hozayn, 2010). En outre, Hamed (2014) a suggéré que l'amélioration de la croissance des feuilles et de la tige peut être liée à l'accélération de la croissance racinaire et la conductance stomatique. Dans ce même axe, il est observé aussi que les plantes réagissent à l'eau traitée en produisant plus de chevelu racinaire (Taimourya, 2009; Brissier, 2005).

L'évolution de la croissance en hauteur pour la deuxième campagne



La vitesse de la croissance en hauteur pour la deuxième campagne



**Figure 4: a) L'évolution de la croissance en hauteur pour la deuxième campagne
b) La vitesse de la croissance en hauteur pour la deuxième campagne**

Circonférence de la pomme (C)

Les différentes moyennes de la circonférence calculées, pour les deux campagnes sont mentionnées sur les tableaux 6 et 7.

La première campagne

Pour la première campagne, la circonférence du chou pommé est mesurée une semaine avant la récolte.

La valeur moyenne de la circonférence pour les pommes des choux irrigués avec une eau traitée par le magnétiseur est supérieure à celle du témoin. Cette hausse est de 22,7%. L'analyse statistique montre que la différence est très hautement significative (Tableau 6).

Deuxième campagne

Lors de la deuxième campagne, la circonférence de la pomme du chou est mesurée d'une manière régulière et périodique (chaque 10 j).

Les valeurs données dans le tableau 7 présentent de même une amélioration de la circonférence des pommes irriguées avec une eau traitée et ceci pour les différentes collectes effectuées. Cette différence est de 19,3% en moyenne au profit de l'irrigation à l'eau traitée magnétiquement mesurées sur 6 prises des données. L'analyse statistique montre que la différence est très hautement significative pour les 6 collectes.

Dès la première collecte des données, on remarque que la courbe, qui représente la variation de la circonférence de la pomme irriguée avec une eau traitée, est supérieure à celle qui représente le témoin, chose qui traduit une amélioration de la circonférence des pommes irriguées avec une eau traitée.

Discussion

On peut conclure que l'irrigation par une eau traitée par un champ magnétique statique a bien amélioré la circonférence de la pomme du chou. Les résultats de cette étude de l'effet de la technologie magnétique sur le calibre, conduite dans des conditions agronomiques marocaines, sont en accord avec la littérature sur d'autres cultures comme la laitue, le chou, le melon et la tomate (Lin, 1989) qui ont été justifiés par une meilleure assimilation des engrais. Sadeghipour (2013) a admis ce dernier résultat, en signalant que les effets consistants de l'eau traitée magnétiquement sur la croissance de la corneille induisent une amélioration des capacités d'absorption de l'eau et des nutriments. Un traitement de l'eau d'irrigation par un champ magnétique suffit pour affecter la croissance des organismes exposés à cette eau, comme dans le cas du céleri et du pois mange-tout (Maheshwari, 2009).

Paramètres de production

Les mesures des paramètres de production prises le jour de la récolte pour les deux campagnes (juillet-septembre 2012 et octobre 2013-janvier 2014) montrent une amélioration de la production pour les sous-parcelles irriguées à l'eau traitée.

Le poids moyen d'un chou (Pds)

Le poids de la pomme du chou est pesé le jour de la récolte.

La première campagne

L'essai a montré une augmentation du poids des pommes de 27,9% pour l'irrigation avec une eau traitée magnétiquement par rapport à celles irriguées avec une eau non traitée. L'analyse statistique montre que la différence est très hautement significative (Tableau 8).

Tableau 6: Circonférence moyenne des pommes des choux irrigués avec une eau traitée magnétiquement et une eau normale (première campagne)

	Traitement magnétique	Traitement témoin	Augmentation (%)
Circonférence (cm)	49,6	40,4	22,7***

*** Différence très hautement significative ($p < 0,001$).

Tableau 7: Circonférence des pommes des choux irrigués avec une eau traitée magnétiquement et une eau normale (deuxième campagne)

	15/11/2013	22/11/2013	29/11/2013	06/12/2013	20/12/2013	04/01/2014
Traitement magnétique	25,0	34,5	37,9	42,2	49,2	54,5
Traitement témoin	20,5	27,3	31,1	36,5	42,1	47,9
Augmentation (%)	21,8***	26,2***	21,8***	15,6***	17,1***	13,7***

*** Différence très hautement significative ($p < 0,001$).

Tableau 8: Poids moyen des pommes des choux irrigués avec une eau traitée magnétiquement et une eau normale (première campagne).

	Traitement magnétique	Traitement témoin	Augmentation (%)
Poids moyen (g)	1705,0	1332,6	27,9***

*** Différence très hautement significative ($p < 0,001$).

D'après le graphe, le poids minimal de la pomme irriguée avec une eau traitée est de 900 g, alors que pour le témoin il est de 240 g soit une amélioration qui dépasse le triple. D'autre part, le poids maximal de la pomme irriguée avec une eau traitée est de 3 kg tandis que le témoin ne dépasse pas 2,3 kg (Figure 5a).

La deuxième campagne

Le gain en poids, suite au traitement magnétique de l'eau, est de l'ordre de 24,3% par rapport au témoin (Tableau 9). L'analyse statistique montre que la différence est très hautement significative.

D'après le graphe, le poids maximal d'un chou irrigué avec une eau traitée magnétiquement est de 2,6 kg alors que pour le témoin il n'est que de 1,8 kg, soit une amélioration de l'ordre de 43,1% (Figure 5b).

Discussion

L'irrigation avec une eau traitée physiquement par un champ magnétique statique a significativement augmenté les paramètres de production. Dans ce sens, Reina (2001) a rapporté une augmentation significative de la vitesse d'absorption de l'eau ainsi que la masse totale de la laitue.

Le rendement (RdT)

Pour chaque parcelle élémentaire de 35m², nous avons mesuré en premier lieu l'ensemble des poids des pommes de chou récoltées pour chacune des six parcelles élémentaires. La moyenne calculée des trois sous-parcelles est donnée, pour les deux campagnes, en tonnes par hectare (Tableau 10).

On constate que le traitement magnétique de l'eau pour l'irrigation du chou apporte des augmentations de rendement importantes. En effet, cette nouvelle technologie conduit à un gain d'environ 15 t/ha pour la première campagne, soit une amélioration de 28,9 % de la production; le gain est de 12,5 t/ha pour la deuxième campagne soit une hausse de 22,9%.

Cette augmentation s'avère être statistiquement hautement significative pour la deuxième campagne, n'est pas considérée comme tel en ce qui concerne la première campagne et ce malgré un écart plus important entre les moyennes des traitements. Cette différence de conclusions peut être attribuée à la plus grande hétérogénéité des observations dans la première campagne, comme le révèle le coefficient de variation résiduel très élevé, agissant sur la puissance du test statistique et le rendant non significatif.

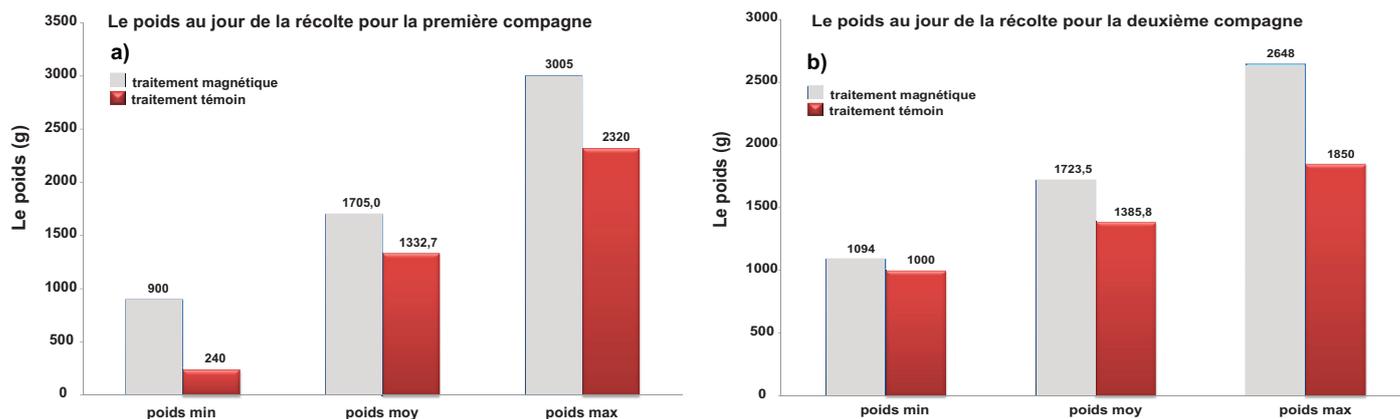


Figure 5: Le poids au jour de la récolte pour a) la première campagne et b) la deuxième campagne

Tableau 9: Poids moyen des pommes des choux irrigués avec une eau traitée magnétiquement et une eau normale (deuxième campagne)

	Traitement magnétique	Traitement témoin	Augmentation (%)
Poids moyen (g)	1723,5	1385,8	24,3***

*** Différence très hautement significative $P < 0,001$.

Tableau 10: Rendement en chou (T/ha) pour les parcelles irriguées avec une eau traitée magnétiquement et une eau normale

	Première campagne	Deuxième campagne
Traitement magnétique	66,2	66,9
Traitement témoin	51,3	54,4
Augmentation par rapport au témoin	28,9% NS	22,9%**
Coefficient de variation résiduel	12,03	3,01

NS : Différence non significative, **: différence hautement significative $p < 0,01$.

DISCUSSION

La bibliographie indique une augmentation du rendement de plusieurs cultures parmi lesquelles nous citons les céréales, le tournesol, le lin, le pois chiche, le blé, la tomate, le soja et la pomme de terre (Hozayn, 2010; Hameda, 2014). Maheshwari (2009) a étudié l'effet du traitement magnétique sur différents types d'eau d'irrigation, à savoir une eau recyclée et des eaux avec différentes teneurs en sel. Il a rapporté une augmentation significative du rendement cultural.

En complément aux résultats obtenus pour les différents paramètres étudiés, il est à noter que l'agriculteur a observé une différence au niveau de la qualité en faveur de cette technologie (couleur et fermeté). En plus, les pommes irriguées avec une eau traitée sont plus grosses et ont une apparence plus verte.

CONCLUSION

Le traitement physique de l'eau, par un champ magnétique statique, améliore la croissance des plantes avec un gain significatif de production et de rendement.

Il ressort des résultats d'essais et de la bibliographie que le traitement par un champ magnétique de l'eau trouve également une justification économique à l'échelle de l'exploitation où les essais ont eu lieu. Il permet de dégager un chiffre d'affaire supplémentaire égal à 82.500 Dhs/ha (la moyenne du gain obtenu pour les deux années* le prix de vente dhs).

L'installation du magnétiseur permet de tendre vers une amélioration de rendement et de la qualité des récoltes.

Les gains de production et de qualité ne sont pas les seuls à prendre en compte pour l'investissement dans une installation de traitement magnétique de l'eau. Le magnétiseur remplit également son rôle d'anti-tartre pour lequel il a été conçu à l'origine afin de limiter l'usure précoce du matériel d'irrigation. Ceci est particulièrement important dans une zone semi-aride en irriguant au goutte à goutte avec une eau saline, ce qui est le cas de l'exploitation où nos essais ont été réalisés.

Cette technologie abordable ouvre la voie à des traitements spécifiques utilisant les propriétés électromagnétiques de l'eau, dont la connaissance demande à être approfondie. Il conviendrait également de mieux comprendre les effets directs de la technologie magnétique sur la plante. Ces études contribueraient à tendre vers une agriculture durable.

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pu avoir lieu sans l'appui de Messieurs Nassir Mokhtari et Jounaid respectivement Directeur de la Société «Atlas-Innov» et PDG de la Société «Magnetic Technologies Union des Emirats Arabes». Merci pour avoir mis à notre disposition la technologie magnétique. Un grand merci à M. Miloud Hajji, propriétaire de la ferme, pour nous avoir donné l'autorisation de conduire nos expérimentations dans son exploitation ainsi que pour son hospitalité, sa patience et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer durant chaque visite. Je ne manquerai pas de remercier tous les responsables de la DPA de Berrechid pour leur disponibilité à me fournir les données climatiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alimi F., Tlili M., Amor M., Gabrielli C. et Maurin G. (2006). Influence of Magnetic Field on Calcium Carbonate Precipitation. *Desalination* 206: 163-168.
- Brissier J., Vandoorne Y. et Minnaar C. (2005). Etude d'un traitement électromagnétique de l'eau d'irrigation pour des cultures maraichères et horticoles et analyse économique d'un tel procédé. I.A.V. (Rabat).
- Cai R., Yang H.; He J. et Zhu W. (2009). The Effects of Magnetic Fields on Water Molecular Hydrogen Bonds. *Journal of Molecular Structure* 938:15-19.
- Chibowski E., Hotysz L. et Szczes A. (2003). Adhesion of in Situ Precipitated Calcium Carbonate in the Presence and Absence of Magnetic Field in Quiescent Conditions on Different Solid Surfaces. *Water Res.* 37: 4685-4692.
- Çelik Ö., Atak Ç., Rzakulieva A. (2008). Stimulation of Rapid Regeneration by a Magnetic Field in Paulownia Node Cultures. *Journal of Central Europ. Agric.* 9 (2): 297 – 303.
- El Assaoui E. (2009). Valorisation des Ressources en eau Souterraines par l'irrigation privée : Cas de la nappe de berrechid. IAV (Rabat).
- Florez M., Carbonell M.V. et Martinez E. (2007). Exposure of Maize Seeds to Stationary Magnetic Fields: Effects on Germination and Early Growth. *Environ. Exp. Bot.* 59:68-75.
- Haddoudi M. (2013). Étude et amélioration des performances des stations d'épuration des eaux usées à débit nominal moyen. IAV, rabat, Maroc.
- Hallouin I. (2013). Fiche culturale choux: Culture des choux en Provence. Agricultures et territoires, chambre d'agriculture Bouches-du-Rhone.
- Hameda E. S. (2014). Impact of Magnetic Water Irrigation for Improve the Growth, Chemical Composition and Yield Production of Broad Bean (*Vicia Faba L.*) Plant. *American Journal of Experimental Agriculture* 4(4): 476-496.
- Hozayn M. et Mohamed Saeed Abdul Qados A. (2010). Irrigation With Magnetized Water Enhances Growth, Chemical Constituent and Yield of Chickpea (*Cicerarietinum L.*). *Agriculture and Biology Journal of North America* 1(4): 671-676.
- Hozayn M. et Mohamed Saeed Abdul Qados A. (2010). Magnetic Water Technology, a Novel Tool to Increase Growth, Yield and Chemical Constituents of Lentil (*Lens esculenta*) Under Greenhouse Condition. *American-Eurasian J. Agric and Environ. Sci.* 7(4): 457-462.
- Hozayn M. et Mohamed Saeed Abdul Qados A. (2010). Magnetic Water Application for Improving Wheat (*Triticum aestivum L.*) Crop Production. *Agriculture and Biology Journal of North America* 1(4):677-682.

- Hozayn M. et Mohamed Saeed Abdul Qados A. (2010). Response of Growth, Yield, Yield Components and some Chemical Constituents of Flax for Irrigation With Magnetized and Tap Water. *World Applied Sciences Journal* 8(5): 630-634.
- Lin I. J. et Yotvat J. (1989). Treatment of drinking and irrigation water in animal and plant husbandry by electromagnetic technology. *Magnetic separation news* 2:179-187.
- Lee S. H., Jeon S., Kim Y. S., Lee S. K. (2013). Changes in The Electrical Conductivity, Infrared Absorption and Surface Tension of Partially Degassed and Magnetically Treated Water. *Journal of Molecular Liquids* 187 (2013) 230-237.
- Maheshwari B. L. et Grewal H. S. (2009). Magnetic treatment of irrigation water: Its effects on vegetable crop yield and water productivity. *Agricultural Water Management* 96(8): 1229- 1236.
- Nasher S.H. (2008). The Effect of Magnetic Water on Growth of Chickpea seed. *Eng. and Tech.* 26(9):4.
- Pang X.F. et Deng B. (2008). The Change of Macroscopic Features and Microscopic Structures of Water Under Influence of Magnetic Field. *Physica B* 403: 3571-3577.
- Parsons S. A., Judd S. J., Stephenson T., Udol S. et Wang B.L. (1997). Magnetically Augmented Water Treatment, *Institution of Chemical Engineers, Vol 75, Part B*, May 1997.
- Reina F.G., Pascual L.A. et Fundora I.A. (2001). Influence of Stationary Magnetic Field on Water Relations in Lettuce Seeds. Part II: Experimental Results. *Bioelectromagnetics* 22:596-602.
- Sadeghipour O. et Aghaei P. (2013). Improving the Growth of Cowpea (*Vigna Unguiculata* L. Walp) by Magnetized Water. *Journal of Bio. and Env.* 3: 37-43.
- Shabrangi A. et Majd A. (2009). Effect of Magnetic Fields on Growth and Antioxidant Systems in Agricultural Plants. PIERS Proceedings, Beijing, (China), March, 23-27.
- Smirnov J.V. (2003). The Effect of a Specially Modified Electromagnetic Field on the Molecular Structure of Liquid Water. *Global Quantec. Inc.(U.S.A)*: 122-125.
- Taimourya H., Oussible M. et Elharif A., (2009). Etude Expérimentale des Applications du Champ Magnétique dans le Domaine Agricole. Facultés des Sciences (Rabat).