

Apport de l'imagerie aéroportée par drone dans l'étude de l'interaction machine-sol-plante en culture de pomme de terre

Contribution of UAV-airborne imagery in the study of machine-soil-plant interaction in potato cultivation

Khaoula Abrougui¹, Ridha Guebsi², Aymen Ouni³, Nour El Houda Boughattas¹, Fatma Habel¹, Yassine Barkaoui¹, Roua Amami¹, Chiheb Khemis¹, Bessem Abdou¹, Sayed Chehaibi¹ & Shawn Kefauver⁴

¹ Université de Sousse, Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, 4042 Chott Meriem, Tunisie

² Société Nationale de Protection des Végétaux, 2014 Mégrine Riadh, Ben Arous-Tunis, Tunisie

³ Centre Technique de la Pomme de Terre et de l'Artichaut, 2031 Jedaida-Essaida, Manouba, Tunisie

⁴ Université de Barcelone, Faculté de Biologie, 08028 Barcelone, Espagne

Article info

Histoire :

Reçu le 20/02/2022

Accepté le 18/04/2022

Mots-Clés : Nouvelles technologies, drone, imagerie RVB, indices de végétation, prise de décision, rendement.

* Auteur correspondant

khaoula_abr@yahoo.fr

Article info

History:

Received 20/02/2022

Accepted 18/04/2022

Keywords: New technologies, UAV, RGB imaging, vegetation indices, decision



Copyright©2022 JOASD

* Corresponding authors

khaoula_abr@yahoo.fr

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Résumé

L'usage des nouvelles technologies en agriculture de précision est une solution pour l'évolution démographique mondiale et ses besoins alimentaires face aux changements climatiques. L'expérimentation s'est basée sur le suivi du cycle végétatif d'une culture de pomme de terre de saison variété "Spunta" installée à différents interlignes, écartements et profondeurs de plantation par la technique d'imagerie RVB en utilisant un capteur sophistiqué embarqué sur drone. Afin d'améliorer le système de production et l'adapter au contexte du réchauffement climatique à travers les différents réglages sur la planteuse de pomme de terre, des indices de végétation ont été calculés à partir des images capturées tels que les indices GA, GGA, CSI, NGRDI et TGI indicateurs de la biomasse du végétal et son état de santé conduisant ainsi à une prise de décision correcte en termes d'apport nutritif et de traitement phytosanitaire. La combinaison suivante des facteurs interligne, inter-plant et profondeur de plantation respectifs IL = 90 cm, IP = 28 cm et P = 10 cm a révélé de meilleurs résultats en termes de tonnage et de calibre de pomme de terre.

Abstract

The use of new technologies in precision agriculture remains a solution for global demographic change and its food needs in the face of climate change. The experiment was based on the vegetative cycle monitoring of a "Spunta" variety potato crop grown at different inter-lines, spacing and planting depths based on the RGB imaging technique using a sophisticated drone-mounted sensor. In order to improve the production system and adapt it to the context of global warming through the different settings on the potato planter machine, vegetation indices have been calculated from the captured images such as the GA, GGA, CSI, NGRDI et TGI indices, indicators of the plant biomass and its healthy state thus leading to a correct decision in terms of nutrient input and phytosanitary treatment. The following factors combination of inter-row spacing, plant spacing and planting depth IL = 90 cm, IP = 28 cm, and P = 10 cm respectively proved potato size and yield better results.

1. INTRODUCTION

La pomme de terre présente d'énormes potentialités nutritionnelles et économiques intéressantes qui peuvent être une solution pour l'évolution démographique mondiale et ses besoins alimentaires (Kumar et al. 2011). Cette culture basique, stratégique et vivrière, est parmi les cultures maraichères les plus cultivées au monde en termes de production et de superficie (Friedman, 2006). Par ailleurs, la demande mondiale est de plus en plus récurrente ce qui nécessite la mise au point d'une bonne étude stratégique de production et de commercialisation (Martin, 2010). En effet, l'implantation de la culture de pomme de terre constitue une étape clé de l'itinéraire technique (ARVALIS, 2006). Elle conditionne pour une bonne part le comportement des plantes en végétation mais aussi les conditions de récolte de la parcelle (Bohl et al. 2011). La profondeur de plantation doit être réglée pour permettre aux plants d'affleurer au niveau de la surface du sol (Rana et al. 2010). Une plantation un peu plus profonde dans les sols légers peut se justifier pour profiter de meilleures remontées capillaires d'eau. Néanmoins, il faut toujours veiller à placer les tubercules à quelques centimètres au-dessus de la zone non reprise du profil pour faciliter les opérations de récolte (ARVALIS, 2006). La densité de plantation a de faibles effets sur le rendement final à un niveau seuil minimal. Une densité élevée affecte alors la répartition des calibres. Son raisonnement permet ainsi de favoriser l'obtention d'un calibre déterminé pour le débouché recherché (Szarvas et al. 2018). La densité de plantation doit être adaptée en fonction de la variété en prenant en compte son comportement naturel en végétation, le calibre du plant et l'objectif de calibre de la récolte. Pour que la densité de plantation réelle corresponde à la densité choisie, il est nécessaire de régler correctement la planteuse (Monostori et Szarvas, 2015). L'inclinaison des disques, la descente des socs et même l'ouverture des ailes des socs doivent être ajustés pour assurer la bonne mise en terre des plants par rapport à l'axe de la butte (Martin, 2010). L'inter-plant habituel est de 17 à 30 cm, le 30 cm étant le plus utilisé (Bavec et al. 2006). Le rendement des tubercules à l'hectare a diminué avec l'augmentation de l'espacement entre les plants. L'espacement étroit a augmenté le rendement à l'hectare et diminué le rendement par plante. Toutefois, l'augmentation de cet espacement a augmenté la population de

tubercules de grande taille (Clark et al. 2013). En effet, la densité de plantation affecte les caractéristiques végétales importantes de la plante telles que le rendement total, la distribution de la taille ainsi que la qualité des tubercules (Szarvas et al. 2018). Augmenter la densité peut augmenter le rendement de trois façons. Tout d'abord, les feuilles vertes couvriront le sol plus tôt et absorberont plus de lumière du soleil et conduiront à plus d'assimilation. En plus, la croissance des tubercules va commencer plus tôt également (Getachew et Hailay, 2020). La densité de plantation recommandée à des fins de recherche dans le monde entier est de 33,333 à 55,555 (Jinpeng et al. 2021). L'écartement entre les rangs favorise ainsi une tubérisation plus importante et un calibre plus homogène des tubercules à la récolte. Ainsi un inter-rang de 75 cm à 80 cm est recommandé pour la production des tubercules de moyen calibre. Pour la production de tubercules de gros à très gros calibres, un écartement entre rangs de 90 cm offre plusieurs avantages tels que la compatibilité avec les voies de tracteur et de pulvérisateur, l'augmentation du volume de la butte de 30%, la réduction du risque de verdissement sur les variétés longues ainsi que des risques d'attaques de mildiou sur les tubercules et la réduction des temps d'intervention d'environ 15% pour la plantation, le buttage et l'arrachage (Kumar et al. 2012). Selon Szarvas et al. (2018), l'inter-rang généralement appliqué dans la production de pomme de terre est entre 70 et 107 cm, le plus préféré étant 100 cm. Le rendement potentiel de la pomme de terre douce dans la recherche peut atteindre jusqu'à 50 T/ha. Afin de garantir un meilleur rendement quantitatif et qualitatif, la télédétection, une technologie clé pour l'agriculture de précision, contribue fortement à l'évaluation des conditions réelles de la culture, la prise de décision, la façon et la manière d'interventions telles que la détection de foyers de maladie, les zones de carence en eau et en nutriments ou encore l'optimisation des rendements grâce à des indices déterminés à partir de traitement d'images prises par des capteurs sophistiqués (Pontes et al. 2015; Pepitone, 2016; Grell et al. 2020). L'agriculture de précision se base sur l'acquisition des données telles que l'utilisation des caméras RVB ou multispectrales pour capturer de nombreuses images sur le terrain qui seront assemblées par

des méthodes photogrammétriques pour construire des orthophotos. Ces images incluent plusieurs valeurs par pixel (Kefauver, 2015). Comme l'approche classique de la télédétection utilisant des satellites, les drones, la spectroscopie visible et proche infrarouge (VNIR) ont prouvé des évaluations biophysiques fiables des cultures en agriculture (Buchaillet et al. 2019). Divers indices de végétation rouge-vert-bleu issus des caméras RVB ont prouvé leur capacité à prédire le rendement, à évaluer les déficits en éléments nutritifs et à mesurer les impacts des maladies (Vergara et al. 2015). Les images RVB sont traitées en comparant les valeurs de réflectance de la lumière rouge, verte et bleue ou en utilisant d'autres espaces de couleur, comme pour le code Breedpix (Gracia et al. 2018). L'indice de différence normalisé vert-rouge (NGRDI) qui est étroitement lié à la vigueur de la végétation et l'indice de verdure triangulaire (TGI) qui estime la concentration de chlorophylle dans les feuilles sont calculés à partir du traitement des bandes spectrales distinctes R, V et B (Deshpande et al. 2021). Dans la présente étude, le potentiel des indices de végétation définis, GA, GGA, TGI, CSI et NGRDI est évalué afin d'assurer un système de plantation de tubercules adéquat avec un impact significatif en termes de rendement et de calibre. Ces indices sont calculés à partir de traitement d'images de couleurs naturelles acquises sur la parcelle d'essai. Le développement de la plante ainsi que son rendement final sont suivis et évalués en fonction de différentes combinaisons de paramètres opérationnels de la planteuse de pomme de terre tels que la profondeur de plantation, l'écartement entre les plants et l'inter-rang à travers un capteur d'images RVB embarqué sur un drone à usage agricole afin d'apporter certaines améliorations par rapport aux pratiques habituelles.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Description du site expérimental

Dans le but d'améliorer le système de production et l'intensification des rendements, le présent travail fait l'objet de l'installation d'une culture de pomme de terre de saison variété 'Spunta', adaptée aux divers changements biotiques et abiotiques, dans une parcelle expérimentale appartenant au centre technique de la pomme de terre et de l'artichaut CTPTA, situé au gouvernorat de Manouba, Jdaïda, Tunis (36°49'57"N, 9°58'10 "E, 1,95 km). Les parcelles sont caractérisées par un sol lourd avec un pH

légèrement supérieur à 7. Le climat de la zone de Manouba est défini comme semi-aride ayant une précipitation moyenne de 315 mm/an en 2019. Les températures moyennes varient d'un maximum de 33°C avec un pic de chaleur en juillet-août à un minimum de 20,5°C. La Fig. 1 représente la variation thermique de la zone d'étude. L'essai a été déroulé pendant la saison 2019/2020 pour la période allant de février à mai 2020.

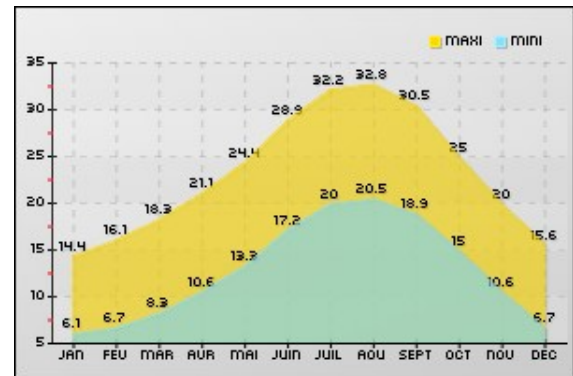


Fig. 1. Température annuelle dans la région de Manouba, Tunisie

2.2. Traitements et dispositif expérimental

Ce travail de recherche a été mené sur trois combinaisons factorielles de deux espacements différents inter et intra-rangs à deux profondeurs de plantation (90 et 100; 28 et 35; 10 et 20 cm respectivement). Un total de 9 combinaisons de traitements comparés à la combinaison témoin conventionnelle (32, 80 et 15 cm) respectivement. Un total de 24 unités expérimentales de 45 m² (9 × 5 m) avec 6 rangs par unité séparés de 1 m avec trois répétitions s'étendant sur une superficie de 1500 m² (Fig. 2). La machine utilisée est une planteuse de pomme de terre semi-automatique à double rangs (Fig. 3) équipée de deux plateaux rotatifs entraînés par une roue motrice à travers une transmission mécanique pignon-chaîne.

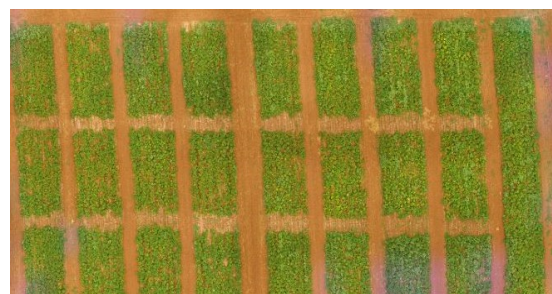


Fig. 2. Image mosaïque RVB des unités expérimentales.



Fig. 3. Planteuse de pomme de terre semi-automatique à double rang

2.3. Procédure expérimentale

Avant l'installation de la culture, un labour profond du sol a été effectué moyennant une charrue à disques simple suivi par une reprise de labour moyennant un pulvérisateur à disques "Offset" pour la préparation du lit de semences. L'irrigation est déclenchée 2 h/2 jours/semaine répartie selon les besoins en eau de la culture. La première fertigation a été appliquée à une levée de 80%. Ensuite, un programme de fertigation est mis au point avec une dose hebdomadaire fractionnée sur deux jours. La quantité totale d'ammonitrate apportée durant tout le cycle est de 354 Kg, 412 kg de Solupotasse et 74 L d'acide phosphorique. D'autres pratiques agronomiques recommandées comme le buttage, le désherbage, le traitement phytosanitaire, le défanage, etc., ont été maintenues uniformes pour tous les traitements. Suite à la récolte, les tubercules ont été transportés au frigo pour la pesée, la classification et le stockage.

2.4. Acquisition et traitement d'images aéroportées

Toutes les images ont été acquises en utilisant un drone à 6 rotors MATRICE 600 Pro (DJI) piloté manuellement à une vitesse constante d'environ 2 m/s, une altitude de 25 m et une fréquence d'acquisition programmée à 2 s avec un plan de vol préparé d'avance. Les images RVB ont été enregistrées par une caméra aérienne Zenmuse Z3 4k, 12Mpx, vidéo HD ensuite importées et filtrées avant de produire l'orthomosaïque par le logiciel Agisoft Photoscan Professional (Fig. 4). Les images RVB de taille (4000 x 2250) pixels avaient une résolution spatiale estimée à 4 mm/pixel.

L'image orthomosaïque a été par la suite découpée en sections correspondantes aux unités parcellaires pour le calcul des indices de végétation et l'exportation simultanée des données relatives à chaque section en utilisant le logiciel FIJI (Kefauver et al. 2017). L'application

Breedpix 2.0 produit les indices GA, GGA, CSI, NGRDI et TGI en séparant les bandes de couleur rouge, verte et bleue et à partir de HSI et de l'espace de couleur CIE Lab et CIE Luv. HSI exprime la teinte, la saturation et l'intensité de la couleur respectivement (Fig. 5). CIE est la commission internationale de l'éclairage. GA présente le pourcentage de pixels verts dans l'image dont la teinte varie de 60 à 180, GGA présente le pourcentage de pixels verts dans l'image dont la teinte varie de 80 à 180°, c'est l'indice de surface verte efficiente à l'exclusion des tons vert-jaunâtre qui pourraient être partiellement stressés ou sénescents. L'indice de sénescence des cultures (CSI) est calculé à partir de GA et GGA, ce qui permet une forte ségrégation entre les génotypes résistants et sensibles (Zaman Allah et al. 2015; Buchailot et al. 2019). L'indice de végétation normalisé (NGRDI) est un indicateur de densité de verdure et du pourcentage de recouvrement du sol par le végétal. L'indice de verdure triangulaire (TGI) estime la concentration de chlorophylle du couvert végétal.

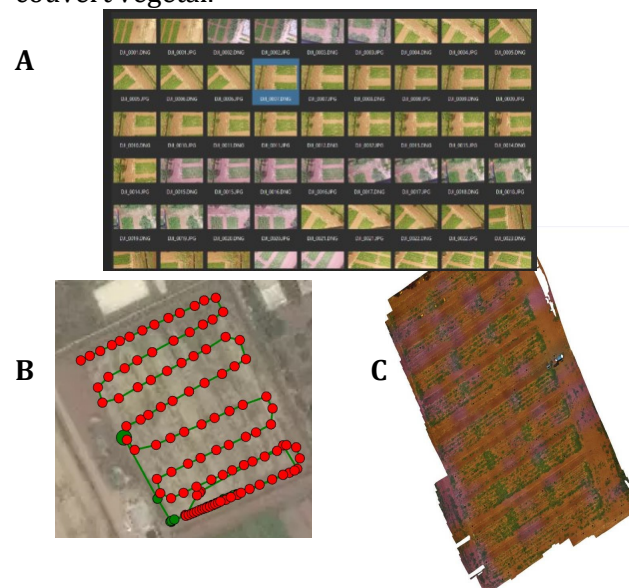


Fig. 4. Élaboration de l'image mosaïque à la récolte (A: assemblage, B: traitement, C: orthomosaïque).

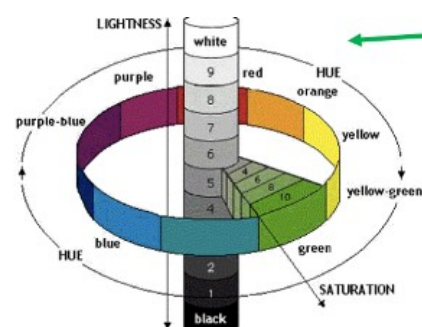


Fig. 5. L'espace de couleur HSI

2.5. Analyse des données

Les données ont fait l'objet d'une analyse de la variance (ANOVA) avec le logiciel SPSS version 9.1.3 et le test LSD à $\alpha = 0.05$ pour analyser l'effet des paramètres de fonctionnement de la planteuse de pomme de terre (inter-plant, interligne et profondeur de plantation) sur la croissance de la plante et l'estimation de son rendement final par la technique d'imagerie RVB aéroportée.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Effet de l'inter-plant, l'écartement entre les rangs et la profondeur de plantation sur les indices de végétation calculés

L'interaction des paramètres de fonctionnement de la planteuse de pomme de terre utilisée avaient un effet significatif sur les variables CSI, NGRDI et TGI et un effet non significatif sur les variables GA et GGA (Tableau 1). La combinaison 100*35*20 cm a montré un indice de sénescence le plus faible suite à la première mission de prise de vol pendant le pic de croissance de la plante.

que la moyenne la plus faible a été observée au traitement 90*28*20 cm (0,001) suite à la deuxième mission de vol à la récolte. L'indice de verdure triangulaire (TGI) le plus élevé estimant la concentration de chlorophylle du couvert végétal a été marqué à une interligne de 100 cm, un écartement entre les plants de 35 cm et une profondeur de plantation de 20 cm. Une corrélation significative au niveau 0.05 et 0.01 a été montrée entre les différents indices calculés (Tableau 2). En effet, le marché demande de gros tubercules mais lorsqu'on plante serré, la récolte comprendra de nombreux petits tubercules et si la densité est moins importante, le pourcentage de gros calibres sera plus élevé et l'investissement en plants est moins important. Le nombre de tiges dépend du nombre de germes sur les tubercules qui lui-même est directement fonction du calibre des tubercules. La quantité de plants à planter par hectare sera donc fonction de leur calibre (Abera et al. 2017). Il est intéressant de constater que les plus petits calibres sont économiquement les plus intéressants car ce sont eux qui, par kilo de plants, produisent le plus grand nombre de

Tableau 1. Indices de végétation RVB en fonction de l'interaction des paramètres de réglage sur une planteuse de pomme de terre à double rang

Mission de vol 1		GA ^{ns}	GGA ^{ns}	CSI ^{**}	NGRDI ^{ns}	TGI ^{***}
T1	90*28*10	0.025	0.002	92.091 ^b	0.137	848.376 ^{ab}
T2	90*35*10	0.017	0.001	91.545 ^b	0.137	694.047 ^a
T3	90*28*20	0.012	0.001	91.481 ^b	0.127	672.034 ^a
T4	90*35*20	0.012	0.002	88.443 ^{ab}	0.128	673.163 ^a
T5	100*28*10	0.017	0.003	86.672 ^{ab}	0.116	835.564 ^{ab}
T6	100*35*10	0.022	0.004	80.497 ^{ab}	0.118	936.796 ^b
T7	100*28*20	0.015	0.003	79.284 ^{ab}	0.116	988.298 ^b
T8	100*35*20	0.012	0.003	66.894 ^a	0.115	1060.404 ^b
T9	80*32*15	0.019	0.005	76.308 ^{ab}	0.127	987.563 ^b
Mission de vol 2		GA ^{ns}	GGA ^{ns}	CSI ^{ns}	NGRDI ^{***}	TGI ^{ns}
T1	90*28*10	0.561	0.051	91.467	0.004 ^a	4270.605
T2	90*35*10	0.565	0.023	96.227	0.008 ^a	4758.605
T3	90*28*20	0.586	0.033	94.585	0.001 ^a	4629.150
T4	90*35*20	0.618	0.027	95.825	0.002 ^a	4671.882
T5	100*28*10	0.597	0.019	97.027	0.001 ^{ab}	4723.703
T6	100*35*10	0.630	0.044	93.531	0.010 ^{ab}	4694.785
T7	100*28*20	0.669	0.183	75.507	0.022 ^{ab}	4137.556
T8	100*35*20	0.665	0.109	84.127	0.024 ^{ab}	4,519.128
T9	80*32*15	0.745	0.111	84.824	0.045 ^b	5170.688

IL: interligne (cm); IP: inter-plant (cm) ; P: profondeur de plantation (cm);

Tandis que la sénescence la plus élevée a été observée au traitement 90*28*10 cm. Concernant l'indicateur de densité de verdure et du pourcentage de recouvrement du sol, on note

germes c'est également l'une des raisons de leur prix plus élevé. Ceci explique l'importance de réglage d'un inter-plant plus ou moins serré. Les résultats de Getachew et Hailay (2020)

Tableau 2. Corrélation entre les indices de végétation et le rendement total de la pomme de terre

		GA	GGA	CSI	NGRDI	TGI	RDMT (t/ha)
GA	Corrélation de	1	.537**	.186	-.821**	.956**	-.552**
	Sig. (bilatérale)		.000	.179	.000	.000	0.003
GGA	Corrélation de	.537**	1	-.502**	-.302*	.379**	-.923**
	Sig. (bilatérale)	.000		.000	.027	.005	0.000
CSI	Corrélation de	.098	.186	1	-.502**	-.284*	.396*
	Sig. (bilatérale)	.627	.179		.000	.037	0.041
NGRDI	Corrélation de	-.821**	-.302*	-.284*	1	-.828**	-.421*
	Sig. (bilatérale)	.000	.027	.037		.000	0.029
TGI	Corrélation de	.956**	.379**	.304*	-.828**	1	-0.343
	Sig. (bilatérale)	.000	.005	.025	.000		0.080
RDMT	Corrélation de	-.552**	-.923**	.396*	-.421*	-0.343	1
	Sig. (bilatérale)	0.003	0.000	0.041	0.029	0.080	

* La corrélation est significative au niveau 0.05; ** La corrélation est significative

confirment qu'en règle générale, en plantation en buttes, on prend un minimum de 75 à 80 cm d'interligne pour avoir suffisamment de terre pour former les buttes. Les écartements dans la ligne varient en fonction du calibre de plants choisis. La profondeur d'enfouissement des tubercules varie de 5 à 10 cm de profondeur par rapport au sommet de la butte. Une plantation des plants par même calibre donnera des parties de champ plus homogènes et donc plus faciles à entretenir (Szarvas et al. 2018). En culture de pomme de terre, l'écartement entre les rangs est un paramètre si important puisqu'il détermine par la suite la qualité de l'opération de buttage. En outre, ce dernier est une opération d'entretien essentielle. En début de tubérisation, les stolons qui ne sont pas enterrés se développent en tiges aériennes au lieu de former dans le sol des tubercules. D'autre part, les tubercules qui ne sont pas bien enterrés reçoivent le rayonnement solaire qui provoque une coloration verte des tubercules due à la formation de chlorophylle. Ce verdissement s'accompagne de la formation de solanine qui est toxique (Martin, 2010). De plus, les tubercules formés dans une butte haute peuvent facilement se développer dans un sol meuble sans déformation et sont à l'abri d'un excès d'humidité. Ces buttes hautes protègent les tubercules de l'attaque de certains parasites comme la teigne. Le buttage facilite ainsi l'élimination des mauvaises herbes (Kumar et al. 2011). Dans la présente étude, les indices de végétation définis ont montré un potentiel à assurer un système de plantation efficace avec un impact significatif.

3.1. Effet de l'inter-plant, l'écartement entre les rangs et la profondeur de plantation sur le rendement

Les interactions étudiées ont montré un effet significatif sur le rendement total de la pomme de terre (Fig. 6). Le rendement le plus élevé a été obtenu à l'interligne 90 cm, l'inter-plant 28 cm et la profondeur de plantation 10 cm. Le rendement a enregistré des corrélations significatives avec les indices calculés (Tableau 2). En effet, l'indice normalisé de différence vert-rouge (NGRDI) qui est étroitement lié à la présence ou à la vigueur de la végétation est utilisé comme une alternative peu coûteuse comparée à l'indice NDVI et tient compte des caractéristiques spectrales d'une végétation verte saine (Sankaran et al. 2015). Cet indice est un moyen efficace de détecter l'état de verdure et de santé des plantes. Ceci confirme le potentiel de ces indices à suivre l'état de développement de la plante, estimer ses besoins en fertilisation et en traitement et assurer un système de plantation efficace avec un impact significatif sur le rendement total (Fernandez-Gallego et al. 2019).

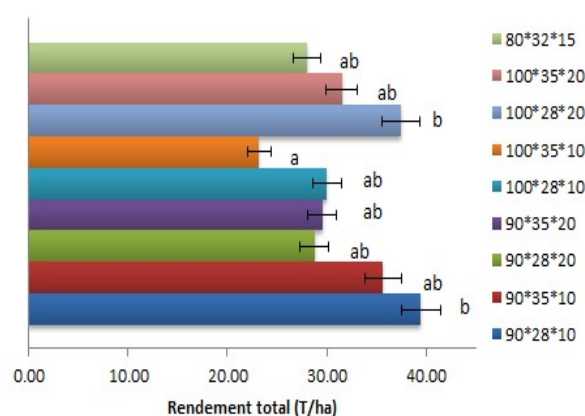


Fig. 6. Rendement total de la PDT en fonction des interactions IL*IP*P (cm)

4. CONCLUSION

L'interaction sol-machine-plante étudiée a prouvé qu'une utilisation appropriée des paramètres de réglages de la planteuse de pomme de terre peut améliorer la croissance, l'état de santé et le rendement de la culture dans les conditions locales. Le rendement total des tubercules à l'hectare a augmenté (40 t/ha) avec la diminution de l'écartement entre les plants, entre les lignes ainsi que la profondeur de plantation (IL= 90, IP= 28, P=10) comparé à la méthode conventionnelle de plantation (IL= 80, IP= 32, P=15) qui a donné un rendement total de 28 t/ha, soit une augmentation de 17%. Concernant le calibre des tubercules, un interplant de 28 cm, une interligne de 90 cm et une profondeur de plantation de 10 cm a donné de nombreux petits tubercules à la récolte (<35 mm) qui sont économiquement les plus intéressants tant qu'ils produisent le plus grand nombre de germes par kilo de plants. Un système de plantation efficace nécessite un réglage correct des paramètres de la machine. Les capteurs RVB embarqués sur drone peuvent être considérés comme une technologie avancée en l'absence de capteurs à proximité. Dans le but de confirmer leur potentiel et leur impact significatif, plusieurs indices de végétation basés sur l'imagerie RVB tels que GA, GGA, CSI, NGRDI et TGI ont montré de bonnes corrélations avec le rendement total de la culture. Un vol de drone à basse altitude (± 20 m) et une haute résolution, permet ainsi de recueillir des images plus précises et pertinentes qu'avec un satellite. Les exploitants peuvent apporter les bonnes doses de semences, d'engrais, de pesticides, d'irrigation et même des profondeurs de travail du sol modulées au bon moment et au bon endroit permettant une agriculture durable et raisonnée avec des rendements améliorés.

RÉFÉRENCES

- Abera, T., Biranu, T., Eshetu, G. (2017). Consequence of Inter and Intra-Row Spacing on Growth and Yield Components of Potato (*Solanum Tuberosum* L.) under Irrigation at North Shewa Zone of Oromia Region, Ethiopia *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare* 7, 22-28.
- ARVALIS-Institut du végétal. (2006). Implantation de la culture. Adapter les choix techniques au calibrage recherché. Dossier pommes de terre, Perspectives Agricoles, n°321.
- Bavec, F., Bavec, M. (2006). Sweet potato. In: Bavec, F., Bavec, M.: *Organic production and use of alternative crops*. CRC Press, Taylor & Francis Group. Pp. 189-200. 214 p.
- Bohl, W.H., Love, S.L., Salaiz, T. (2011). Hill shape effect on field-greening tuber yield. Presented at the Idaho Potato Conference on 19, January 2011.
- Buchaillet, M.L., Gracia-Romero, A., Vergara-Diaz, O., Mainassara A., Tarekegne, A., Cairns, J.E., Boddupalli M.P., Araus, J.L., Kefauver, S.C. (2019). Evaluating Maize Genotype Performance under Low Nitrogen Conditions Using RGB UAV Phenotyping Techniques. *Sensors* 19, 1815.
- Clark, C. (2013). Cultivation and storage. In: Clark, C.A., Ferrin, D.M., Smith, T.P., Holmes, G.J. (eds.): *Compendium of sweet potato disease, pests, and disorders*. Second edition. APS Press, St. Paul, Minnesota. Pp. 4-7.
- Deshpande, A., Razmjoooy, N., Estrela, V. (2021). Introduction to Computational Intelligence and Super-Resolution". *Computational Intelligence Methods for Super-Resolution in Image Processing Applications*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing 3-23. ISBN 978-3-030-67921-7.
- Fernandez-Gallego, J.A., Kefauver, S.C., Vatter, T., Gutiérrez, N.A., Nieto-Taladriz, M.T., Araus, J.L. (2019). Low-cost assessment of grain yield in durum wheat using RGB images. *European Journal of Agronomy* 105, 146-156.
- Friedman, M. (2006). Potato glycoalkaloids and metabolites: Roles in the plant and in the diet. *Journal of Agricultural Food Chemistry* 54(23), 65-81.
- Getachew, A., Hailay, G. (2020). Effect of Plant Spacing on Yield and Yield Components of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in Shewarobit, Central Ethiopia. *Scientifica* 8357237, 6 pages.
- Gracia-Romero, A., Vergara-Díaz, O., Thierfelder, C., Cairns, J.E., Kefauver, S.C., Araus, J.L. (2018). Phenotyping Conservation Agriculture Management Effects on Ground and Aerial Remote Sensing Assessments of Maize Hybrids Performance in Zimbabwe. *Remote Sensing (Basel)* 10(2), 349.
- Grell, M., Barandun, G., Asfour, T., Kasimatis, M., Collins, A., Wang, J., Guder, F. (2020). Determining and Predicting Soil Chemistry 473 with a Point-of-Use Sensor Toolkit and Machine Learning Model. *bioRxiv*.
- Jinpeng, Y., Yingbin, H., Shanjun, L., Xintian, M., Zhiqiang, Li., Zeru, L., Zhiliang, Z. (2021). Optimizing the Optimal Planting Period for

- Potato Based on Different Water-Temperature Year Types in the Agro-Pastoral Ecotone of North China. *Agriculture* 11, 1061.
- Kefauver, S.C., El-Haddad, G., Vergara-Diaz, O., Araus, J.L. (2015). RGB picture vegetation indexes for High-Throughput Phenotyping Platforms (HTPPs). In *Proceedings of the Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVII*, Toulouse, 486 France.
- Kefauver, S.C., Vicente, R., Vergara-Díaz, O., Fernandez-Gallego, J.A., Kerfal, S., Lopez, A., Melichar, J.P.E., Serret Molins, M.D., Araus, J.L. (2017). Comparative UAV and Field Phenotyping to Assess Yield and Nitrogen Use Efficiency in Hybrid and Conventional Barley. *Frontiers in Plant Science* 8, 1733.
- Kumar, P., Pandey, S.K., Singh, S.V., Singh, B.P., Singh, K., Kumar, D., Rawal, S., Singh, S. (2011). Effect of growth duration, N application and row spacing on productivity, profitability and processing quality of potato. *Potato Journal* 38(2), 137- 42.
- Kumar, P., Singh, B.P., Kumar, R., Kumar, D., Singh, S.V., Pandey, S.K., Singh, S., Rawal, S. (2012). Standardization of intrarow spacing of cultivar Kufri Frysona for higher French fry grade tuber yield with good fry quality. *Potato Journal* 39, 88-91.
- Martin, M. (2010). Implantation : tour d'horizon de la plantation « simplifiée ». *Pomme de Terre Hebdo*, n° 937.
- Monostori, T., Szarvas, A. (2015): A review on sweet potato production with special focus on Hungary I: utilization, biology and transplant production. *Review on Agriculture and Rural Development* 4(1-2), 68-81.
- Pepitone, J. (2016). Hacking the farm: How farmers use 'digital agriculture' to grow more crops. *CNN Money*.
- Pontes, L., Maire, V., Schellberg, J., Louault, F. (2015). Grass strategies and grassland community responses to environmental drivers: a review. *European Journal of Plant Pathology* 35, 1297-1318.
- Rana, R., K., Pandit, A., Pandey, N.K. (2010). Demand for processed potato products and processing quality potato tubers in India. *Potato Research* 53, 181-97.
- Sankaran, S., Khot, L.R., Espinoza, C.Z., Jarolmasjed, S., Sathuvalli, V.R., Vandemark, G.J., Miklas, P.N., Carter, A.H., Pumphrey, M.O., Knowles, R.R.N. (2015). Low- altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review. *European Journal of Agronomy* 70, 112-123.
- Szarvas, A., Herczeg, E., Papp, L., Monostori, T. (2018). The effect of planting density on the yield of sweet potato in South-East Hungary in 2017. *Research Journal of Agricultural Science* 50 (1), 159-163.
- Vergara-Diaz, O., Kefauver, S.C., Elazab, A., Nieto-Taladriz, M.T., Araus, J.L. (2015). Grain yield loss in yellow-rusted durum wheat estimated using digital and conventional parameters under field conditions. *Crop Journal* 3, 200-210.
- Zaman-Allah, M., Vergara, O., Araus, J.L., Tarekegne, A., Magorokosho, C., Zarco-Tejada, P.J., Cairns, J. (2015). Unmanned aerial platform-based multi-spectral imaging for field phenotyping of maize. *Plant Methods* 11, 35.