

# Modélisation du rendement grain du pois chiche (*Cicer arietinum* L.) du type « kabuli » sous les conditions édapho-climatiques du semi aride supérieur Tunisien

K. BEN MBAREK<sup>1</sup>, M. BOUBAKER<sup>2</sup> & C. HANNACHI<sup>3</sup>

(Reçu le 10/03/2012; Accepté le 18/05/2012)

## Résumé

Un essai de pois chiche, *in situ* et en pots a été conduit sous des conditions édapho-climatiques contrôlées du semi aride supérieur Tunisien. Le matériel végétal est composé de huit génotypes de pois chiche du type « kabuli ». Quatre régimes d'irrigation ont été testés, notamment 100%, 75%, 50% et 25% de la réserve facilement utilisable (RFU). Les résultats indiquent que seuls le poids des gousses/m<sup>2</sup> et le nombre de graines/m<sup>2</sup> ont des effets directs significatifs sur le rendement en graines. Le nombre de graines/m<sup>2</sup>, la biomasse aérienne, la dose d'irrigation et le poids de 100 graines ont présenté les effets indirects positifs les plus élevés; alors que les dates de floraison précoce, de floraison et de maturité précoce et le poids des gousses/m<sup>2</sup> ont présenté les effets indirects négatifs les plus élevés. La régression linéaire multiple « pas à pas » a permis de réduire le nombre de covariables qui expliquent le rendement en graines. L'analyse séquentielle de piste, fondée sur le classement des covariables en premier et second ordre sur la base de leurs effets directs les plus élevés et de leurs colinéarités minimales, a montré que le poids des gousses/m<sup>2</sup> et le nombre de graines/m<sup>2</sup> ont des effets directs hautement significatifs et que l'indice de récolte et la biomasse aérienne ont les effets indirects les plus élevés sur le rendement en graines.

**Mots-clés:** Analyse séquentielle de piste; Coefficients de corrélation; Coefficient de piste; Régression linéaire multiple « pas à pas »; Pois chiche; *Cicer arietinum* L.; Rendement grain

## INTRODUCTION

Les légumineuses alimentaires constituent une très importante source de protéines végétales qui peut corriger le déficit en protéines animales. En plus de leur importance dans le régime alimentaire des êtres humains, elles ont un intérêt particulier dans le concept de l'agriculture durable dans la mesure où leur introduction dans l'assolement instaure la rotation des cultures, la diversification des productions et la protection de l'environnement contre la pollution par les engrais azotés, les pesticides et les désherbants chimiques. L'introduction de ces espèces dans un système de culture est impérativement tributaire de l'amélioration de leurs performances agronomiques.

A travers le monde, 90% des cultures du pois chiche (*Cicer arietinum* L.) sont pluviales. La sécheresse printanière représente la principale contrainte abiotique pour l'augmentation de la production (Kumar et Abbo, 2001). En Tunisie, la majeure partie des superficies cultivées en pois chiche reste concentrée au nord du pays, particulièrement dans les régions de Béja, Jendouba, Nabeul, Mateur et Bizerte, qui sont caractérisées par un climat humide à subhumide (DGPA, 2006). Il est cultivé sur une superficie annuelle moyenne de 19 650 ha qui représentent 25,2% de la superficie des légumineuses à graines et 1,1% des superficies emblavées en grandes

cultures. La faible production, de l'ordre de 13 520 tonnes avec un rendement moyen de 670 kg.ha<sup>-1</sup> (DGPA, 2008) et caractérisée par des fluctuations inter annuelles, ne parvient pas à satisfaire les besoins du pays. Le gouvernement Tunisien fait recours à des importations annuelles massives, de l'ordre de 19 000 tonnes (AAC, 2006), qui représentent 141% de la production nationale.

Seules les variétés du type Kabuli sont conduites en Tunisie en culture pluviale de printemps (Wery, 1990). Ce type de culture est assujéti au déficit hydrique conjugué généralement à l'effet des hautes températures. Ces stress abiotiques expliquent, en partie, l'irrégularité de la production et l'instabilité des rendements du pois chiche dans nos contrées. Dans le souci de satisfaire les besoins de la nation en cette denrée alimentaire, il serait utile de mener des travaux de recherche permettant l'augmentation de la production par la détermination des paramètres agronomiques qui contribuent le plus au rendement grain.

Bhatt, (1973) et Dogan, (2009) ont rapporté que de nombreux généticiens ont utilisé les coefficients de corrélation simple pour expliquer les relations entre le rendement en graines et ses composantes qui se traduisent par des paramètres agronomiques et morphologiques et qui peuvent avoir des effets directs et/ou indirects sur le rendement en graines. Or, d'après Dogan, (2009), ces coefficients de corrélation permettent de déterminer les paramètres qui affectent

<sup>1</sup> Institut supérieur agronomique de Chott Mariem. TU-4042 Sousse (Tunisie). E-mail : benmbarekkamel@yahoo.fr

<sup>2</sup> École supérieure d'Agriculture de Mograne. TU-1120 Zaghuan (Tunisie). E-mail : boubaker.mohsen@iresa.agrinet.tn

<sup>3</sup> Institut supérieur agronomique de Chott Mariem. TU-4042 Sousse (Tunisie). E-mail : hannachi\_tnfr@yahoo.fr

directement le rendement en graines, mais ils sont insuffisants pour déterminer ceux qui ont des effets indirects sur ce dernier.

Casagrande, (2008) a remarqué que la méthode la plus adoptée dans les diagnostics agronomiques repose sur le modèle de régression linéaire multiple « pas à pas » qui permet de sélectionner les covariables explicatives. Valantin-Morison et Meynard, (2008) ont signalé que cette méthode statistique permet à la fois de sélectionner les covariables qui ont un effet significatif sur la variable étudiée et d'estimer les paramètres avec la méthode des moindres carrés. Le pourcentage de variance expliquée par chacune de ces covariables permet de les hiérarchiser en fonction du degré d'explication de la variable dépendante (Casagrande, 2008). La covariable la plus explicative est introduite la première, suivie par la suite par celles qui présentent le coefficient de corrélation partielle le plus élevé (Mekhlouf *et al.*, 2006). Toutefois, Prost, (2008) a rapporté que cette méthode a l'inconvénient d'aboutir à des résultats qui dépendent du degré de précision de la base de données d'une part et d'être instables en raison du nombre de variables explicatives retenues dans le modèle final, généralement, plus faible que celui dans le modèle complet d'autre part.

L'analyse conventionnelle par le coefficient de pistes ou analyse de pistes causales, ou dite encore, analyse de parcours (path analysis), est basée sur la régression partielle standardisée (Samonte *et al.*, 1998). Dogan, (2009) a rapporté qu'elle permet d'étudier les relations entre l'ensemble de variables dont certaines sont considérées comme dépendantes et d'autres comme indépendantes et de diviser les coefficients de corrélation en effets directs et effets indirects. Comme elle a l'avantage de montrer l'influence d'une variable indépendante sur une ou plusieurs variables dépendantes et de tester l'influence de certaines variables dépendantes sur d'autres variables dépendantes. D'ailleurs, elle permet d'estimer les effets directs et indirects et de mesurer l'importance relative des facteurs étudiés (Dewery et Lu, 1959). Cette méthode statistique, jugée la plus fiable, a été largement utilisée dans les programmes de sélection variétale pour déterminer la nature des relations entre le rendement en graines et ses composantes et identifier celles qui ont des effets significatifs sur le rendement à fin de les exploiter comme critères de sélection pour l'amélioration du rendement des cultures, notamment, le maïs (Mohammadi *et al.*, 2003) et (Sadek *et al.*, 2006), le riz (Surek et Beser, 2003), l'arachide (Pathirana, 1993), le soja (Arshad *et al.*, 2006), et le pois chiche (Ali, et Tahir, 1999; Saleem *et al.*, 1999; Noor *et al.*, 2003; Arshad *et al.*, 2004; Talebi *et al.*, 2007).

L'analyse séquentielle de piste a été adoptée par de nombreux chercheurs, notamment, Samonte *et al.*, (1998) sur une culture du riz (*Oryza sativa* L.), Agrama, (1996) et Mohammadi *et al.*, (2003) sur une culture de maïs (*Zea mays* L.) et Asghari-Zakaria *et al.*, (2007) sur une culture de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) pour déterminer les relations entre le rendement comme variable dépendante et ses composantes comme covariables explicatives par l'organisation de ces dernières, en premier, seconde et troisième ordre, en se basant sur leurs effets directs les plus élevés et leurs colinéarités minimales respectives. Sabahgnia *et al.*, (2010) ont indiqué que l'avantage de l'analyse séquentielle de piste par comparaison à l'analyse conventionnelle de piste est qu'elle permet de

minimiser la colinéarité et d'identifier la contribution réelle de chaque covariable dans le modèle.

Le présent travail consiste à étudier le rendement en graines du pois chiche en fonction de certains paramètres agronomiques, de développement végétatif, phénologiques et de production, relatifs à une collection de huit génotypes de pois chiche du type « kabuli ». La culture a été conduite en culture de printemps, *in situ*, en pots, sous les conditions édapho-climatiques contrôlées du semi-aride supérieur Tunisien.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Conditions édapho-climatiques du site expérimental

L'essai est conduit sur une parcelle du domaine expérimental de l'Institut Supérieur Agronomique (ISA) de Chott Mariem sis au Centre Est de la Tunisie qui fait partie de l'étage bioclimatique semi aride supérieur à une altitude de 6 m au dessus de la mer, une latitude de 35°52' Nord et une longitude de 10°38' Est. La pluviométrie et l'évaporation moyennes annuelles sont respectivement de 370 et 1320 mm/an. Les températures minimales et maximales ont les valeurs moyennes respectives de 14,3 et 23 °C. L'hygrométrie relative et la vitesse du vent sont respectivement de 70 % et 2,3 m/s. Cette zone est caractérisée par une sécheresse qui s'étale sur une période de cinq mois sur douze (mai - septembre). Elle est définie par des précipitations réduites et rares, une évaporation et des températures maximales élevées. Le sol est du type limono-argilo-sableux (USDA, 1951), alcalin, relativement pauvre en matière organique (3,5%) et de faible salinité ayant une conductivité électrique, mesurée à une température de 25 °C, de 0,27 ms/cm. Il est caractérisé par une porosité totale de 52,45%, une capacité au champ de 20,47% et un point de flétrissement de 8,19%.

### Semis et récolte

La culture de pois chiche est réalisée, *in situ*, sous des conditions contrôlées, dans des pots de 24 cm de diamètre et 24 cm de hauteur. Les pots, remplis de terre arable, sont arrangés sous un élément de serre tunnel, couvert avec du polyéthylène de 180µ d'épaisseur, et aéré des deux pignons. Le semis est effectué le 25 avril, soit avec un retard de quatre semaines par rapport à la date normale d'un semis de printemps (Malhotra et Johansen, 1996). Trois graines de pois chiche sont semées par pot. Dans le cas de germinations multiples, un seul semis est laissé, les autres sont éliminés. Ce qui correspond à une densité de semis de 22,12 plants/m<sup>2</sup>. La récolte a eu lieu au début du mois d'août de la même année.

### Matériel végétal

Le matériel végétal est composé de huit génotypes de pois chiche du type « kabuli » dont six sont des variétés commerciales inscrites par l'INRAT dans le catalogue Tunisien des obtentions végétales (Béja<sub>1</sub>, Amdoun<sub>1</sub>, Nayer, Kasseb, Bochra et Chétoui (ILC3279) et deux lignées améliorées, FLIP96-114C et FLIP88-42C, aimablement fournies par l'ICARDA dans le cadre du programme « Legume International Testing Program

(LITP)» Alep; Syrie (Tableau 1). Le dispositif expérimental est en blocs randomisés avec trois répétitions.

**Tableau 1. Géotypes de pois chiche (*Cicer arietinum* L.) du type kabuli**

N°	Nom	Pédigré	Origine
1	Béjal	INRAT 93 -1	tunisienne
2	Amdoun1	Be-sel-81-48	tunisienne
3	Nayer	FLIP 84 - 92 C	tunisienne
4	Kasseb	FLIP 84 - 460 C	tunisienne
5	Bochra	FLIP 84 - 79 C	tunisienne
6	FLIP96-114C	X 93 TH 74 / F L I P 8 7 - 5 1 C X F L I P 9 1 - 125C	I C A R D A / ICRISAT
7	FLIP88-42C	X85 TH 230/ILC 3395 x FLIP 83- 13C	I C A R D A / ICRISAT
8	Chetoui	ILC3279	tunisienne

## Irrigation

L'eau d'irrigation, provenant du réseau de Nebhana, est caractérisée par une conductivité électrique, mesurée à une température de 25 °C, évaluée à 1,09 ms/cm. Elle contient un résidu sec de 0,70 g/l dont 0,25 g/l sont des chlorures de sodium. Quatre doses d'irrigation (DI) à savoir: 100%, 75%, 50% et 25% de la réserve facilement utilisable (RFU) ont été administrées. Les apports d'eau d'irrigation sont effectués sur la base de l'évapotranspiration potentielle de la culture (ETc) (Ben Mechlia, 1998). L'évapotranspiration de référence (ET0) a été calculée à partir de la formule de Blanney-Criddel (Doorenbos et Pruitt, 1977). Le coefficient cultural (Kc) et les durées des phases physiologiques du pois chiche adoptés sont ceux utilisés par la FAO (Allen et al., 1998). La RFU, évaluée à 464ml, est calculée selon la formule citée par Soltner, (1981).

$$RFU = 1/2 * [(Cc - pF)/100] * D_{Ap} * V$$

Avec Cc : Capacité au champ; pF : Point de flétrissement permanent; D<sub>Ap</sub>: Densité apparente; V : Volume de terre dans le pot.

## Paramètres étudiés

L'étude a porté sur des paramètres de développement végétatif, phénologiques et de production.

### a) les paramètres de développement végétatif

- la longueur du système racinaire (LR en cm) : A la fin de la phase de développement végétatif, soit 45 JAS, une plante par traitement hydrique, par géotype et par répétition a été prélevée. Le système racinaire a été rincé à l'eau claire et mesuré à l'aide d'une règle plate;
- la hauteur moyenne des plantes (H, en cm) : au terme du cycle cultural la hauteur des plantes a été mesurée du collet à l'extrémité supérieure;
- le nombre de branches par plante (Nb br);

- la biomasse aérienne (BA, en kg/m<sup>2</sup>): au terme du cycle cultural, après arrachage, la partie aérienne des plantes a été pesée à l'aide d'une balance de précision de laboratoire (Sartorius) qui pèse de 0.01 à 2 kg;

### b) les paramètres phénologiques

- la date de floraison précoce (DFI<sub>Pr</sub>, en jours après semis (JAS)) : la date d'épanouissement des premières fleurs;
- la date de floraison (DFI, en JAS): la date d'épanouissement de 50% des fleurs;
- la durée de la phase de floraison (DrFl, en jours);
- la date de maturité précoce (DMt.Pr, en JAS): la date de jaunissement des premières gousses;
- la date de maturité (DMt, en JAS): la date de jaunissement de 50% des gousses;
- la durée de la phase de maturité (DrMt, en jours);

### c) les paramètres de production

- le taux de nouaison des fleurs (en %): indique le pourcentage de fleurs nouées par rapport au nombre de fleurs épanouies;
- le nombre de gousses par m<sup>2</sup> (Nb.Gous/m<sup>2</sup>) : le nombre de gousses récoltées par traitement, géotype et par répétition est divisé par la superficie récoltée;
- le nombre de graines par m<sup>2</sup> (Nb.Gr/m<sup>2</sup>) : le nombre de graines récoltées par traitement, géotype et par répétition est divisé par la superficie récoltée ;
- le nombre de graines par gousse (Nb Gr/Gous) : le rapport Nb.Gr/m<sup>2</sup> par Nb.Gous/m<sup>2</sup> ;
- le poids des gousses/m<sup>2</sup> (Pds.Gous, en g/m<sup>2</sup>) : les gousses récoltées/m<sup>2</sup> sont pesées;
- le poids relatif des graines (Pds Rel. Gr en %) : c'est le rapport du poids des graines par celui des gousses récoltées;
- le rendement en graines (Rd.Gr en kg/ha): pour chaque traitement, géotype et répétition on a déterminé selon la règle de trois le poids des graines récoltées par m<sup>2</sup> est extrapolée en kg/ha;
- le poids de 100 graines (P100 en g) : pour chaque traitement, géotype et répétition on a déterminé selon la règle de trois le poids de 100 graines
- l'indice de récolte (IR, en %) : pour chaque traitement, géotype et répétition, on a déterminé le rapport du poids des graines récoltées par celui de la biomasse aérienne. La masse racinaire est négligée;

## Analyses statistiques

Dans le but de prévoir les rapports entre le rendement en graines du pois chiche et ses composantes, une matrice de corrélations binaires, coefficient de Pearson, a été établie moyennant le logiciel SPSS pour Windows version 17 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). Les coefficients de corrélation binaires ont été subdivisés en effets directs et indirects qui affectent le rendement en graines, à l'aide d'une analyse conventionnelle par le coefficient de piste, selon la méthode de Wright, (1934) et de Snedecor et Cochran, (1982).

Une régression linéaire multiple « pas à pas » a été effectuée, à l'aide du logiciel JMP version 4 (JMP Design of Experiments; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA), afin de réduire le nombre, assez important, de covariables qui contribuent à l'édification du rendement en graines et d'éliminer celles qui sont de moindre importance dans le modèle séquentiel de piste et organiser les variables prédites en premier et second ordre, sur la base de leurs contributions respectives dans la variation totale du rendement en graines et de la colinéarité minimal (Dalkani, *et al.*, 2011). Le niveau de multicollinéarité a été mesuré, comme suggéré par Hair *et al.*, (1995) à partir de la tolérance et du facteur d'inflation (VIF). Un diagramme d'analyse séquentielle de piste a été élaboré avec le logiciel AMOS version 16.0 (Analysis for moment structures for Windows ; Development Crop., Spring House, USA).

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Etude des corrélations

Le rendement en graines est en corrélations positives hautement significatives avec la durée de la phase de maturité ( $r = 0,46^{**}$ ), le taux de nouaison ( $r = 0,65^{**}$ ), la longueur du système racinaire ( $r = 0,65^{**}$ ), la hauteur moyenne des plantes ( $r = 0,62^{**}$ ), le nombre de branches par plante ( $r = 0,51^{**}$ ), la biomasse aérienne ( $r = 0,81^{**}$ ), le nombre de gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,69^{**}$ ), le nombre de graines/m<sup>2</sup> ( $r = 0,93^{**}$ ), le nombre de graines par gousse ( $r = 0,77^{**}$ ), le poids des gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,99^{**}$ ), le poids relatif des graines ( $r = 0,75^{**}$ ), le poids de 100 graines ( $r = 0,67^{**}$ ), l'indice de récolte ( $r = 0,85^{**}$ ) et la dose d'irrigation ( $r = 0,81^{**}$ ) et en corrélation significative ( $P \leq 0,05$ ) avec la durée de la phase de floraison ( $r = 0,44^*$ ). Il est en corrélation négative, hautement significative avec la floraison précoce ( $r = -0,53^{**}$ ) et significative ( $P \leq 0,05$ ) avec la date de floraison ( $r = -0,45^*$ ). Arshad *et al.*, (2004) ont trouvé que le rendement en graines par plante est en corrélation hautement significative, positive, avec la hauteur moyenne des plantes, le nombre de gousses par plante, le poids de 100 graines et la biomasse aérienne et négative avec la date de floraison, le nombre de branches primaires et l'indice de récolte. Ils ont approuvé l'importance de ces caractères dans la détermination du rendement en graines. Noor *et al.*, (2003) ont remarqué que le rendement en graines est en corrélation positive avec la biomasse aérienne et le poids de 100 graines et négative avec l'indice de récolte. Ils ont signalé que l'amélioration du rendement en graines du pois chiche doit être basée sur une biomasse aérienne importante et des graines de gros calibre. La forte relation entre le rendement en graines et la dose d'irrigation traduit la nécessité absolue de l'eau pour la réalisation convenable des phases de la croissance végétative et reproductrice de la culture de pois chiche. Golezani *et al.*, (2008) ont souligné que l'irrigation, limitée aux besoins hydriques de la culture durant les phases de croissance et de développement critiques, peut être déterminante pour la réalisation du rendement potentiel des variétés de pois chiche.

La date de floraison précoce est en corrélation positive hautement significative avec la date de floraison ( $r = 0,81^{**}$ ), la date de maturité précoce ( $r = 0,62^{**}$ ) et la date de maturité ( $r = 0,56^{**}$ ). Elle est en corrélation négative hautement significative avec la durée de la phase de floraison ( $r = -0,55^{**}$ ), le nombre de graines par gousse ( $r = -0,46^{**}$ ), le poids des gousses/m<sup>2</sup> ( $r = -0,49^{**}$ ), le poids relatif des graines ( $r = -0,57^{**}$ ), le poids de 100 graines ( $r = -0,61^{**}$ ) et l'indice de récolte ( $r = -0,68^{**}$ ) et en corrélation négative et significative au seuil de 5% avec le taux de nouaison

( $r = -0,36^*$ ) et le nombre de graines/m<sup>2</sup> ( $r = -0,38^*$ ) (Tableau 2). Une floraison précoce semble associée à une maturité précoce, une floraison étalée dans le temps. Elle révèle un phénomène de tolérance à la sécheresse par évitement et a engendré une augmentation du rendement en graines à travers ses composantes.

La date de floraison est en corrélation positive hautement significative avec la date de maturité précoce ( $r = 0,62^{**}$ ), la date de maturité ( $r = 0,65^{**}$ ). Elle est en corrélation négative hautement significative avec le taux de nouaison ( $r = -0,50^{**}$ ), le nombre de graines par gousse ( $r = -0,51^{**}$ ), le poids relatif des graines ( $r = -0,61^{**}$ ), le poids de 100 graines ( $r = -0,67^{**}$ ) et l'indice de récolte ( $r = -0,66^{**}$ ) et significative ( $P \leq 0,05$ ) avec le poids des gousses/m<sup>2</sup> ( $r = -0,43^*$ ) et la dose d'irrigation ( $r = -0,36^*$ ) (Tableau 2). Il paraît que les irrigations, pluviales ou autres, retardent la floraison tout en favorisant la croissance végétative et l'accumulation des réserves. C'est ainsi qu'au niveau des cultures irriguées le rendement en graines est nettement plus élevé que celui des cultures pluviales. D'autres travaux ont montré que la date de floraison est en corrélation significative, positive, avec le nombre de branches primaires et négative avec la hauteur moyenne des plantes (Noor *et al.*, 2003; Arshad *et al.*, 2004), le nombre de gousses par plante et l'indice de récolte ((Noor *et al.*, 2003). Özveren Yücel *et al.*, (2006) ont trouvé que la date de floraison est en corrélation significative, négative avec la hauteur moyenne des plantes, le nombre de gousses pleines et le poids de 100 graines.

La date de maturité précoce est en corrélation positive hautement significative avec la date de maturité ( $r = 0,92^{**}$ ). Elle est en corrélation négative hautement significative avec l'indice de récolte ( $r = -0,52^{**}$ ) et significative ( $P \leq 0,05$ ) avec la durée de la phase de maturité ( $r = -0,37^*$ ), le taux de nouaison ( $r = -0,43^*$ ), le poids relatif des graines ( $r = -0,44^*$ ) et le poids de 100 graines ( $r = -0,43^*$ ) (Tableau 2). La date de maturité est en corrélation négative hautement significative avec l'indice de récolte ( $r = -0,49^{**}$ ) et significative au seuil de 5% avec le poids relatif des graines ( $r = -0,41^*$ ) et le poids de 100 graines ( $r = -0,41^*$ ). Les dates de maturité et de maturité précoce sont proportionnelles aux dates de floraison précoce et de floraison et inversement proportionnelles au rendement en graines, au poids relatif des graines, au poids de 100 graines et à l'indice de récolte. Il semble qu'une maturité tardive induite par une phase de développement reproductif suffisamment longue permettant une accumulation de réserves assez élevée qui se traduit par la formation de gousses pleines et de graines de gros calibre.

La durée de la phase de floraison est en corrélation positive hautement significative avec la durée de la phase de maturité ( $r = 0,51^{**}$ ) et significative ( $P \leq 5\%$ ) avec la biomasse aérienne ( $r = 0,37^*$ ), le nombre de graines/m<sup>2</sup> ( $r = 0,40^*$ ) et le poids des gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,44^*$ ). La durée de la phase de maturité est en corrélation positive hautement significative avec le taux de nouaison ( $r = 0,51^{**}$ ), la hauteur moyenne des plantes ( $r = 0,45^{**}$ ), le nombre de branches par plante ( $r = 0,46^{**}$ ), la biomasse aérienne ( $r = 0,57^{**}$ ), le nombre de gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,61^{**}$ ), le nombre de graines/m<sup>2</sup> ( $r = 0,53^{**}$ ), le poids des gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,49^{**}$ ) et la dose d'irrigation ( $r = 0,49^{**}$ ) et significative ( $P \leq 5\%$ ) avec la longueur du système racinaire ( $r = 0,42^*$ ) (Tableau 2). Etant donné que le pois chiche est une espèce à croissance indéterminée, la durée de sa phase de maturité est tributaire des disponibilités en eau dans le sol. La durée de la phase de floraison paraît proportionnelle à celle de la phase de maturité. Les génotypes de pois chiche caractérisés par des phases de floraison et de maturité relativement longues semblent avoir



une biomasse aérienne et souterraine élevées et une migration des réserves vers les gousses et les graines plus importante.

Le taux de nouaison est en corrélation positive hautement significative avec la longueur du système racinaire ( $r = 0,60^{**}$ ), la hauteur moyenne des plantes ( $r = 0,64^{**}$ ), le nombre de branches par plante ( $r = 0,50^{**}$ ), la biomasse aérienne ( $r = 0,77^{**}$ ), le nombre de graines/m<sup>2</sup> ( $r = 0,74^{**}$ ), le nombre de graines par gousse ( $r = 0,72^{**}$ ), le poids des gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,70^{**}$ ), le poids relatif des graines ( $r = 0,69^{**}$ ), le poids de 100 graines ( $r = 0,59^{**}$ ), l'indice de récolte ( $r = 0,65^{**}$ ) et la dose d'irrigation ( $r = 0,79^{**}$ ) et significative ( $P \leq 0,05$ ) avec le nombre de gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,42^*$ ) (Tableau 2). Un taux de nouaison élevé est assujéti simultanément à une satisfaction des besoins hydriques de la culture et à un développement végétatif important. Il en résulte une formation de gousses pleines et un rendement en graines élevé. Nayyar *et al.*, (2006) ont indiqué que, pour le pois chiche, la floraison et la nouaison sont les phases de croissance les plus sensibles au stress hydrique.

La longueur du système racinaire est en corrélation positive, hautement significative, avec la hauteur moyenne des plantes ( $r = 0,71^{**}$ ), le nombre de branches par plante ( $r = 0,66^{**}$ ), la biomasse aérienne ( $r = 0,77^{**}$ ), le nombre de gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,57^{**}$ ), le nombre de graines/m<sup>2</sup> ( $r = 0,73^{**}$ ), le nombre de graines par gousse ( $r = 0,53^{**}$ ), le poids des gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,69^{**}$ ), le poids relatif des graines ( $r = 0,49^{**}$ ), l'indice de récolte ( $r = 0,48^{**}$ ) et la dose d'irrigation ( $r = 0,77^{**}$ ) et significative au seuil de 5% avec le poids de 100 graines ( $r = 0,40^*$ ) (Tableau 2). La longueur du système racinaire des génotypes de pois chiche est proportionnelle à la réserve hydrique dans le sol. Un système racinaire bien développé suscite un développement de plantes vigoureux et à haut rendement.

La hauteur moyenne des plantes est en corrélation positive, hautement significative, avec le nombre de branches par plante ( $r = 0,63^{**}$ ), la biomasse aérienne ( $r = 0,89^{**}$ ), le nombre de gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,64^{**}$ ), le nombre de graines/m<sup>2</sup> ( $r = 0,76^{**}$ ), le nombre de graines par gousse ( $r = 0,51^{**}$ ), le poids des gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,68^{**}$ ) et la dose d'irrigation ( $r = 0,86^{**}$ ) et significative ( $P \leq 5\%$ ) avec le poids relatif des graines ( $r = 0,43^*$ ) et l'indice de récolte ( $r = 0,39^*$ ) (Tableau 2). Le port érigé assez développé des génotypes de pois chiche paraît propice pour l'interception des rayons solaires, l'assimilation chlorophyllienne, l'accumulation des réserves et l'amélioration du rendement en graines à travers ses composantes. D'autres travaux ont montré que la hauteur moyenne des plantes est en corrélation significative élevée, positive, avec le nombre de gousses par plante (Arshad *et al.*, 2004) et la biomasse aérienne et en corrélation négative avec le nombre de branches primaires (Noor *et al.*, 2003; Arshad *et al.*, 2004). D'après leurs résultats, Özveren Yücel *et al.*, (2006) ont stipulé que la corrélation positive entre la hauteur moyenne des plantes et le nombre de gousses pleines et le poids de 1000 graines indique que la hauteur des plantes contribue dans l'amélioration du rendement en graines. Cependant, la corrélation négative entre la hauteur moyenne des plantes et le nombre de branches secondaires et l'indice de récolte indique que les génotypes à port érigé sont caractérisés par une ramification secondaire et un indice de récolte faibles.

Le nombre de branches par plante est en corrélation positive, hautement significative avec la biomasse aérienne ( $r = 0,68^{**}$ ), le nombre de gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,48^{**}$ ), le nombre de graines/m<sup>2</sup> ( $r = 0,60^{**}$ ), le nombre de graines par gousse ( $r = 0,45^{**}$ ), le poids des gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,55^{**}$ ) et la dose d'irrigation ( $r =$

$0,69^{**}$ ) et significative ( $P \leq 0,05$ ) avec le poids relatif des graines ( $r = 0,40^*$ ) (Tableau 2). Une ramification levée des plantes de pois chiche contribue dans le développement de la biomasse aérienne, l'augmentation du nombre de gousses pleines de graines de gros calibre et engendre un rendement en graines élevé.

La biomasse aérienne est en corrélation positive, hautement significative avec le nombre de gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,76^{**}$ ), le nombre de graines/m<sup>2</sup> ( $r = 0,95^{**}$ ), le nombre de graines par gousse ( $r = 0,69^{**}$ ), le poids des gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,87^{**}$ ), le poids relatif des graines ( $r = 0,59^{**}$ ), l'indice de récolte ( $r = 0,55^{**}$ ) et les doses d'irrigation ( $r = 0,92^{**}$ ) et significative ( $P \leq 0,05$ ) avec le poids de 100 graines ( $r = 0,41^*$ ) (Tableau 2). Elle est proportionnelle à ces composantes du rendement en graines. La croissance végétative de la culture de pois chiche est tributaire des réserves en eau dans le sol. En fait, des disponibilités hydriques suffisantes occasionnent le développement de plantes vigoureux à production élevée. Or, la vigueur traduit l'efficacité de conversion de la biomasse aérienne en rendement en graines.

Le nombre de gousses/m<sup>2</sup> est en corrélation positive hautement significative avec le nombre de graines/m<sup>2</sup> ( $r = 0,80^{**}$ ), le poids des gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,74^{**}$ ) et les doses d'irrigation ( $r = 0,63^{**}$ ). Le nombre de graines/m<sup>2</sup> est en corrélation positive hautement significative avec le nombre de graines par gousse ( $r = 0,74^{**}$ ), le poids des gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,97^{**}$ ), le poids relatif des graines ( $r = 0,67^{**}$ ), le poids de 100 graines ( $r = 0,51^{**}$ ), l'indice de récolte ( $r = 0,69^{**}$ ) et les doses d'irrigation ( $r = 0,88^{**}$ ). Le nombre de graines par gousse est en corrélation positive hautement significative avec le poids des gousses/m<sup>2</sup> ( $r = 0,77^{**}$ ), le poids relatif des graines ( $r = 0,96^{**}$ ), le poids de 100 graines ( $r = 0,87^{**}$ ), l'indice de récolte ( $r = 0,85^{**}$ ) et les doses d'irrigation ( $r = 0,71^{**}$ ). Le poids des gousses/m<sup>2</sup> est en corrélation positive hautement significative avec le poids relatif des graines ( $r = 0,74^{**}$ ), le poids de 100 graines ( $r = 0,63^{**}$ ), l'indice de récolte ( $r = 0,81^{**}$ ) et les doses d'irrigation ( $r = 0,85^{**}$ ). Le poids relatif des graines est en corrélation positive hautement significative avec le poids de 100 graines ( $r = 0,95^{**}$ ), l'indice de récolte ( $r = 0,92^{**}$ ) et la dose d'irrigation ( $r = 0,64^{**}$ ). Le poids de 100 graines est en corrélation positive hautement significative avec l'indice de récolte ( $r = 0,93^{**}$ ) et les doses d'irrigation ( $r = 0,51^{**}$ ) (Tableau 2). En l'absence de stress hydrique, les plantes de pois chiche produisent, un nombre élevé de gousses pleines avec des graines double par gousse et de gros calibre.

L'indice de récolte est en corrélation positive hautement significative avec les doses d'irrigation ( $r = 0,64^{**}$ ). Les cultures de pois chiche conduites en irrigué sont caractérisées par une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau qui traduit une conversion élevée de la biomasse aérienne en rendement en graines.

### Analyse conventionnelle par le coefficient de piste

L'analyse conventionnelle par le coefficient de piste, basée sur le rendement en graines du pois chiche comme variable dépendante a révélé que le poids des gousses/m<sup>2</sup> a un effet direct positif, très hautement significatif ( $1,386^{***}$ ); alors que le nombre de graines/m<sup>2</sup> a un effet direct négatif hautement significatif ( $-0,388^{**}$ ) (Tableau 3). L'analyse des coefficients de corrélations binaires indique que ces deux derniers paramètres sont positivement et très fortement associés au rendement en graines (Tableau 3).

La date de maturité précoce, la durée de la phase de maturité, la hauteur moyenne des plantes, le nombre de branches par plante, le nombre de graines par gousse, le poids relatif des graines et l'indice

**Tableau 3. Effets directs (en diagonale) et indirects des paramètres agronomiques sur le rendement en graines du pois chiche (*Cicer arietinum* L.) issus de l'analyse conventionnelle par le coefficient de piste**

Variables	Effets Indirects																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	r
1. DFI Pr (-0,02ns)	0,012	-0,012	0,008	-0,009	-0,008	0,004	0,005	0,002	0,003	0,001	0,004	0,003	0,006	0,007	0,007	0,009	0,009	0,010	0,004	-0,534**
2. DFI (-0,01ns)	-0,007	-0,01ns	0,002	-0,006	-0,006	0,000	0,005	0,002	0,002	0,000	0,002	0,001	0,003	0,005	0,004	0,005	0,006	0,006	0,003	-0,448*
3. DrFI	0,009	0,003	(-0,02ns)	0,002	-0,001	-0,008	-0,004	-0,004	-0,005	-0,001	-0,006	-0,005	-0,006	-0,005	-0,007	-0,004	-0,004	-0,005	-0,005	0,444*
4. DMt. Pr	0,034	0,034	-0,007	(0,06ns)	0,051	-0,020	-0,024	-0,006	-0,007	-0,007	-0,011	-0,010	-0,015	-0,017	-0,018	-0,024	-0,024	-0,028	-0,016	-0,342
5. DMt	-0,007	-0,008	0,000	-0,011	(-0,01ns)	0,002	0,004	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,005	0,005	0,006	0,003	-0,303
6. DrMt	-0,005	-0,001	0,010	-0,007	-0,003	(0,02ns)	0,010	0,008	0,009	0,009	0,011	0,012	0,011	0,005	0,010	0,005	0,003	0,006	0,010	0,455**
7. TN (%)	0,003	0,004	-0,002	0,003	0,003	-0,004	(-0,01ns)	-0,005	-0,005	-0,004	-0,006	-0,003	-0,006	-0,006	-0,006	-0,005	-0,005	-0,005	-0,006	0,650**
8. LR (cm)	0,002	0,002	-0,003	0,001	0,001	-0,005	-0,007	(-0,01ns)	-0,008	-0,007	-0,008	-0,006	-0,008	-0,006	-0,008	-0,005	-0,004	-0,005	-0,008	0,650**
9. H (cm)	-0,009	-0,009	0,016	-0,006	-0,005	0,021	0,030	0,034	(0,05ns)	0,029	0,042	0,030	0,036	0,024	0,032	0,020	0,013	0,018	0,041	0,619**
10. Nb br	0,000	0,000	0,001	-0,001	-0,001	0,005	0,005	0,007	0,006	(0,01ns)	0,007	0,005	0,006	0,005	0,005	0,004	0,002	0,003	0,007	0,508**
11. BA (kg/m <sup>2</sup> )	0,020	0,020	-0,029	0,017	0,012	-0,045	-0,062	-0,062	-0,071	-0,055	(-0,08ns)	-0,061	-0,076	-0,055	-0,070	-0,047	-0,033	-0,044	-0,074	0,814**
12. Nb.Gous/m <sup>2</sup>	0,002	0,001	-0,003	0,002	0,001	-0,006	-0,004	-0,006	-0,006	-0,005	-0,008	(-0,01ns)	-0,008	-0,002	-0,007	-0,002	0,000	-0,003	-0,006	0,691**
13. Nb.Gr/m <sup>2</sup>	0,148	0,135	-0,153	0,106	0,087	-0,206	-0,287	-0,283	-0,296	-0,233	-0,367	-0,311	(-0,39**)	-0,285	-0,376	-0,259	-0,198	-0,268	-0,341	0,931**
14. Nb Gr/Gous	-0,009	-0,010	0,006	-0,006	-0,006	0,005	0,014	0,011	0,010	0,009	0,014	0,004	0,015	(0,02ns)	0,015	0,019	0,017	0,018	0,014	0,766**
15. Pds. Gous/g	-0,682	-0,589	0,604	-0,464	-0,401	0,681	0,965	0,958	0,938	0,760	1,211	1,021	1,343	1,064	(1,39**)	1,019	0,869	1,117	1,178	0,992**
16. Pds. Relatif Gr(%)	-0,011	-0,012	0,005	-0,009	-0,008	0,005	0,014	0,010	0,009	0,008	0,012	0,003	0,013	0,019	0,015	(0,02ns)	0,019	0,018	0,013	0,751**
17. P100 (g)	0,058	0,063	-0,022	0,041	0,039	-0,013	-0,056	-0,038	-0,026	-0,021	-0,039	-0,001	-0,049	-0,083	-0,060	-0,090	(-0,10ns)	-0,088	-0,048	0,666**
18. IR	-0,072	-0,070	0,036	-0,055	-0,052	0,031	0,069	0,051	0,041	0,031	0,058	0,030	0,073	0,090	0,085	0,098	0,098	(0,11ns)	0,067	0,845**
19. DI (mm)	0,007	0,009	-0,008	0,007	0,006	-0,012	-0,019	-0,018	-0,021	-0,017	-0,022	-0,015	-0,021	-0,017	-0,020	-0,015	-0,012	-0,015	(-0,02ns)	0,811**
Total	-0,520	-0,440	0,460	-0,396	-0,291	0,434	0,659	0,660	0,572	0,498	0,894	0,700	1,320	0,747	-0,395	0,731	0,761	0,739	0,835	-

Ns : non significatif ; \* : Significatif à P<5% ; \*\* : Significatif à P<1% ; Les chiffres entre parenthèse sont les effets directs.

de récolte ont des effets directs positifs non significatifs. Alors que la date de floraison précoce, la date de floraison, la durée de la phase de floraison, la date de maturité, le taux de nouaison, la longueur du système racinaire, la biomasse aérienne, le nombre de gousses/m<sup>2</sup>, le poids de 100 graines et la dose d'irrigation ont des effets directs négatifs non significatifs (Tableau 3). Tous ces paramètres sont en corrélations positives avec le rendement en graines, excepté la date de floraison précoce et la date de floraison qui ont des corrélations significatives négatives. Ces résultats suscitent que, le poids des gousses/m<sup>2</sup> et le nombre de graines/m<sup>2</sup> pourront être adoptés comme des critères principaux dans un programme de sélection de génotypes de pois chiche à haut rendement. Noor *et al.*, (2003) ont indiqué que le rendement en graines est un caractère complexe qui résulte de l'interaction de plusieurs variables indépendantes, dont certaines sont connues et d'autres sont inconnues. Ils ont trouvé que le nombre de gousses par plante, le nombre de branches secondaires et le poids de 100 graines ont les contributions les plus élevées sur le rendement en graines. Özveren Yücel *et al.*, (2006) ont rapporté que le rendement en graines et ses composants sont des paramètres polygéniques fortement influencés par des facteurs environnementaux et d'autres facteurs qui doivent être identifiés. Ils ont remarqué que le rendement en graines est en corrélations positives significatives avec la hauteur moyenne des plantes, le nombre de branches, le nombre de gousses pleines et le nombre de graines par plante et que le nombre de gousses et le nombre de graines par plante ont les effets directs positifs les plus élevés sur le rendement en graines. Ciftçi, *et al.*, (2004) ont remarqué que le nombre de gousses par plante, la biomasse aérienne et de l'indice de récolte ont les plus importants effets directs et indirects sur le rendement en graines; alors que Tomar, *et al.*, (1982) ont indiqué que le nombre de gousses par plante et le poids de 100 graines ont les effets directs les plus élevés. Talebi *et al.*, (2007) ont indiqué que la biomasse aérienne, la hauteur moyenne des plantes, le nombre de gousses par plante et le nombre de branches primaires ont des effets directs positifs sur le rendement en graines. En culture pluviale, Kumar et Arora (1991) ont préconisé que la biomasse aérienne, le poids des gousses par plante, le poids de 100 graines et la hauteur moyenne des plantes sont les principales composantes du rendement en graines du pois chiche.

Les dates de floraison précoce, de floraison, de maturité précoce et de maturité ont les effets indirects totaux négatifs respectifs (-0,52); (-0,44); (-0,396) et (-0,291) sur le rendement en graines. Elles ont des effets indirects élevés positifs sur le rendement en graines, principalement, à travers, le nombre de graines/m<sup>2</sup>, le poids de 100 graines, la date de maturité précoce et la biomasse aérienne et négatifs, surtout, à travers le poids des gousses/m<sup>2</sup>, l'indice de récolte et le poids relatif des graines (Tableau 3). Kumar et Abbo, (2001) ont constaté que dans des zones arides, les génotypes à floraison précoce ont produit un rendement en graines plus élevé, estimé à 14 à 19 q/ha, que celui des génotypes à floraison tardive, qui est de l'ordre de 7 q/ha. Ces mêmes auteurs ont rapporté que les gènes qui contrôlent la floraison influencent la date de maturité et le rendement en graines à travers leurs effets sur le début et la durée de la phase reproductive, le nombre de branches et le nombre de fleurs par nœud. Les génotypes de pois chiche ayant échappé à la sécheresse terminale moyennant une floraison et une maturité précoce sont dotés d'une biomasse aérienne importante et d'un nombre élevé de graines de gros calibre/m<sup>2</sup>. De mêmes résultats sont trouvés par Özveren Yücel *et al.*, (2006) qui stipulent que la date de floraison a un effet direct négatif et léger sur le rendement en graines par plante et un effet indirect à travers le

nombre de gousses pleines et le nombre de graines par plante, le poids de 1000 graines et la hauteur moyenne des plantes. Il en découle que le choix des génotypes à floraison précoce contribue à l'augmentation du rendement en graines à travers les effets indirects de ces paramètres. Kumar et Abbo, (2001) ont remarqué que, dans les zones semi arides, la date de floraison est la principale composante d'adaptation du pois chiche. Pour éviter les effets néfastes de la sécheresse terminale, il serait utile de développer des variétés vigoureuses pourvues d'une floraison et d'une maturité précoces. Toutefois, la date de floraison varie en fonction de la réponse de la plante aux facteurs génétiques, notamment, des gènes mineurs et des gènes majeurs, à la latitude, à la température, à la longueur du jour, au photopériodisme et à la vernalisation. En revanche, Perez de la Vega, (1996), a consigné que la date de floraison est contrôlée exclusivement par voie génétique et qu'elle est influencée par le photopériodisme et le thermopériodisme.

Les durées des phases de floraison et de maturité ont les effets indirects totaux positifs respectifs (0,434); (0,46). Elles ont des effets indirects sur le rendement en graines, positifs à travers le poids des gousses/m<sup>2</sup>, l'indice de récolte et la hauteur moyenne des plantes et négatifs à travers le nombre de graines/m<sup>2</sup>, la biomasse aérienne et le poids de 100 graines (Tableau 3). Comme le pois chiche est une espèce à croissance indéterminée, son élévation en hauteur est proportionnelle à la durée de la phase de maturité. Les longues durées des phases de floraison et de maturité sont favorables pour l'accumulation de réserves nécessaires pour la formation de gousses pleines avec des graines de gros calibres. La biomasse aérienne et le nombre de graines/m<sup>2</sup> sont inversement proportionnels aux durées des phases de floraison et de maturité. Kumar et Abbo, (2001) ont signalé que, chez les espèces à croissance indéterminée, tel que le pois chiche, la floraison précoce permet à la plante de prolonger sa phase de croissance reproductive, particulièrement, lorsque la durée de la période de floraison est délimitée par la sécheresse terminale. Toutefois, la précocité de la floraison est associée à une courte période d'accumulation de réserves favorables pour l'élaboration de la biomasse et le développement d'un système racinaire profond. En revanche, une biomasse aérienne réduite limite le rendement potentiel et engendre un enracinement superficiel qui rend les plantes vulnérables aux divers effets de la sécheresse intermittente.

Le taux de nouaison a un important effet indirect total positif de (0,659). Il a des effets indirects élevés, positifs, à travers, le poids des gousses/m<sup>2</sup>, l'indice de récolte, la hauteur moyenne des plantes et le nombre de graines/gousse et négatifs à travers, la biomasse aérienne, le poids de 100 graines, la date de maturité précoce, la dose d'irrigation et le nombre de graines/m<sup>2</sup> (Tableau 3). Il paraît que le taux de nouaison a une action indirecte positive sur le rendement en graines à travers la formation d'un nombre élevé de gousses pleines. Néanmoins, suite au processus d'échappement à la sécheresse terminale, la maturité précoce limite la formation de fleurs fertiles et l'accumulation de réserves favorables pour la formation d'un nombre élevé de graines de gros calibres. Les doses d'irrigation élevées paraissent défavorables pour la nouaison et favorables pour la formation de pseudo-fleurs ou fausses fleurs ou encore fleurs imparfaites, qui avortent et ne donnent pas de gousses (Roberts *et al.*, 1980). Slama, (1998) a énoncé que l'apparition des fleurs imparfaites est liée aux variations des conditions climatiques. Leur nombre augmente, surtout, sous les conditions d'humidité élevée et des températures basses, inférieures ou égales à 15°C. Khanna-Chopra, et Sinha, (1987) ont remarqué qu'en cas de précipitations faibles ou rares



et de températures élevées, supérieure à 15 °C, avec un optimum entre 20 et 24 °C, toutes les fleurs sont fertiles et les fausses fleurs sont presque inexistantes.

La longueur du système racinaire a un effet indirect total positif de (0,66) et des effets indirects importants, positifs, à travers, le poids des gousses/m<sup>2</sup>, l'indice de récolte, la hauteur moyenne des plantes, et négatifs, à travers, le nombre de graines/m<sup>2</sup>, la biomasse aérienne, le poids de 100 graines et la dose d'irrigations (Tableau 3). Il semble qu'un système racinaire assez développé contribue à l'augmentation du rendement en graines à travers la croissance des plantes en hauteur qui intercepte le maximum de rayonnement solaire favorable pour l'assimilation chlorophyllienne, l'accumulation des réserves et la formation des gousses pleines. En revanche, les doses d'irrigations élevées favorisent le développement d'un système racinaire court et superficiel qui expose les plantes aux contraintes abiotiques, notamment, hydriques et thermiques.

La hauteur moyenne des plantes de pois chiche a un effet indirect total positif de (0,572) et des effets indirects élevés sur le rendement, positifs, à travers, le poids des gousses/m<sup>2</sup> et l'indice de récolte et négatifs, à travers, le nombre de graines/m<sup>2</sup>, la biomasse aérienne, le poids de 100 graines et la dose d'irrigation (Tableau 3). Ciftçi, *et al.*, (2004) ont remarqué que la hauteur moyenne des plantes a des effets indirects élevés sur le rendement en graines, positifs, à travers, la biomasse aérienne et négatifs à travers le nombre de gousses par plante et l'indice de récolte. Özveren Yücel *et al.*, (2006) ont trouvé qu'elle a un effet direct positif et des effets indirects, positifs, à travers le nombre de gousses pleines et le poids de 1000 graines et négatif à travers l'indice de récolte. En outre, Noor, *et al.*, (2003) ont trouvé que la hauteur des plantes a un effet direct négatif et des effets indirects positifs à travers la date de floraison, la date de maturité, le nombre de branches et l'indice de récolte et négatifs à travers le nombre de gousses, le poids de 100 graines et la biomasse aérienne.

Le nombre de branches par plante a un effet indirect total positif de (0,498) et des effets indirects élevés sur le rendement en graines, positifs, à travers, le poids des gousses/m<sup>2</sup>, l'indice de récolte et la hauteur moyenne des plantes et négatifs à travers le nombre de graines/m<sup>2</sup>, la biomasse aérienne et le poids de 100 graines (Tableau 3). Ciftçi, *et al.*, (2004) ont signalé que le nombre de branches par plante a des effets indirects élevés sur le rendement en graines, positifs, à travers, la biomasse aérienne et l'indice de récolte et négatifs à travers la hauteur moyenne des plantes et le poids de 1000 graines.

La biomasse aérienne a un effet indirect total positif très élevé de (0,894) et des effets indirects élevés sur le rendement en graines positifs à travers, le poids des gousses/m<sup>2</sup>, l'indice de récolte et la hauteur moyenne des plantes et négatifs, à travers, le nombre de graines/m<sup>2</sup>, le poids de 100 graines et les doses d'irrigation (Tableau 3). Ciftçi, *et al.*, (2004) ont trouvé que la biomasse aérienne a des effets indirects sur le rendement en graines positifs, à travers, le nombre de branches par plante, le nombre de gousses par plante, l'indice de récolte et le poids de 1000 graines et négatifs et faibles, à travers, la hauteur moyenne des plantes.

Le nombre de gousses/m<sup>2</sup>, le nombre de graines/m<sup>2</sup> et le nombre de graines/gousse ont les effets indirects totaux positifs respectifs (0,7) ; (1,32) et (0,747). Ils ont des effets indirects positifs très élevés à travers le poids des gousses/m<sup>2</sup>. Les plus importants effets indirects négatifs du nombre de gousses/m<sup>2</sup> sont à travers le nombre de graines/m<sup>2</sup> et la biomasse aérienne. Ceux du nombre

de graines/m<sup>2</sup> sont à travers la biomasse aérienne, le poids de 100 graines et la dose d'irrigation. Ceux du nombre de graines/gousse sont à travers le nombre de graines/m<sup>2</sup>, le poids de 100 graines et la biomasse aérienne (Tableau 3). Ciftçi, *et al.*, (2004) ont rapporté que le nombre de gousses par plante a des effets indirects positifs sur le rendement en graines, à travers, la biomasse aérienne et l'indice de récolte. Noor *et al.*, (2003) et Özveren Yücel *et al.*, (2006) ont remarqué que le nombre de gousses pleines et le nombre de graines par plante ont la contribution indirecte la plus élevée dans l'édification du rendement en graines. Ces résultats suggèrent que l'amélioration du rendement en graines du pois chiche du type kabuli devrait être basée sur des nombres de gousses pleines et de graines par plante élevés (Özveren Yücel *et al.*, 2006). Il semble que les génotypes de pois chiche caractérisés par un port érigé ont une biomasse réduite. Néanmoins, la croissance en hauteur de ces types de pois chiche a favorisé l'assimilation chlorophyllienne et l'accumulation des réserves traduite par la production de gousses pleines et un rendement en graines élevé.

Le poids des gousses/m<sup>2</sup> a un effet indirect total négatif de (-0,395) et des effets indirects positifs à travers l'indice de récolte et la hauteur moyenne des plantes et négatifs, principalement, à travers le nombre de graines/m<sup>2</sup> (Tableau 3). Bhattarai, (2005) a remarqué que l'amélioration du rendement en graines par plante du soja est associée à une augmentation du nombre de gousses de faible poids moyen.

Le poids relatif des graines et le poids de 100 graines ont les effets indirects totaux positifs, sur le rendement en graines, respectifs de (0,731) et (0,761) et des effets indirects, positifs, à travers le poids des gousses/m<sup>2</sup> et l'indice de récolte et négatifs, surtout, à travers le nombre de graines/m<sup>2</sup> (Tableau 3). Il paraît que la formation des graines de gros calibre, inversement proportionnelle au nombre de graines/m<sup>2</sup>, est favorable pour l'amélioration du rendement en graines du pois chiche.

L'indice de récolte et la dose d'irrigation ont des effets indirects totaux positifs de valeurs respectives (0,739) et (0,835). Ils ont des effets indirects très élevés, positifs, à travers le poids des gousses/m<sup>2</sup> et négatifs à travers le nombre de graines/m<sup>2</sup> (Tableau 3). Des résultats similaires trouvés par Talebi *et al.*, (2007) indiquent que l'indice de récolte est en corrélation positive et hautement significative avec le rendement en graines et il a l'effet direct le plus élevé sur ce dernier. D'autant plus, son effet indirect est positif à travers la hauteur moyenne des plantes, le nombre de gousses par plante, le nombre de graines par gousse et la biomasse aérienne, et négatif et faible à travers les dates de floraison et de maturité, le poids de 100 graines et le nombre de branches primaires. Généralement les génotypes de pois chiche du type kabuli sont caractérisés par un port érigé ou semi érigé. Il paraît que, pour ce type de pois chiche, les doses d'irrigation élevées favorisent la croissance en hauteur au détriment de la biomasse aérienne. Néanmoins, en culture irriguée, grâce à la formation de gousses pleines, le rendement en graines paraît élevé.

### Régression linéaire multiple « pas à pas »

Ciftçi, *et al.*, (2004) ont remarqué que les corrélations entre le rendement en graines du pois chiche et les composantes agronomiques qui l'affectent sont insuffisantes pour définir les critères de sélection. D'autant plus, le nombre de paramètres agronomiques étudiés, assez élevé, entrave le choix adéquat des critères de sélection. Mekhlouf, *et al.*, (2006) ont utilisé le modèle

de régression linéaire multiple « pas à pas » pour rechercher les relations entre les variations du rendement en grains du blé dur (*Triticum durum* Desf.) et les facteurs climatiques. Le diagnostic du rendement en graines du pois chiche a montré qu'il suit le model en régression linéaire multiple « pas à pas » suivant:

$$Rd.Gr = - 197,42 + 2,09*DMtPr + 1,13*H -359,87*BA - 0,92*NbGr/m^2 + 9,59*PdsGous/m^2 + 0,63*PdsRelGr - 2,54*P100 + 1,85*IR \quad (1)$$

$$R^2 = 0,998 ; AIC = 165,54$$

Avec Rd.Gr: Rendement eb graines; DMtPr: Date de maturité précoce; H: Hauteur moyenne des plantes; BA: Biomasse aérienne; NbGr/m<sup>2</sup>: Nombre de graines/m<sup>2</sup>; PdsGous/m<sup>2</sup>: Poids des gousses/m<sup>2</sup>; PdsRelGr: Poids relatif des graines; P100: Poids de 100 graines; IR: Indice de récolte; R<sup>2</sup>: Coefficient de détermination multiple ; AIC: Critère d'information d' Akaike

Le coefficient de détermination multiple (R<sup>2</sup> = 0,998), le plus élevé, associé au plus faible critère d'information d' Akaike (AIC = 165,54) indiquent que le modèle obtenu par la régression linéaire multiple « pas à pas » est le meilleur modèle qui décrit le rendement en graines par les covariables les plus explicatives et qui sont singulièrement: la date de maturité précoce, la hauteur moyenne des plantes, la biomasse aérienne, le nombre de graines/m<sup>2</sup>, le poids des gousses/m<sup>2</sup>, le poids relatif des graines, le poids de 100 graines et l' indice de récolte.

Bien que la date de maturité précoce soit en corrélation négative et non significative avec le rendement en graines (Tableau 2), elle contribue positivement à son amélioration. En effet, elle traduit la tolérance à la sécheresse terminale par esquivé. D'ailleurs,

Singh *et al.*, (1994) ont énoncé que la maturité précoce, est significativement associé à la tolérance à la sécheresse. D'autres auteurs ont prétendu que, dans les zones sèches, l'échappement au stress hydrique pourrait se manifester à travers la floraison et la maturité précoces des gousses (Berger *et al.*, 2006). Gentinetta *et al.*, (1986) ont remarqué la possibilité de criblage pour la tolérance au stress hydrique durant la phase de maturité physiologique des graines.

Le rendement en graines est proportionnel à la hauteur moyenne des plantes, au poids des gousses/m<sup>2</sup>, au poids relatif des graines et à l'indice de récolte. D'ailleurs il est en corrélations positives et hautement significatives avec ces paramètres agronomiques (Tableau 2).

Quoique la biomasse aérienne, le nombre de graines/m<sup>2</sup> et le poids de 100 graines soient en corrélations positives et hautement significatives avec le rendement en graines, ils contribuent négativement dans l'édification de ce dernier.

### Analyse séquentielle de piste

L'analyse séquentielle de piste, basée sur le rendement en graines du pois chiche comme variable dépendante et les covariables résultant de la régression linéaire multiple « pas à pas » (1) comme variables indépendantes (Ciftçi, *et al.*, 2004), a révélé que le model séquentiel de piste explique 99,7% de la variation du rendement en graines avec un Chi-deux (χ<sup>2</sup> = 41,50\*\*\*) très hautement significatif (Figure 1).

Le poids des gousses/m<sup>2</sup> a un effet direct positif très hautement significatif (p=1,42\*\*\*) sur le rendement en graines et explique

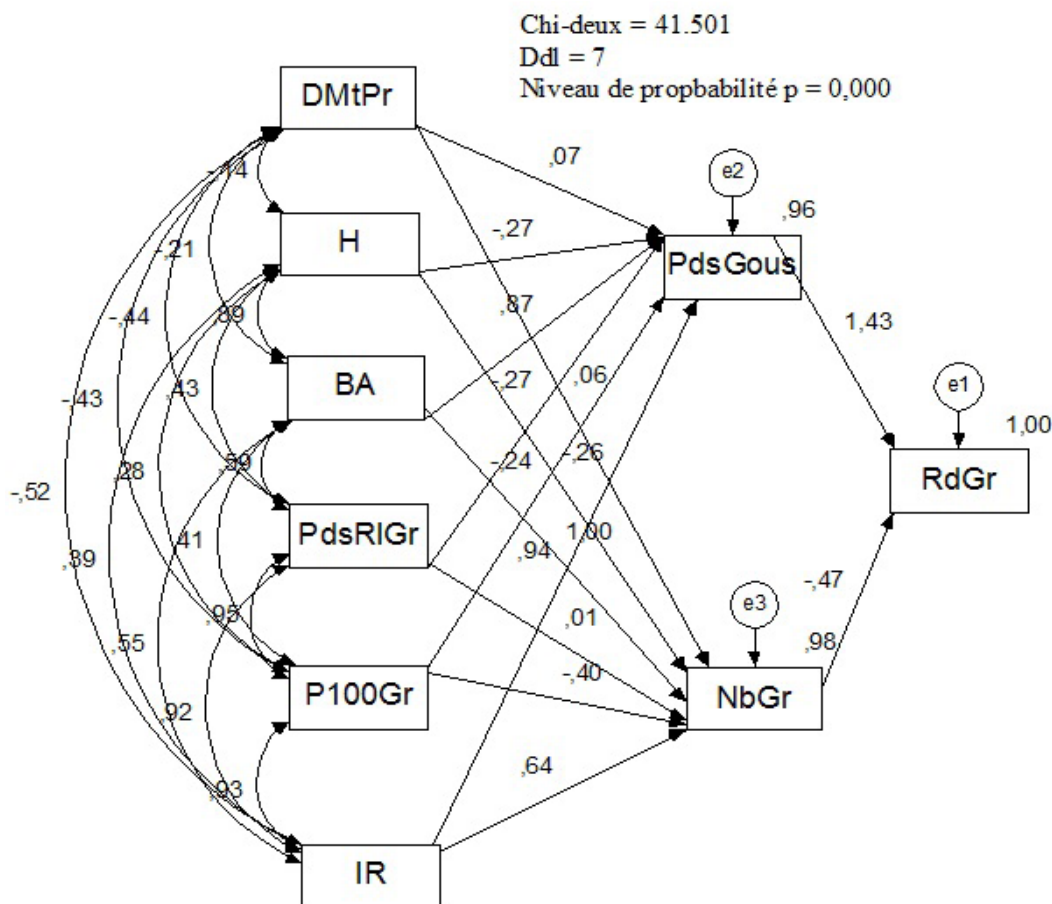


Figure 1 : Analyse séquentielle de piste illustrant les interrelations des différents paramètres qui contribuent à l'édification du rendement en graines du pois chiche (*Cicer arietinum* L.)

**Tableau 4. Effets directs et effets totaux standardisés des covariables issues de la régression linéaire multiple « pas à pas »**

	Effets directs sur RdGr	BA	IR	P100Gr	PdsRlGr	H	DMtPr
NbGr/m <sup>2</sup>	- 0,47***	1,00***	0,64***	- 0,40***	0,01ns	- 0,26***	0,06ns
PdsGous/m <sup>2</sup>	1,43***	,88***	0,94***	- 0,24ns	- 0,27ns	- 0,27***	0,07ns
Effets indirects sur RdGr		0,78	1,05	- 0,15	- 0,40	- 0,27	0,08

96% de sa variation. Par contre, le nombre de graines/m<sup>2</sup> a un effet direct négatif très hautement significatif ( $p = -0,47^{***}$ ) sur le même paramètre et explique 98% de sa variation (Tableau 4). La biomasse aérienne et l'indice de récolte ont des effets directs positifs et hautement significatifs, respectivement, sur le nombre de graines/m<sup>2</sup> ( $p = 1,00^{***}$ ) et ( $p = 0,64^{***}$ ) et sur le poids des gousses/m<sup>2</sup> ( $0,88^{***}$ ) et ( $0,94^{***}$ ).

En revanche, le poids de 100 graines et la hauteur moyenne des plantes ont les effets directs négatif et très hautement significatif respectifs ( $p = -0,40^{***}$ ) et ( $p = -0,26^{***}$ ) sur le nombre de graines/m<sup>2</sup>. La hauteur moyenne des plantes a un effet direct négatif et très hautement significatif sur le poids des gousses/m<sup>2</sup> ( $p = -0,27^{***}$ ). La date de maturité précoce et le poids relatif des graines ont des effets directs négligeables sur le nombre de graines/m<sup>2</sup> et le poids des gousses/m<sup>2</sup> (Tableau 4). L'indice de récolte et la biomasse aérienne ont les plus importants effets directs positifs totaux respectifs ( $p = 1,052$ ) et ( $p = 0,783$ ) sur le rendement en graines ; alors que le poids relatif des graines et la hauteur moyenne des plantes ont les effets indirects totaux négatifs respectifs de ( $p = -0,4$ ) et ( $p = -0,27$ ). La date de maturité précoce et le poids de 100 graines ont des effets indirects totaux négligeables respectivement de ( $p = 0,08$ ) et ( $p = -0,15$ ). Il en ressort que le rendement en graines du pois chiche est proportionnel au poids des gousses/m<sup>2</sup> et inversement proportionnel au nombre de graines/m<sup>2</sup>. Les génotypes de pois chiche caractérisés par une hauteur moyenne élevée paraissent produire plus de gousses vides/m<sup>2</sup>, des graines de petit calibre et de faibles rendements en graines. En revanche, les génotypes caractérisés par une biomasse importante ont tendance à accumuler plus de réserves favorables pour l'édification de graines de gros calibre, des gousses pleines et un rendement en graines élevé.

Le diagramme de l'analyse séquentielle de piste (Tableau 5) a montré que la date de maturité précoce est en corrélations négatives hautement significative avec l'indice de récolte ( $r = -0,52^{**}$ ), significative au seuil de 5% avec le poids relatif des graines ( $r = -0,44^*$ ) et le poids de 100 graines ( $r = -0,43^*$ ) et non significative avec la biomasse aérienne ( $r = -0,21ns$ ) et la hauteur moyenne des plantes ( $r = -0,14ns$ ). La maturité précoce, qui représente la tolérance aux stress abiotiques par échappement a tendance d'affecter négativement le calibre des graines, la qualité des gousses et par conséquent l'indice de récolte. Elle n'a pas d'action ni sur la biomasse aérienne ni sur la hauteur moyenne des plantes.

**Tableau 5. Corrélations binaires de Pearson entre les covariables résultant de la régression linéaire multiple « pas à pas »**

	DMtPr	H	BA	PdsRlGr	P100Gr	IR
DMtPr	1					
H	-0,14 ns	1				
BA	-0,21 ns	0,89**	1			
PdsRlGr	-0,44**	0,43**	0,59**	1		
P100Gr	-0,43**	0,28 ns	0,41**	0,95**	1	
IR	-0,52**	0,39*	0,55**	0,92**	0,93**	1

ns : La corrélation est non significative ; \* : La corrélation est significative au seuil de 5% ; \*\* : La corrélation est significative au seuil de 5% ;

L'indice de récolte est en corrélations positives, hautement significative avec le poids relatif des graines ( $r = 0,92^{***}$ ), le poids de 100 graines ( $r = 0,93^{***}$ ) et la biomasse aérienne ( $r = 0,55^{***}$ ) et significative au seuil de 5% avec la hauteur moyenne des plantes ( $r = 0,39^*$ ). Le poids relatif des graines est en corrélations positives et hautement significatives avec le poids de 100 graines ( $r = 0,95^{***}$ ) et la biomasse aérienne ( $r = 0,59^{***}$ ) et significative ( $P < 5\%$ ) avec la hauteur moyenne des plantes ( $r = 0,43^*$ ). Le poids de 100 graines est en corrélations positives significative ( $P < 5\%$ ) avec la biomasse aérienne ( $r = 0,41^*$ ) et non significative avec la hauteur moyenne des plantes ( $r = 0,28ns$ ). La biomasse aérienne est en corrélation positive et hautement significative avec la hauteur moyenne des plantes ( $r = 0,89^{***}$ ) (Tableau 5). Ces résultats stipulent que les génotypes de pois chiche caractérisés pas une biomasse aérienne vigoureuse ont, généralement, une hauteur moyenne élevée et paraissent caractérisés par une photosynthèse très active qui se traduit par une accumulation de réserves favorables pour la formation de gousses pleines et de graines de gros calibres. L'indice de récolte serait par conséquent élevé.

## CONCLUSION

L'étude de la matrice de corrélation binaire a permis de mettre en évidence les plus importantes corrélations du rendement en graines avec ses composantes. Il est en corrélations significatives positives avec les durées des phases de floraison et de maturité, le taux de nouaison, la longueur du système racinaire, la hauteur moyenne des plantes, le nombre de branches par plante, la biomasse aérienne, le nombre de gousses/m<sup>2</sup>, le nombre de graines/m<sup>2</sup>, le nombre de graines par gousse, le poids des gousses/m<sup>2</sup>, le poids relatif des graines, le poids de 100 graines, l'indice de récolte et la dose d'irrigation. Il est en corrélations négatives significatives avec les dates de floraison précoce et de floraison. Ses corrélations avec les dates de maturité précoce et de maturité sont non significatives.

L'analyse conventionnelle par le coefficient de piste a montré que le nombre de graines/m<sup>2</sup> a un effet direct négatif très hautement significatif sur le rendement en graines du pois chiche ; alors que le poids des gousses/m<sup>2</sup> a un effet direct positif très hautement significatif. La hauteur moyenne des plantes, le taux de nouaison, la longueur du système racinaire, le nombre de gousses/m<sup>2</sup>, le poids relatif des graines, l'indice de récolte, le nombre de graines par gousse, le poids de 100 graines, la dose d'irrigation, la biomasse aérienne et le nombre de graines/m<sup>2</sup> ont les plus importants effets totaux indirects positifs sur le rendement en graines ; alors que les dates de floraison précoce, de floraison et de maturité précoce ainsi que le poids des gousses/m<sup>2</sup> ont les plus importants effets totaux indirects négatifs. Vu le bon nombre de paramètres agronomiques introduits dans l'analyse des corrélations binaires et l'analyse conventionnelle par le coefficient de piste, la

délimitation des covariables qui édifient le rendement en graines paraît non aisée. Le recours à la modélisation avec la régression linéaire multiple « pas à pas » a révélé que les covariables qui composent le modèle le plus explicatif du rendement en graines sont, particulièrement, la date de maturité précoce, la hauteur moyenne des plantes, la biomasse aérienne, le nombre de graines/m<sup>2</sup>, le poids des gousses/m<sup>2</sup>, le poids relatif des graines, le poids de 100 graines et l'indice de récolte. Toutefois, l'élimination des covariables non significatives pourrait engendrer une perte d'informations sur le rendement en graines.

L'analyse séquentielle de piste basée sur les covariables issues de la régression linéaire multiple « pas à pas » a permis de confirmer, en partie, les résultats trouvés avec l'analyse conventionnelle par le coefficient de piste. En effet, le nombre de graines/m<sup>2</sup> et le poids des gousses/m<sup>2</sup> ont des effets directs très hautement significatifs sur le rendement en graines. La biomasse aérienne, l'indice de récolte et la date de maturité précoce ont des effets totaux positifs; alors que le poids relatif des graines, la hauteur moyenne des plantes et le poids de 100 graines ont des effets totaux négatifs sur ce dernier. Par conséquent, sous des conditions édapho-climatiques similaires, il serait utile d'adopter le nombre de graines/m<sup>2</sup>, le poids des gousses/m<sup>2</sup>, la biomasse aérienne et l'indice de récolte comme critères de sélection dans des programmes d'amélioration du rendement en graines du pois chiche du type « kabuli ».

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AAC (Agriculture et Agroalimentaire Canada) (2006). Pois chiche: Situation et perspectives. Le Bulletin bimensuel ; Volume 19; Numéro 13; 4 pages.
- Agrama, H.A.S. (1996). Sequential path analysis of grain yield and its components in maize. *Plant Breed.* 115:343–346.
- Ali, Y. et Tahir G.R. (1999). Correlation and regression studies in chickpea genotypes; *Pakistan Journal of Biological Sciences*; 2(2):318-319.
- arietinum* L.) genotypes in Tunisia. *Agricultura Mediterranea*; vol. 120, 74-78.
- Allen, G. L. Pereira, D. Raes et M. Smith (1998). Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirement FAO Irrigation and drainage; 56 pages.
- Arshad, M., A. Bakhsh et A. Ghafour (2004). Path coefficient analysis in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under rainfed conditions. *Pak. J. Bot.*, 36(1): 75-81
- Arshad, M.; N. Ali, et A. Ghafour (2006). Character correlation and path coefficient in soybean glycine max (L.) Merrill; *Pak. J. Bot.*, 38(1): 121-130,
- Asghari-Zakaria R., Fathi M., Hasan-Panah D. (2007). Sequential path analysis of yield components in potato. *Potato Res* 49, 273-279.
- Ben Mechlia, N. (1998): Manuel de Formation: Application des Données Climatiques à la Planification et à la Gestion Efficace de l'Irrigation. Projet INAT - CGRE. Mise au point d'un système d'irrigation. In: Séminaire FAO/ OMM/PNUÉ ; 193 pages.
- Berger, J.D., M. Ali, P.S. Basu, B.D. Chaudhary *et al.* (2006). Genotypes by environment studies demonstrate the critical role of phenology in adaptation of chickpea (*Cicer arietinum* L.) to high and low yielding environments of India; *Field Crops Research*; 98, 230–244.
- Bhatt, GM (1973). Significance of path coefficient analysis in determining the nature of character association; *Euphytica* 22: 338-343
- Bhattarai, S. P. (2005). The physiology of water use efficiency of crops subjected to subsurface drip irrigation, oxygenation and salinity in a heavy clay soil; School of Biological and Environmental Sciences; Faculty of Arts, Health and Sciences; Central Queensland University; Rockhampton, QLD 4702, Australia; 326 pages.
- Bousslama, M. ; A.Garoui, et M. Harrabi (1990.) Stability analysis of some chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes in Tunisia. *Agricultura Mediterranea*; vol. 120: 74-78.
- Casagrande, M. (2008). Evaluation précoce des performances du blé biologique (rendement et teneur en protéines): Une approche combinée de diagnostic agronomique, de modélisation à l'aide d'indicateurs de nuisibilité et d'études des pratiques dans les exploitations agricoles ; Thèse de Doctorat ; Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech); 223 pages.
- Ciftçi, V., N. Togay, Y. Togay et Y. Dogan (2004). Determining relationships among yield and some yield components using path coefficient analysis in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Asian Journal of plant sciences* 3 (5): 632-635.
- Dalkani, M.; R. Darvishzadeh et A. Hassani (2011). Correlation and sequential path analysis in Ajowan (*Carum copticum* L.); *Journal of Medicinal Plants Research*; Vol. 5 (2), pp. 211-216;
- Dewery, D.R. et K.H. Lu (1959). A correlation and path-coefficient analysis of components of crested wheatgrass seed production. *Agron. J.*, 9, 515-518.
- DGPA (Direction Générale de la Production Agricole) (2006). Rapport annuel de suivi des emblavures, Direction des grandes cultures, Direction générale de la production Agricole. Ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques.
- DGPA (Direction Générale de la Production Agricole) (2008). Rapport annuel de suivi des emblavures, Direction des grandes cultures, Direction générale de la production Agricole. Ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques.
- Dogan, R. (2009). The correlation and path coefficient analysis for yield and some yield components of durum wheat (*Triticum turgidum* var. durum L.) in west Anatolia conditions; *Pak. J. Bot.*, 41(3): 1081-1089.
- Doorenbos, J. et W.O. Pruitt (1977). Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24, (rev.) FAO, Rome, Italy; 144 pages.
- Gentinetta, E., D. Cepi, G. Leporic, M. Motto, et F. Salamini (1986). A major gene for delayed senescence in maize. Pattern of photosynthate accumulation and inheritance. *Plant Breeding* 97: 193–206.
- Golezani, G.; B. Dalil; A. D. Muhammadi-Nasabi et S. Zehtab-Salmasi, 2008. The Response of Chickpea Cultivars to Field Water Deficit. *Not. Bot. Hort. Agrobot. Cluj* 36 (1):25-28
- Hair J.F., R.E. Jr. Anderson, R.L. Tatham, W.C. Black (1995). Multivariate data analysis with readings. 4th ed., Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Khanna-Chopra, R. et S.K. Sinha (1987). Chickpea: physiological aspects of growth and yield. In: *The Chickpea*. 409 pages; CAB International; Eds. Saxena, M.C. et Singh, K.B., Wallingford, Oxon, UK; pp: 163-190,

- Kumar, L. et P.P. Arora (1991). Basic of selection in chickpea. Research reports. *Int. Chickpea. Newslett.*, 24:14-15.
- Kumar, J. et S. Abbo (2001). Genetics of flowering time in chickpea and its bearing on productivity in semiarid environments. *Agronomy*, 72: 107-138.
- Malhotra, R.S. et C. Johansen (1996). Germplasm Program Legumes, Annual Report for 1996, International Center Agricultural Research Dry Areas (ICARDA), Aleppo, Syria; 229 pages.
- Mekhlouf, A., H. Bouzerzour, A. Benmahammed, A. Hadj Sahraoui et N. Harkati (2006). Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride; *Sécheresse* 17 (4) : 507-13
- Mohammadi, S. A.; B. M. Prasanna, and N. N. Singh (2003). Sequential Path Model for Determining Interrelationships among Grain Yield and Related Characters in Maize; *Crop Sci.* 43:1690–1697.
- Nayyar, H., S. Singh, S. Kaur, S. Kumar, H. D. Upadhyaya (2006). Differential sensitivity of macrocarpa and microcarpa types of chickpea (*Cicer arietinum* L.) to water stress: association of contrasting stress response with oxidative injury. *J. Integrative Plante Biol.* 48, 1318-1329.
- Noor, F., M. Ashraf et A. Ghafoor (2003). Path analysis and relationship among quantitative traits in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Pakistan Journal of Biological Science* 6 (6): 551-555.
- Özveren Yücel D., A. E. Anlarsal et C. Yücel (2006). Genetic Variability, Correlation and Path Analysis of Yield, and Yield Components in Chickpea (*Cicer arietinum* L.); *Turk J Agric For* 30:183-188
- Pandya, B. et R.K. Pandey (1980). Chickpea improvement at Pantnagar. In: Proceeding International workshop on chickpea improvement. 28 February - 2 march 1979. Hyderabad; India ICARISAT. Patancheru.; 197- 207.
- Pathirana, R. (1993). Yield component analysis of bunch groundnut (*Arachis hypogaea* L. spp. *fastigiata*) Germplasm in Sri Lanka. *Trop Agric (Trinidad)* 70: 256-259.
- Perez de la Vega, M. (1996). Plant genetic adapted ness to climatic and edaphic environment. *Euphytica*, n° 12, 92:27-38.
- Prost L. (2008). Modéliser en agronomie et concevoir des outils en interaction avec de futurs utilisateurs: Le cas de la modélisation des interactions génotype environnement et de l'outil DIAGVAR; Thèse de Doctorat; Spécialité: Agronomie; l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro. Paris Tech.): 348 pages.
- Roberts, E.H., R.J. Summerfield, F.R. Minchin, et P. Haley (1980), Penology of chickpea (*Cicer arietinum* L.) In: Contrasting aerial environments. *Experimental Agriculture*; 16: 343-360,
- Sabaghnia, N.; H. Dehghani, B. Alizadeh et M. Mohghaddam (2010). Interrelationships between seed yield and 20 related traits of 49 canola (*Brassica napus* L.) genotypes in non-stressed and water-stressed environments; *Spanish Journal of Agricultural Research*; 8(2), 356-370.
- Sadek, S.E.; A. Ahmed et H.M. Abd El-Ghaney (2006). Correlation and path coefficient analysis in five parents inbred lines and their six white maize (*Zea mays* L.) single crosses developed and grown in Egypt; *Journal of Applied Sciences Research* 2(3): 159-167.
- Saleem, M.; S. Ali, M. Yousuf, et W.A.A. Haris (1999). Path coefficient analysis of seed yield and quantitative traits in chickpea (*Cicer arietinum* L.); *International Journal of Agriculture & Biology*; 01-3-106-107.
- Samonte, S.O.P.B., L.T. Wilson, et A.M. McClung. (1998). Path analyses of yield and yield-related traits of fifteen diverse rice genotypes. *Crop Sci.* 38:1130–1136.
- Singh, K.B., R.S. Malhotra, M.H. Halila, E.J. Knights et M.M. Verma (1994). Current status and future strategy in breeding chickpea for resistance to biotic and abiotic stresses. *Euphytica* 73, 137-149.
- Slama, F. (1998). Cultures industrielles et légumineuses à graines. (Ed. Centre de diffusion Universitaire Tunisie, en Arabe) ; 300 pages.
- Snedecor, G.W. and W.G. Cochran (1982). "Statistical Methods" 7th Ed. Oxford and I.B.H. Publishing. Iowa State Univ. Press, Iowa, USA.
- Soltner, D. (1981). Les bases de la production végétales : Le sol - Le climat-La plante; *Phytotechnie Générale*; Tome I: Le sol ; 10ème Eds; 456p.
- Surek, H et N. Beser (2003). Correlation and path coefficient analysis for some yield-related traits in rice (*Oryza sativa* L.) under Thrace conditions; *Turk J Agric For.* 27: 77-83
- Talebi R., Fayaz F. et Jelodar, N.A.B. (2007). Correlation and path coefficient analysis of yield and yield components of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under dry land condition in the West of Iran; *Asian Journal of plant sciences* 6(7):1151-1154.
- Tomar, G.S., Y Mishra et S.K. Rao (1982). Path analysis and implications in selection of high yielding chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Indian J. Plante Physiol.*, 25:127-132.
- USDA, (1951). Soil Survey Manual. U.S. Department of Agriculture, Edition Washington D.C.; 503 pages.
- Valantin-Morison, M. et J.M. Meynard, (2008). Diagnosis of limiting factors of organic oilseed rape yield. A survey of farmers' fields. *Agronomy for Sustainable Development*: (DOI: 10.1051/agro: 2008026).
- Wery, J. (1990), Adaptation to frost and drought stress in chickpea and implications in plant breeding. In: Saxena M.C; Cubero J.I. et Wery (Eds), Present status and future prospects of chickpea crop production and improvement in the Mediterranean countries, Options Méditerranéennes - Série Séminaires - n° 9 - CIHEAM, Paris. 77-85.
- Wright, S., (1934). The methods of path coefficients. *Ann. Math. State*, 5:161-215.