



Projet de Fin d'Études

Présenté en vue d'obtention du diplôme de

MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES

GESTION ET CONSERVATION DE LA BIODIVERSITE

Modélisation des caractéristiques de différents génotypes de *Vicia faba* L. en relation avec le rendement à l'aide des modèles de régression et du Path Analysis

Présenté par

EL AHRACH Mohamed

Encadré par

Pr. FATEMI Zain El Abidine (INRA MEKNES)

Pr. DERRAZ Khalid (FST FES)

Soutenu le : 12/07/2021 Devant le jury composé de :

Pr. FATEMI Zain El Abidine	(INRA MEKNES)
Pr. DERRAZ Khalid	(FST FES)
Pr. AMRANI JOUTEI Khalid	(FST FES)
Pr. MIKOU Karima	(FST FES)
Mme. CHETTO Oumaima	(INRA MEKNES)

Résumé

La fève (*Vicia faba* L.) est la principale légumineuse alimentaire au Maroc. Elle constitue une légumineuse riche en protéines cultivée et consommée comme aliment pour l'homme et les animaux. De plus, sa culture joue un rôle important dans l'amélioration de la productivité du sol en fixant l'azote atmosphérique. L'amélioration du rendement de *Vicia faba* L. par l'étude des différentes caractéristiques du rendement et ses composantes à travers, notamment, la modélisation statistique s'avère une voie prometteuse dans le programme de sélection des variétés de fève et de féverole à haut potentiel de rendement, stables et tolérantes aux principaux stress biotiques et abiotiques. Dans ce contexte, notre étude est menée sur 40 lignées de *Vicia faba* L. au niveau du Domaine expérimental de Douyet (Institut National de la Recherche Agronomique « INRA », Laboratoire d'Amélioration de la fève et la féverole). Elle a, comme objectif principal, la modélisation du rendement de la fève en relation avec ses composantes. Ces paramètres sont la hauteur, le nombre de tiges secondaires, le nombre de nœuds fructifères par tige principale et par tiges secondaires, le nombre de gousses par tige principale et par tiges secondaires, et le nombre de graines par tige principale et par tiges secondaires. Pour se faire, nous avons eu recours à la modélisation à l'aide des modèles de la régression linéaire multiple suivi par l'analyse de cheminement ou Path Analysis. Nos résultats indiquent que la lignée 6 de l'essai élite 1 et la lignée 10 de l'essai élite 2 ont réalisé les meilleures performances pour la plupart des caractères mesurés dans notre étude. Ainsi, le nombre de graines par tige principale et par tiges secondaires ont une influence directe et décisive sur le rendement par plante expliquant 72 % de la variabilité totale. Par ailleurs, l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez *Vicia faba* L. a permis également de mettre en évidence l'effet indirect non négligeable de la hauteur de la tige principale et le nombre de tiges secondaires sur le rendement par le biais des médiateurs : nombre de gousses par tige principale, nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires et surtout le nombre de gousses par tiges secondaires.

Mots clés : *Vicia faba* L., Fève, Féverole, Rendement, Composantes du rendement, Régression linéaire multiple, Path analysis, Médiation. (INRA, Meknès).

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail, à mes chers parents,

Mr. EL AHRACH Mohammed Saïd et Mme. BENMAKHLOUF ANDALOUSSI Naoual, qui n'ont

cessé de m'orienter vers le courage et la foi en dieu. Pour leur amour, patience, soutien et tout.

Je leur présente mon travail, puisse dieu le tout puissant leur prêter la bonne santé et le bonheur.

A ma grande mère, mon oncle, mon cher frère, qui m'ont tant aidées surtout moralement.

A mes respectueux enseignants, pour leurs efforts, leurs disponibilités.

A moi.

Remerciements

Même si parfois les mots semblent fades à côté de la profondeur des sentiments, il faut pourtant les concrétiser en remerciements, pour honorer tous ceux qui m'ont aidé à franchir ce pas vers l'avenir.

Je tiens à remercier Monsieur **FATEMI Zain El Abidine** pour son encadrement tout au long du stage, pour ses conseils judicieux, son savoir, ses commentaires, ses remarques et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce projet de master. Ainsi que pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Je tiens aussi à remercier Pr. **DERRAZ Khalid** professeur de la biologie à la Faculté des Sciences et des Techniques de Fès, pour son encadrement, sa gentillesse et sa patience.

Je voudrais aussi bien exprimer mes sincères remerciements aux professeurs, **AMRANI JOUTEI Khalid** et **MIKOU Karima** qui m'ont honoré en acceptant de juger ce travail et de l'enrichir par ses critiques constructives.

Mes remerciements vont aussi aux enseignants de la filière de la formation Gestion et Conservation de la Biodiversité, pour leur contribution à ma formation.

Finalement, je remercie tous ceux ou celles qui ont agi dans l'ombre et participé discrètement à l'accomplissement de ce rapport.

À vous tous, un grand merci

Sommaire :

INTRODUCTION	1
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	
A - LEGUMINEUSES	3
1. Présentation générale des légumineuses	3
2. Classification	3
3. Importance des légumineuses	4
4. Principales caractéristiques des légumineuses	5
I. FEVE : <i>Vicia faba</i> L.	6
1. Position systématique	6
2. Origine géographique	7
3. Description de la plante	7
4. Intérêts de la culture des fèves (<i>Vicia faba</i> L.)	7
1. Intérêt alimentaire	7
2. Intérêt agronomique	8
3. Intérêt éco-toxicologique	8
5. Répartition de la culture des légumineuses et de la fève au Maroc	8
6. Rendement de la fève.....	9
7. Composantes de rendement chez la fève	9
1. Rendement de la fève	9
2. Objectif de l'amélioration du rendement.....	9
3. Principales composantes du rendement	10
B- MODÉLISATION STATISTIQUE DU RENDEMENT ET SES COMPOSANTES	11
I. Régression linéaire multiple	11
1. Application du modèle de régression linéaire multiple	12
2. Avantages et inconvénients	13
II. Analyse de corrélation	13
1. Définition	13
2. Avantages et inconvénients	14
3. Application du modèle de corrélation.....	14
III. Analyse du cheminement ou Path analysis	15
1. Définition	15
2. Avantages	15
3. Application du modèle Path analysis	15

MATÉRIEL ET MÉTHODES

I.	Objectif	17
II.	Site expérimental	17
III.	Régime pluviométrique du domaine expérimental de douyet pour la saison 2020- 2021	17
IV.	Matériel végétal.....	18
V.	Protocole expérimental.....	18
	1. Itinéraire technique.....	18
	2. Dispositif expérimental	18
	3. Données expérimentales.....	19
	4. Traitement des données	19

RÉSULTATS ET DISCUSSION

I.	Variation des données végétatifs	20
----	--	----

EYT1

1.	Hauteur de la plante.....	20
2.	Nombre de tiges secondaires	21
3.	Nombre de nœuds fructifères par tige principale	22
4.	Nombre de gousses par tige principale.....	22
5.	Nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires	23
6.	Nombre de gousses par tiges secondaires.....	23
7.	Nombre de graines par tige principale.....	24
8.	Poids total de graines par tige principale.....	24
9.	Nombre de graines par tiges secondaires	25
10.	Poids total de graines par tiges secondaires	25
11.	Rendement par plante.....	26
	Corrélations partielles entre les composantes du rendement	27

EYT2

1.	Hauteur de la plante.....	28
2.	Nombre de tiges secondaires	29
3.	Nombre de nœuds fructifères par tige principale	29
4.	Nombre de gousses par tige principale.....	30
5.	Nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires	30
6.	Nombre de gousses par tiges secondaires.....	31
7.	Nombre de graines par tige principale.....	31
8.	Poids total de graines par tige principale.....	32
9.	Nombre de graines par tiges secondaires	32
10.	Poids total de graines par tiges secondaires	33
11.	Rendement par plante.....	33
	Corrélations partielles entre les composantes du rendement	34

II.	REGRESSION LINEAIRE ENTRE LES COMPOSANTES DE RENDEMENT	34
	Vérification des hypothèses du modèle de régression retenu.....	37

III. PATH ANALYSIS	38
1. Modèle postule	38
1.1. Test de validité de modèle	39
1.2. Flux de causalité entre les différentes variables.....	39
1.2.1. Effet direct très hautement significatif.....	40
1.2.2. Effet direct hautement significatif	40
1.2.3. Effet direct non significatif	40
2. Analyse et interprétation de la médiation	41
1. Médiation 1	41
2. Médiation 2	42
3. Modèle final de la médiation Path analysis du rendement	42
CONCLUSION	45
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	

Liste des figures :

Figure 1 : Répartition de la SAU selon le type d'utilisation pour l'année 2017 (MAPMDREF/DSS)	5
Figure 2 : Modèle final de la médiation Path analysis du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba</i> L. (Equipe INRA, 2020).....	16
Figure 3 : Evolution des précipitations au niveau du domaine expérimental du Douyet. (Campagne agricole 2020/2021)	17
Figure 4 : Variation de la hauteur en fonction des lignées.....	20
Figure 5 : Variation de nombre de tiges secondaires en fonction des lignées	21
Figure 6 : Variation du nombre de nœuds fructifères par tige principale	22
Figure 7 : Variation du nombre de gousses par tige principale en fonction des lignées.....	22
Figure 8 : Variation du nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires	23
Figure 9 : Variation du nombre de gousses par tiges secondaires en fonction des lignées.....	23
Figure 10 : Variation du nombre de graines par tige principale en fonction des lignées.....	24
Figure 11 : Variation du poids total des graines au niveau de la tige principale	24
Figure 12 : Variation du nombre de graines par tiges secondaires en fonction des lignées.....	25
Figure 13 : Variation du poids total des graines au niveau de la tiges secondaires en fonction des lignées.	25
Figure 14 : Rendement par plante en fonction des lignées	26
Figure 15 : Variation de la hauteur en fonction des lignées.....	28
Figure 16 : Variation de nombre de tiges secondaires en fonction des lignées	29
Figure 17 : Variation du nombre de nœuds fructifères par tige principale	29
Figure 18 : Variation du nombre de gousses par tige principale en fonction des lignées.....	30
Figure 19 : Variation du nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires.....	30
Figure 20 : Variation du nombre de gousses par tiges secondaires en fonction des lignées.....	31
Figure 21 : Variation du nombre de graines par tige principale en fonction des lignées	31
Figure 22 : Variation du poids total des graines au niveau de la tige principale	32
Figure 23 : Variation du nombre de graines par tiges secondaires en fonction des lignées	32
Figure 24 : Variation du poids total des graines au niveau de la tiges secondaires en fonction des lignées.	33
Figure 25 : Rendement par plante en fonction des lignées	33
Figure 26 : Diagrammes de distribution des différents paramètres relativement au rendement.....	34
Figure 27 : Diagramme de dispersion des résiduelles standardisées en fonction du rendement prédit standardisé.....	37
Figure 28 : Distribution de fréquence des valeurs résiduelles standardisées	37
Figure 29 : Modèle initial postulé pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes, chez <i>Vicia faba</i> L.....	38

Figure 30 : Modèle postulé pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba</i> L.	39
Figure 31 : Analyse du cheminement du nombre de graines TP sur le Rendement par plante via le médiateur nombre de graines TS.	41
Figure 32 : Analyse du cheminement du nombre de nœuds fructifères TS sur le nombre de graines TS via le médiateur nombre de gousses TS.....	42
Figure 33 : Modèle final du Path analysis du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba</i> L.	43

Liste des tableaux :

Tableau1 : Production et superficie des légumineuses alimentaires pendant la campagne 2018-2019.....	5
Tableau2 : Itinéraire technique (INRA, 2021).....	18
Tableau3 : Analyse de la variance des composantes de rendement	20
Tableau4 : Corrélation partielle entre les composantes du rendement	27
Tableau5 : Analyse de la variance des composantes de rendement	28
Tableau6 : Corrélation partielle entre les composantes du rendement.	34
Tableau7 : Résultat de la régression linéaire multiple du modèle de départ	35
Tableau8 : Résultat de la régression linéaire multiple du modèle final	35
Tableau9 : Effets directs ou indirects et type de médiation du Path analysis pour le rendement de la fève et ses composantes	42

Liste des acronymes :

CFI : Comparative Fit Index

EYT : Elite Yield Trial

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

MADRPM : Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Pêches Maritimes

PIB : Produit Intérieur Brut

SAU : Surface Agricole Utile

Liste des abréviations :

Fruc : Fructifère

Gr / Grn : Graine

Gs : Gousse

Nb / Nbr : Nombre

Nds : Nœuds

Pte : Plante

Rdt : Rendement

Sig : Signification

TP : Tige Principale

TS : Tiges secondaires

Le secteur agricole constitue un pilier de l'économie marocaine. Il contribue de près de 14 % dans le PIB national. En effet, l'agriculture joue un rôle socio-économique, car elle est réellement au centre des préoccupations du développement durable et de la sécurité alimentaire. Avec une production plus ou moins diversifiée, les céréales figurent en tête de liste, représentant la grande partie de la production agricole, suivis des légumineuses alimentaires. D'une part, les légumineuses alimentaires occupent la seconde place dans l'assolement soit 6 à 8 % de la SAU au Maroc. Elles sont cultivées sur une superficie moyenne de 17 698 ha, une production de 18 308 tonnes et un rendement de 13 418 kg/ha (FAOSTAT, 2021). D'autre part, la culture des légumineuses alimentaires joue un rôle primordial sur le plan agronomique et nutritionnel. En effet, ces cultures contribuent à l'amélioration de la structure du sol et son enrichissement en azote à travers leurs propriétés biologiques permettant la fixation symbiotique d'azote atmosphérique, aussi bien à l'amélioration de la qualité de la ration alimentaire humaine et animale vu leur richesse en protéines.

Principale légumineuse alimentaire au Maroc, la fève occupe 43 % de la superficie emblavée en légumineuses alimentaires. Elle est suivie du pois chiche (19 %), de la lentille (14 %) et du pois (9 %) (MADRPM, 2002). Grâce à ses multiples rôles sur le plan agrobiologique et socio-économique, la fève reste une composante essentielle dans les systèmes de production agricoles marocains. En plus de ces intérêts agroéconomiques, la fève constitue l'une des principales sources de protéines pour la consommation humaine et animale. Sa richesse en protéine est de l'ordre de 25 à 35 % (Bond et *al.*, 1980). Cependant, malgré ces différents avantages, cette culture ne suscite pas l'intérêt qu'elle mérite. La production de la fève a enregistré une baisse très significative ces dernières années tant au niveau des superficies emblavées qu'au niveau du rendement moyen. Cette régression est imputée à plusieurs contraintes d'ordre biotique (insectes ravageurs, maladies et adventices), abiotique (sécheresse, gelée, salinité), technique (non-maîtrise de la conduite technique) et socio-économique. En absence de variétés sélectionnées, le matériel végétal utilisé est peu performant (95 % des semences sont des populations locales non améliorées). Depuis son indépendance, notre pays a déployé de nombreux efforts pour développer le secteur des légumineuses alimentaires, en particulier la culture de la fève par de nombreuses opérations, des programmes, des mesures d'incitation, de l'encadrement et du soutien.

L'amélioration des rendements est l'un des principaux objectifs de la plupart des programmes d'amélioration des cultures en matière de sélection (Ghobary et Abdallah, 2010). Le rendement en fève, semblable aux autres cultures, est un trait complexe et constitue la résultante d'un grand nombre de traits morphologiques et physiologiques. Cependant, la sélection basée sur le rendement seul est moins efficace en raison de sa complexité et de sa dépendance à l'égard de nombreuses composantes du rendement (Sindhu et *al.*, 1985). D'où une compréhension profonde de la relation entre le rendement des semences et ses composantes s'avère une étape cruciale pour le processus de sélection du programme d'amélioration (Biabani et Pakniyat, 2008). Dans un avenir prévisible, la méthodologie de la sélection végétale continuera à se développer en tant qu'application pratique de la mise à l'échelle de la biologie quantitative. La modélisation des rendements et ses composantes à travers, notamment, les modèles statistiques peut être utilisée dans les applications de sélection pour explorer le paysage des performances en matière de rendement et tester les effets directs ou indirects de traits complexes sur le rendement des légumineuses alimentaires à grand échelle dans un contexte de production.

Notre stage, effectué au sein du Domaine expérimental de Douyet (Institut National de la Recherche Agronomique « INRA », Laboratoire d'Amélioration de la fève et la féverole), a pour objectif de modéliser le rendement en relation avec ses paramètres par le biais des modèles de la régression linéaire multiple et l'analyse du cheminement (Path analysis) chez *Vicia faba* L. Le présent document comporte deux grandes parties :

- Une première partie bibliographique, rassemblant les diverses données générales collectées sur les légumineuses et sur l'espèce *Vicia faba* L.
- Une seconde partie, récapitulative des différents modèles statistiques du rendement d'une part, et une application de la régression linéaire multiple et l'analyse du cheminement (Path analysis) sur le rendement et ses composantes, chez *Vicia faba* L. d'autre part.

A. LEGUMINEUSES

1. PRESENTATION GENERALE DES LEGUMINEUSES

C'est une des plus importantes familles parmi les dicotylédones. Elle fournit le plus grand nombre d'espèces utiles à l'homme, qu'elles soient alimentaires, industrielles ou médicinales. Elles comprennent des plantes herbacées, des arbres et des arbustes, à feuilles habituellement composées, rarement simples. Beaucoup sont grimpantes et possèdent des feuilles ou des parties de feuilles modifiées en vrilles. Les fleurs, pentamères avec 10 étamines ou parfois plus, caractéristiques, ressemblent souvent à des papillons (Wathman, 1967).

Les légumineuses à graines étaient parmi les premières espèces domestiquées dans le croissant fertile dont on retrouve encore certains restes archéologiques vieux d'environ 12 000 ans pour les plus anciens. Les écrits issus de la Rome antique rapportent de nombreux témoignages de l'utilisation des légumineuses à graines dans les rations alimentaires, qu'il s'agisse des fèves, de la lentille ou du pois (Duc *et al.*, 2010).

Leur importance alimentaire est due au fait qu'elles contiennent beaucoup de protéines (deux à trois fois plus que la plupart des céréales) et de calories. De plus, elles contiennent une grande quantité de minéraux essentiels comme le calcium et le fer (FAO, 2021).

Les plantes de la famille des fabacées (légumineuses) suivent en importance celles de la famille des Poacées, non seulement pour leur contribution à l'alimentation humaine, mais aussi pour leur impact sur l'amélioration des pratiques agricoles dans toutes les régions du monde. En plus, elles sont des plantes annuelles dont les gousses produisent une à douze graines de formes et de couleurs variables. Elles sont utilisées à la fois en alimentation humaine et en alimentation animale.

Le groupe des légumineuses à graines comporte un nombre assez important d'espèces. Citons notamment : la fève et la féverole ; le pois ; le haricot ; la lentille et le soja.

Chacune de ces espèces fait l'objet de mode de culture et d'utilisation assez varié : soit une culture légumière de plein champ ou maraîchère ou encore une utilisation en sec à maturité totale des fruits et des graines ou bien utilisation en vert au début de la formation des fruits et des graines, et à l'alimentation humaine, directement ou après transformation et enfin à l'alimentation animale, directement ou après ensilage (Moule, 1972).

2. CLASSIFICATION

La famille des Légumineuses (= Fabacées terme utilisé dans les systèmes de classification avant 1960). Cette famille possède 674 genres et plus de 18 000 espèces, la plaçant en seconde position derrière les Poacées, en termes de diversité (Polhill *et al.*, 1981). Sur la base de leurs caractéristiques florales, les botanistes s'entendent à regrouper cette famille en trois sous-familles (Gepts *et al.*, 2005).

- **Sous-famille des *Mimosoideae***, comprend environ 2 500 espèces regroupées dans quelques 40 genres. Les espèces sont représentées principalement par des arbres et des arbustes distribués dans les régions tropicales et subtropicales sur tous les continents.

- **Sous famille des *Caesalpinioideae***, considérée comme la plus primitive, regroupe environ 4 200 espèces dans 135 genres et sont représentées par des arbres, arbustes et herbacées vivaces distribuées des régions tropicales aux régions tempérées.
- **Sous-famille *Papilionoideae***, d'une évolution plus récente, est la plus importante du point de vue alimentaire. Elle comprend quelques 9 500 regroupées dans environ 375 genres qui sont représentés majoritairement par des espèces herbacées vivaces et annuelles.

3. IMPORTANCE DES LEGUMINEUSES

Les légumineuses alimentaires constituent une composante importante dans les systèmes de production. Elles sont, à la fois, intégrées dans les systèmes de productions comme fertilisant naturel, dans les habitudes alimentaires pour leur apport protéique, et aussi, dans les exportations (Schneider et Hayghe, 2015).

Dans les années 70, la production de légumineuses alimentaires a fortement augmenté avec 4 millions de quintaux supplémentaires entre 1969 et 1973 (Marina, 1992) et une superficie atteignant 600 000 ha. Le Maroc faisait partie des principaux exportateurs mondiaux. Dans les années 80, ses cultures occupaient la seconde place dans les assolements après les céréales. Dans les années 90, la superficie de la culture des légumineuses alimentaires était entre 400.000 et 500 000 ha (MADRPM, 2012). En 2019, cette superficie est de 310 281 ha. Cette superficie connaît des fluctuations parfois très marquées avec une tendance générale vers la baisse. Les agriculteurs se tournent alors vers des cultures plus rentables : plantes oléagineuses, arboriculture, ..., etc (FAOSTAT, 2019).

Le Maroc est devenu, de ce fait, importateur systématique. Pour la période 2000-2010, la moyenne annuelle a été de 417 988 ha par an. En 2017, les légumineuses alimentaires représentaient un pourcentage plus faible de 3 % des 8,7 millions d'hectares de la SAU nationale, au même niveau que les maraichages, moins que les cultures fourragères (5 %) et bien loin derrière les céréales (avec 59 % de la SAU), les jachères (12 %) et les plantations fruitières (16 %) (Figure 1). Ce recul de la superficie des légumineuses alimentaires est dû non seulement au climat (effets du changement climatique, sécheresses périodiques) mais aussi et surtout à la non-maitrise de la conduite technique des différentes cultures et à l'insuffisance d'une protection phytosanitaire rigoureuse. Les dernières statistiques de la production en tonnes et la superficie en ha des principales légumineuses alimentaires durant l'année 2018-2019 au Maroc, à savoir la fève, la lentille, l'orobe, le pois chiche et le petit pois, sont résumées dans le tableau 1.

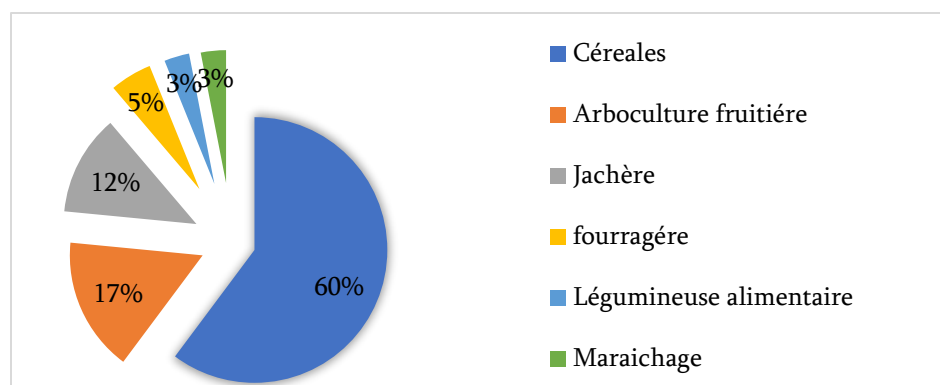


Figure 1 : Répartition de la SAU selon le type d'utilisation pour l'année 2017 (MAPMDREF/DSS).

Tableau 1 : Production et superficie des légumineuses alimentaires pendant la campagne 2018-2019

(Source : <http://statagri.agriculture.gov.ma:9090/statistic/secure/home.xhtml>)

	Fève		Lentille		Pois chiche		Petit pois	
	Bour	Irrigué	Bour	Irrigué	Bour	Irrigué	Bour	Irrigué
Production (T)	63 704.6	9 034.3	37 005.81	88.9	72 638.5	2 774.9	16 716	1 384
Superficie (ha)	118 251	7 609	40 117	90	80 168	1 814	38 857	2 177

4. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES LEGUMINEUSES

Les légumineuses alimentaires sont considérées comme les plantes à graines les plus cultivées par l'Homme et depuis longtemps occupent une place importante, dans l'alimentation humaine. Elles jouent un rôle important dans le développement des économies, des pays du monde entier (Khaldi et *al.*, 2002). Vu leurs adaptations faciles aux différents milieux, nous pouvons les rencontrer dans la plupart des régions du monde.

L'importance de la famille des légumineuses réside dans leur aptitude à fixer l'azote grâce à une symbiose avec des microorganismes du sol qui sont des bactéries de la famille des rhizobiacées (Wathman, 1967). Par ces nodules, la plante hôte (la légumineuse) offre un micro habitat exceptionnellement favorable à la bactérie tout en lui procurant des substrats carbonés provenant de la photosynthèse, (Lezrek, 2008). Ainsi, ces plantes sont capables de s'adapter à des sols très pauvres, et très dégradés. (Wathman, 1967).

Outre ces bénéfices qu'elles entraînent pour l'alimentation et l'environnement, les légumineuses peuvent être utiles dans diverses industries pharmaceutiques, alimentaires et chimiques (plastique biodégradable, huile, bio-carburant, colorants, gomme, textile, papier...) (Graham et Vance, 2003).

I. FEVE : *Vicia faba* L.

La fève, à l'image des autres légumineuses alimentaires (pois chiche, lentille...) est une plante très riche en protéines et constitue un aliment nutritif très important. Cette culture est très ancienne et largement pratiquée et à travers le monde couvrant environ 2,3 millions d'Ha.

La fève est une espèce d'automne qui peut être cultivée comme légume vert ou à l'état sec. Elle est sensible au manque d'eau et à son excès, et exige une alimentation hydrique régulière supérieure à 350 mm/an (Alaoui, 2009).

La culture de la fève est peu exigeante en termes de qualité de sol, cependant, elle aime les sols frais, profonds, peu acides, et non compactés. Elle est rustique au froid. (Alaoui, 2009).

La fève (*Vicia faba* L.), en tant que légumineuse, a une importance capitale dans les systèmes de production en agriculture pluviale au Maroc. Elle est très appréciée en tant que bon précédent cultural pour la céréaliculture, notamment, via les restes d'azote laissés (Rochester et al., 2001 ; Diaz- Ambrona et Minguez, 2001 ; Eltun et al., 2000 ; Schultz et al., 1999) ou à travers l'amélioration de la structure du sol (Rochester et al., 2001). Assez riches en protéine (22-36%) (Bond et al., 1985), les graines de fève permettent un apport protéique assez important pour les humains et les animaux.

1. POSITION SYSTEMATIQUE

Décrite par Linné en 1753, la fève *Vicia faba* L. est une plante dicotylédone herbacée originaire d'Asie ou du Moyen-Orient. Et d'après Dajoz (2000), la fève est classée comme suit :

Embranchement	:	SPERMATOPHYTES
Sous-embranchement	:	ANGIOSPERMES
Classe	:	Dicotylédones
Série	:	Caliciflores
Ordre	:	Rosales
Famille	:	Fabacées (Légumineuses)
Sous famille	:	Papilionacées
Genre	:	<i>Vicia</i>
Espèce	:	<i>Vicia faba</i> L.

Les fèves et féveroles sont des légumineuses (*Leguminosae*) appartenant au genre *Vicia faba* à $2n = 12$ chromosomes. Cette espèce présente une assez grande variabilité morphologique (poids, forme, coloration du grain, hauteur des plantes) (Moule, 1972). Selon la taille et la forme de la graine, et celles de la gousse, on distingue trois sous espèces :

- ***Vicia faba major*** : les grains sont de grosses tailles larges et plates, les gousses sont très longues (nombre d'ovules de 8 à 13) aplaties et souvent recourbées en sabre. La fève est destinée à la consommation humaine.

- ***Vicia faba minor*** : Avec des grains ovoïdes, réguliers et lisses et des gousses cylindriques et courtes (nombre d'ovules de 2 à 3). La féverole est utilisée pour principalement l'alimentation du bétail.
- ***Vicia faba equina*** : les gousses de la févette sont plus aplaties et longues avec un nombre d'ovules de 3 à 4. La taille des grains est moyenne.

2. ORIGINE GEOGRAPHIQUE

L'espèce *Vicia faba* serait originaire du *sud-ouest de l'Asie* (sud de la mer Caspienne), du moins pour les féveroles. Les fèves auraient une origine africaine.

L'homme aurait très tôt utilisé *V. faba* pour sa nourriture : l'espèce était déjà largement répandue au néolithique en Espagne, Italie, Hongrie et France (Moule, 1972).

3. DESCRIPTION DE LA PLANTE

La fève est une plante herbacée annuelle présentant une tige simple, dressée, creuse et de section quadrangulaire, pouvant se dresser à plus d'un mètre de hauteur.

Les feuilles, alternes de couleur vert ou grisâtre, pennées, composées, constituées par plusieurs folioles larges et ovales (Chaux et Floury, 1994).

La fève possède des inflorescences en grappes de 4 à 5 fleurs en moyenne. Les fleurs sont de couleur blanche ou faiblement violacée (Chaux et Floury, 1994).

Les fruits sont des gousses pendantes noircissant à la maturité. (Laumonier, 1979). Les graines sont charnues, vertes et tendres à l'état immature. À complète maturité, elles développent un tégument épais et coriace de couleur brun-rouge, à blanc verdâtre et prend une forme aplatie à couleur presque circulaire (Chaux et Floury, 1994).

4. INTERETS DE LA CULTURE DES FEVES (*Vicia faba* L.)

1. Intérêt alimentaire

La production de la fève est utilisée pour la consommation humaine, la consommation animale et l'exportation. La quantité de fève consommée est d'environ 2,4 kg par personne et par an. Elle dépasse le niveau de consommation des autres légumineuses alimentaires (Fatemi, 1996).

Selon Gordon, (2004) et Daoui, (2007), cette légumineuse a une teneur en protéine élevée et est une excellente source de fibres solubles et insolubles, de glucides complexes, de vitamines (B9 et C) et de minéraux (en particulier le potassium, le phosphore, le calcium, le magnésium, le cuivre, le fer et le zinc).

- **Riche en protéines végétales** (8g/150g), et **en fibres** (10g/150g), la fève participe à une alimentation saine et équilibrée. Ce qui permet de couvrir un tiers des besoins journaliers recommandés.

- **Riche en vitamines et minéraux.** Une portion de 150g de fèves contribue en 34 % en vitamine B5, 28 % en vitamine B9 et 2 % en vitamine C des besoins journalières recommandés. Concernant les minéraux, la même portion de fèves couvre 15% en fer pour l'homme et 8% pour la femme, 6 à 8% en magnésium et 4% en calcium en besoins journalières recommandés. Les apports vitaminiques et minéraux sont encore plus élevés quand la fève est consommée à l'état sec.

2. Intérêt agronomique

Vicia faba, comme toutes les légumineuses alimentaires, contribue à l'enrichissement du sol en éléments fertilisants et spécialement l'azote, dont l'incidence est positive sur les performances des cultures qui les suivent, notamment le blé (Khaldi et *al.*, 2002 ; Rachef et *al.* 2005).

Ainsi, la fève améliore la teneur du sol en azote, avec un apport annuel de 20 à 40 kg /ha; Elle améliore aussi sa structure par son système racinaire puissant et dense. Les résidus des récoltes enrichissent le sol en matière organique.

3. Intérêt éco-toxicologique

La fève est très sensible à la pollution du sol. Ce qui en fait un modèle végétal très utilisé en éco-toxicologie dans un grand nombre d'études. Du fait que son caryotype est simple, elle est utilisée dans un grand nombre d'études de mutagénèse pour le test des anomalies chromosomiques (De Marco et *al.*, 1995 ; Kanaya et *al.*, 1994 ; Sang et Li 2004).

De plus, la grande quantité d'ADN contenue dans son noyau (Bennett 1976), la rend très sensible aux molécules génotoxiques (Ferrara et *al.*, 2004). *Vicia faba* est en outre aussi employée pour étudier les réponses des marqueurs du stress oxydant (Radetski et *al.*, 2004).

Les auteurs sont donc partagés en ce qui concerne le choix du modèle biologique, mais la plupart reconnaissent que *Vicia faba* est une plante très intéressante dans les études de génotoxicité.

5. REPARTITION DE LA CULTURE DES LEGUMINEUSES ET DE LA FEVE AU MAROC

Il est important de souligner que les légumineuses alimentaires sont réparties dans toutes les zones agro écologiques du Maroc (Laamari, 2015). Cependant, les trois quarts de la production nationale en légumineuses alimentaires sont concentrés dans les régions de Chaouia-Ouardigha, Abda-Doukkala, Fès-Meknès, Taza-El Hoceima et Tanger-Tétouan (SIAM, 2012). Ces régions ont une pluviométrie annuelle supérieure à 300 mm permettant la culture de la fève.

Selon Sadiki (1990), l'importance de la culture de la fève au Maroc est expliquée par sa propagation dans diverses zones (Laamari, 2015), à savoir :

- ❖ **Zone de Chaouia-Ouardigha** : Elle bénéficie d'un climat méditerranéen particulièrement agréable et caractérisé par des hivers doux et humides et des étés relativement tempérés. La culture de la fève occupe 27,8 % de la superficie des légumineuses dans cette région.
- ❖ **Zone d'Abda-Doukkala** : Du point de vue climatologique, la région s'inscrit dans le domaine du climat atlantique. La fève occupe une grande part des superficies des légumineuses alimentaires dans cette région avec un pourcentage de 45,78.
- ❖ **Zone de Fès-Meknès** : La région de Meknès-Tafilalet connaît un climat méditerranéen dégradé, subissant les influences continentales pendant les saisons d'été et d'hiver. La fève est la culture qui domine la part des assolements alloués aux légumineuses avec un taux de 52 %.

- ❖ **Zones de Taza-Hoceima :** La région s'inscrit dans le domaine du climat méditerranéen. Dans cette zone la fève est irriguée et occupe 12 % de la superficie réservée à cette culture au Maroc. **Zones de Tanger-Tétouan :** Caractérisée par une pluviométrie moyenne de 700 mm concentrée entre le mois d'octobre et le mois d'avril. La fève est l'espèce dominante sur une superficie de 8 300 ha et une production de 49 200 quintaux.

6. RENDEMENT DE LA FEVE

Le rendement de la fève a connu des fluctuations très importantes, ces derniers ont varié entre un minimum de 2,942 q/ha en 2000 et un maximum moyen de 8,539 kg/ha en 2006 (FAOSTAT, 2006). Ces fluctuations sont liées à la pluviométrie de la campagne agricole et aux attaques des maladies, des ravageurs et aussi bien d'autres contraintes.

7. COMPOSANTES DE RENDEMENT CHEZ LA FEVE

1. Rendement de la fève

Le rendement s'exprime en poids de graines par unité de surface. Il est considéré comme étant le produit d'un ensemble de composantes végétatives et reproductrices formées successivement au cours du développement de la plante (Withers, 1984). Il a une héritabilité faible. Il dépend de la variabilité génétique disponible, des effets majeurs des facteurs abiotiques ou biotiques et de la forte interaction génotype-environnement (Bond, 1966). La décomposition du rendement, montre que le nombre de plantes par unité de surface et le nombre de ramifications par plante, constituent des caractères primordiaux pour l'établissement d'un bon rendement. Ce sont les premières composantes du rendement, à s'établir au début du cycle de la fève. Ainsi, une bonne installation de la culture, à une densité optimale, est nécessaire pour l'obtention de bons rendements. Plus précisément, l'augmentation de la densité des plantes cause la réduction du nombre de gousses par plante, alors que le nombre de graines par gousse et le poids moyen du grain, tendent à rester constants (López-Bellido et al., 2005). En moyenne, plus de 80% des variations du rendement chez les féveroles sont expliquées par les variations du nombre de graines et de gousses par m² (Raphalen et al., 1986). Silim et Saxena (1992) ont montré que le rendement grain est fortement corrélé à la matière sèche totale, au poids moyen du grain et à l'indice de récolte et que ce rendement grain est négativement corrélé au nombre de gousses par m² et au nombre de grains par m².

2. Objectif de l'amélioration du rendement

L'amélioration du rendement est un objectif majeur de sélection de la plupart des programmes d'amélioration des cultures de fèves (Ghobary et Abd-Allah, 2010). Selon Osman et al. (2013). Il est très important, pour un sélectionneur, d'une part, de déterminer la structure du rendement de la culture étudiée et l'interrelation entre le rendement des semences et les composantes du rendement. D'autre part, de mettre l'accent sur les composantes ayant la plus grande influence sur ce rendement.

Cependant, la sélection basée sur le rendement seul est moins efficace en raison de sa complexité et de sa dépendance à l'égard de nombreuses composantes du rendement (Sindhu et al., 1985).

En plus, la sélection directe est également inefficace en raison de la grande interaction entre l'environnement et le génotype. D'après Neal et McVerty (1984), l'approche la plus courante pour s'attaquer à cet obstacle est de quantifier le rendement en le décomposant en caractères ou en composantes de rendement facilement mesurables.

3. Principales composantes du rendement

Selon Rowland (1955), les composantes essentielles du rendement sont :

- **Le nombre de gousses par plante ;**
- **Le nombre de graines par gousses ;**
- **La taille des graines.**

Mohamed et Bashir (1986), mentionnent comme principales composantes :

- **Le nombre de gousses par plante ;**
- **Le poids des graines ;**
- **La longueur des tiges ;**
- **Le nombre de branches par plante.**

Alors que Loss et Siddique (1997) ont souligné que les composantes les plus importantes pour améliorer le rendement grains des fèves sont :

- **La hauteur de la plante ;**
- **Le nombre de tiges par plante ;**
- **Le nombre de gousses par plante ;**
- **Le rendement biologique ;**
- **L'indice de récolte ;**
- **Le poids de 100 graines ;**
- **Le nombre de jours avant la floraison et la maturité.**

Cependant parmi ces caractéristiques, le nombre de tiges et le nombre de gousses par plante (Peat, 1982) ainsi que le rendement biologique étaient les plus fortement affectés par les conditions environnementales.

Plusieurs études ont analysé les corrélations entre les différents caractères des plantes et le rendement des semences. Afin de sélectionner des semences à rendement plus élevé, il est nécessaire d'avoir examiné les relations mathématiques entre ces différents caractères, en particulier entre le rendement grain et les composantes du rendement.

B. Modélisation statistique du rendement et ses composantes

La Modélisation des données est l'art d'extraire de l'information d'un ensemble de données obtenues par des mesures, et de condenser cette information dans un modèle exploitable. Généralement par des mesures, on représente une grandeur d'un objet par un nombre en formant une famille de données telles que ces derniers se composent par des variables et des individus. La modélisation est apparue dans le champ de l'agronomie depuis les années 1950 avec les travaux de De Wit (1978). Elle occupe actuellement une place conséquente. Profitant des possibilités ouvertes par le développement de l'informatique, la modélisation permet d'appréhender des échelles variées - modélisation de la plante, du peuplement végétal, de la parcelle agricole, du territoire (Colbach et *al.*, 2001). Elle permet aussi de quantifier des relations de fonctionnement entre les différents éléments du système, décrits à des degrés variés d'explicitation des mécanismes.

Ainsi, la modélisation est devenue l'outil incontournable qui permet de connaître, et de comprendre les mécanismes impliqués dans la production des cultures. D'autre part, elle permet de quantifier simultanément les effets de 18 différents facteurs sur les performances du système étudié (Boote et *al.*, 1996). Elle offre aussi la possibilité d'explorer une gamme plus vaste de situations dans un intervalle de temps restreint (Semenov et *al.*, 2009). Ensuite, elle fournit un moyen de prédire la valeur potentielle des caractéristiques dans un large éventail d'environnements cibles. Les modèles de culture peuvent être utilisés dans les applications de sélection pour explorer le paysage des performances en matière de rendement. Ils permettent aussi de tester les effets de traits complexes sur le rendement des céréales ou des légumineuses à grande échelle dans un contexte de production.

I. Régression linéaire multiple

La régression multiple est une généralisation de la régression simple. Son but est d'exprimer une variable quantitative (variable expliquée) en fonction d'autres variables quantitatives (variables explicatives). Elle est généralement utilisée pour trouver la meilleure équation linéaire prévisionnelle (modèle) et en évaluer la précision et la signification.

Un modèle de régression linéaire multiple est de la forme :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots \beta_k X_k + \varepsilon$$

Où :

- ✓ Y est la variable dépendante (une variable aléatoire).
- ✓ $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ Sont les $k + 1$ paramètres du modèle.
- ✓ X_i représente l'ième valeur des k variables explicatives. On les considère comme des grandeurs certaines.
- ✓ ε est la fluctuation aléatoire non observable.

Avec : $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ sont les coefficients et ε c'est la constante de l'équation. Pour les études de régression multiple, le nombre de variables doit être inférieur ou égal au nombre d'individus. Si le nombre de variables est élevé, il est plus judicieux d'utiliser la méthode du Partial Least Squares (PLS).

✚ Les objectifs de la régression multiple sont :

Identifier le modèle :

- Estimer les coefficients β_j avec $j = 0, \dots, k$, à partir des observations disponibles.
- Estimer la précision de cette estimation.
- Décider de la nature de l'influence de chaque variable explicative x_j sur la variable à expliquer y .

Valider le modèle :

- Donner une mesure de la qualité globale de la régression.
- Détecter les points aberrants où hors épure.
- Prévoir pour une nouvelle observation x la valeur de y .

✚ En ce qui concerne les conditions d'application du test, la régression multiple est donc soumise aux mêmes contraintes que la régression linéaire simple :

- **Distribution normale de la variable dépendante.**
- **Indépendance des résidus.**
- **Linéarité des relations entre la variable dépendante Y et chacune des variables explicatives. L'équation recherchée est celle d'un hyperplan à k dimensions. Les paramètres $B_1, B_2, \dots, B_k$ sont les pentes de l'hyperplan dans les dimensions considérées, et sont appelés coefficients de régression.**

La régression « pas à pas » est fréquemment utilisée en agronomie. Par exemple dans l'approche d'analyse des écarts du rendement. Cette dernière analyse est utilisée pour identifier et classer les facteurs qui peuvent expliquer les faibles rendements, observés dans une série de champs d'agriculteurs.

1. Application du modèle de régression linéaire multiple

Moussamih (2019) a appliqué cette méthode sur 20 génotypes de la fève (*Vicia faba* L.). Ses travaux visaient l'étude et l'identification des caractéristiques de différents génotypes de *Vicia faba* L. en relation avec le rendement à l'aide des modèles de régression. Pour ce faire, elle a opté pour construire un modèle de régression linéaire multiple entre le rendement en fonction de la hauteur, nombre de tiges, nombre de nœuds fructifères, nombre de gousses totales et nombre de graines par plante à l'aide du logiciel IBM SPSS. Le modèle de régression linéaire multiple « pas à pas » qu'ils ont mis en évidence est comme suit :

$$Y = 0,880 + 0,796 \text{ Nb de gr par pte} - 0,726 \text{ Nb de gs totale} + 0,663 \text{ Nb de nds fruct par pte}$$

$R^2 = 0,712$ avec y = rendement ; Nb de gr par pte : nombre de graines par plante ; Nb de gs totale : nombre de gousses totales ; Nb de nds fruct par pte : nombre de nœuds fructifères par plante. Ses résultats montrent que la méthode ascendante a permis de passer en revue les cinq modèles possibles sur la base de la valeur de signification de F et de R^2 . Ainsi, elle a retenu le modèle 3, c'est-à-dire celui incluant le nombre de graines par plante, le nombre de gousses totales et le nombre de nœuds fructifères par plante (Tableau Récapitulatif)

Récapitulatif des modèles.

Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Variation de R-deux	Variation de F	ddl	ddl	Sig. Variation de F
1	,836 ^a	0.699	0.697	4.215931753891510	0.699	667.270	1	288	0.000
2	,838 ^b	0.702	0.700	4.196268692260020	0.004	3.705	1	287	0.045
3	,844 ^c	0.712	0.709	4.136678079766220	0.009	9.328	1	286	0.002
4	,845 ^d	0.714	0.710	4.127622573771420	0.002	2.256	1	285	0.134
5	,845 ^e	0.714	0.709	4.133752581317060	0.000	0.155	1	284	0.694

Par la suite, le modèle opté par Ajana (2019) dans son étude sur la culture de la fève a été bien validé suite à une vérification des hypothèses du modèle de régression (les résiduelles doivent suivre une distribution normale et la variance résiduelle doit être constante). Donc, l'améliorateur pourra sélectionner les lignées productives sur la base de ces trois critères du modèle de régression retenu à savoir le nombre de graines par plante, le nombre de gousses totales et le nombre de nœuds fructifères par plante.

2. Avantages et inconvénients

Casagrande (2008) et Valantin-Morison & Meynard (2008) ont remarqué que la méthode la plus adoptée dans les diagnostics agronomiques repose sur le modèle de régression linéaire multiple « pas à pas ». Ce modèle permet de sélectionner les variables explicatives contribuant significativement. La variable la plus explicative est introduite en premier, suivie par celles qui présentent le coefficient de corrélation partielle le plus élevé (Mekhlouf et al., 2006). Toutefois, Prost (2008), a rapporté que, le modèle de régression linéaire multiple « pas à pas », a l'inconvénient d'aboutir à des résultats dépendants du degré de précision de la base de données. Ce modèle est, aussi, instable en raison du nombre de variables explicatives retenues dans le modèle final, généralement, plus faible que celui dans le modèle complet.

II. ANALYSE DE CORRELATION

1. Définition

Selon, Manggoel et al. (2012), l'analyse de corrélation est une technique facile qui aide à déterminer le degré et l'ampleur de l'association entre le rendement et les caractéristiques de ses composantes. Cette analyse a son importance dans la technique de sélection si le choix souhaitable des caractères associés au rendement est hautement héréditaire (Navaneetha et al., 2019). L'analyse de corrélation est utile pour déterminer les caractéristiques des composantes critiques d'un trait complexe comme le rendement. D'après, Nanda et al. (2019), les études de corrélation fournissent des informations sur la nature et l'étendue de l'association entre le rendement et les caractères qui le composent. Elles peuvent donc aider l'améliorateur à décider de l'ampleur et de la direction de la sélection pour l'amélioration du caractère. 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.

2. Avantages et inconvénients

Le rendement, étant un caractère complexe, déterminé par plusieurs caractères constitutifs, l'estimation de l'interrelation du rendement avec d'autres caractères doit être prise en compte 20 dans les programmes de sélection des cultures. D'où la connaissance de la corrélation entre le rendement et les caractères qui le composent s'avère essentielle. Cependant, l'analyse de corrélation ne donne pas une image exacte de l'importance relative des différents attributs du rendement (Divya et *al.*, 2016). Shivanna et *al.* (2007) ont signalé que l'analyse de corrélation mesure la relation entre deux variables. Par contre, elle n'informe pas sur l'effet direct et indirect des traits sur le rendement. D'après Navaselvakkumaran et *al.* (2019), les analyses de corrélation aident entièrement à déterminer l'association bilatérale entre deux variables ou caractères. Toutefois, ils ne fournissent pas d'informations exactes sur la relation complexe qui existe entre un ensemble de variables ou de caractères en ce qui concerne le rendement.

Les coefficients de corrélation permettent de déterminer les paramètres affectant directement le rendement en graines ; mais ils restent insuffisants pour déterminer les paramètres ayant des effets indirects sur ce dernier (Dogan, 2009)

3. Application du modèle de corrélation

Moussamih (2019) a appliqué aussi cette méthode sur 20 génotypes de la fève (*Vicia faba* L.). Son travail visait l'étude et l'identification des caractéristiques de différents génotypes de *Vicia faba* L. en relation avec le rendement à l'aide des modèles de régression. Dans son étude, l'analyse des corrélations partielles permet de tirer le point suivant : Tous les caractères présentés dans le tableau en dessous, sont positivement corrélés deux à deux au niveau $\alpha = 0,01$, à l'exception du nombre de tiges et la hauteur.

Corrélation partielle entre les composantes du rendement

		Nombre de tiges	Nombre de nœuds fructifères/plante	Nombre de gousses totales	Nombre de graine/plante	Rendement par plante
Hauteur	Corrélation de Pearson	0.054	,255**	,276**	,304**	,258**
	Signification. (bilatérale)	0.357	0.000	0.000	0.000	0.000
Nombre de tiges	Corrélation de Pearson	1	,468**	,401**	,379**	,372**
	Signification (bilatérale)		0.000	0.000	0.000	0.000
Nombre nœuds fructifères/plante	Corrélation de Pearson		1	,921**	,796**	,673**
	Signification (bilatérale)			0.000	0.000	0.000
Nombre de gousses totales	Corrélation de Pearson			1	,825**	,655**
	Signification. (bilatérale)				0.000	0.000
Nombre de graines/plante	Corrélation de Pearson				1	,836**
	Signification (bilatérale)					0.000

III. ANALYSE DU CHEMINEMENT OU PATH ANALYSIS

1. Définition

L'analyse conventionnelle par le coefficient de pistes ou analyse de pistes causales, 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. L'analyse du cheminement a également été effectuée pour déterminer la contribution directe et indirecte de chaque caractère au rendement des semences (Chitra et Ramani, 2010). Cette méthode, développée par Wright (1921) comme outil statistique, permet d'étudier les relations complexes entre ces caractères. D'autres auteurs définissent le Path analysis comme étant une technique statistique qui consiste à répartir les coefficients de corrélation entre ses effets directs et indirects, de manière à pouvoir estimer la contribution de chaque caractère au rendement (Annexe 1).

2. Avantages

L'analyse des coefficients de cheminement est largement utilisée dans la sélection des cultures pour déterminer la nature des relations entre le rendement en grains et ses composantes contributives. Elle est aussi utilisée pour identifier les composantes ayant des effets significatifs sur le rendement en vue d'une utilisation potentielle comme critères de sélection (Mohammadi et *al.*, 2003). Chitra et Rajmani (2010) ont indiqué que le Path analysis est également utilisé pour déterminer la contribution directe et indirecte de chaque caractère au rendement des semences. L'objectif de l'analyse du cheminement est d'une part d'accepter les descriptions de la corrélation entre les caractères, sur la base d'un modèle de relation de cause à effet, d'autre part d'estimer l'importance des caractères affectant un caractère spécifique (Cyprien et Kumar, 2011). Plusieurs études (Frances et *al.*, 2004) indiquent que le Path analysé présente plus d'avantages que d'inconvénients. Il permet de :

- Indiquer l'importance relative de certains facteurs contribuant à la réduction du rendement, quel que soit le facteur ;
- Mettre en évidence des effets opposés entre les variables sur différentes voies d'influence, ce qui peut masquer l'importance de certains facteurs sur ces voies ;
- Déterminer quelles variables doivent être prises en considération pour permettre d'améliorer le rendement de la fève.

3. Application du modèle Path analysis

Ajana (2020) a appliqué cette méthode sur 20 génotypes de *Vicia faba* L.

Ses travaux visaient la comparaison des résultats à ceux obtenus par la méthode ascendante utilisée dans la régression linéaire multiple (Moussamih, 2019) où l'auteur a retenu le modèle incluant les mêmes variables : le nombre de graines par plante, le nombre de gousses totales par plante et le nombre de nœuds fructifères par plante.

Elle a opté une modélisation du rendement et ses composants à l'aide d'une analyse conventionnelle par le coefficient de piste (Path analysis).

Le modèle final de la médiation Path analysis retenu (Figure 2) est obtenu après élimination des chemins non significatifs, tels que l'effet direct de la hauteur sur le nombre de gousses par plante, ainsi que, l'effet direct du nombre de tiges par plante sur le nombre de gousses par plante, dans le cas d'une médiation totale.

Ce modèle final est considéré aussi comme valide, suite à une vérification du RMSEA et du CFI qui sont dans les normes : **RMSEA** = 0,063 et **CFI** = 0,994.

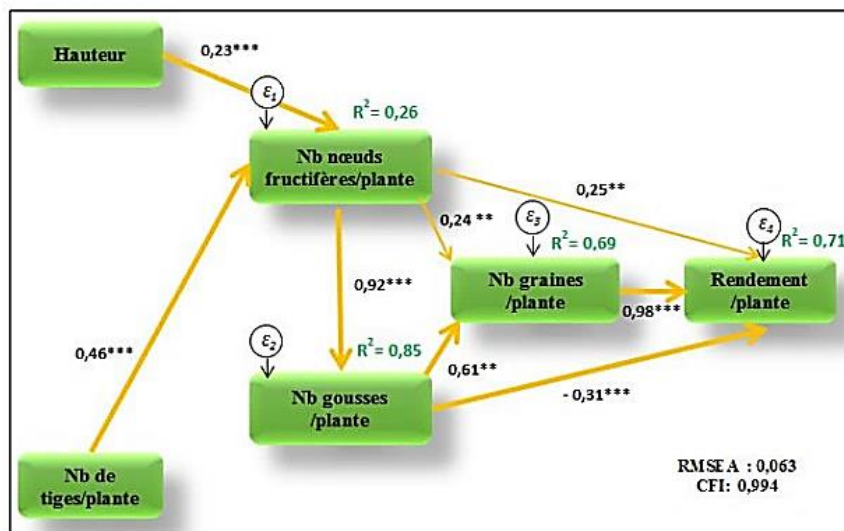


Figure 2 : Modèle final de la médiation Path analysis du rendement et ses composants chez *Vicia faba* L. (Ajana, 2020)

Le modèle final indique les résultats suivants :

- Un flux de causalité direct très hautement significatif du nombre de graines par plante et du nombre de gousses par plante sur le rendement par plante.
- Un flux de causalité direct hautement significatif du nombre de nœuds fructifères par plante sur le rendement par plante.
- Un flux de causalité indirect de la hauteur d'une part et du nombre de tiges par plante sur le rendement par plante via le nombre de nœuds fructifères par plante.
- Un flux de causalité indirect du nombre de nœuds fructifères par plante sur le rendement par plante par le biais des médiateurs nombre de gousses par plante et nombre de graines par plante.

Le modèle opté par Ajana (2020) dans son étude a permis de constater que les facteurs directs les plus importants déterminant le rendement par plante de *Vicia faba* L., expliquent 71% de la variabilité totale, et sont :

- **Le nombre de gousses par plante**
- **Le nombre de graines par plante**
- **Le nombre de nœuds fructifères par plante**

I- Objectif

Le but de mon travail est de tester le potentiel de rendement des différentes lignées sélectionnées ainsi que leurs principales caractéristiques agronomiques à partir de deux essais élites. Et aussi de modéliser l'expression du rendement via la régression linéaire multiple et le Path analysis.

II- Site expérimental

La présente étude a été entièrement réalisée au sein de l'Institut National de la Recherche Agronomique « INRA » au laboratoire d'Amélioration de la fève dans le Domaine Expérimental de Douyet (Fès). Le site expérimental est géographiquement situé à 34°04'N, 5°07'W. Il s'agit d'un domaine expérimental implanté en zone Bour favorable de la plaine du Sais (Province de Moulay Yaacoub- Wilaya de Fès-Meknès). Il se situe à une altitude de 416 m, sur une superficie totale est de 440 ha.

III- Régime pluviométrique du Domaine expérimental de Douyet pour la saison 2020- 2021

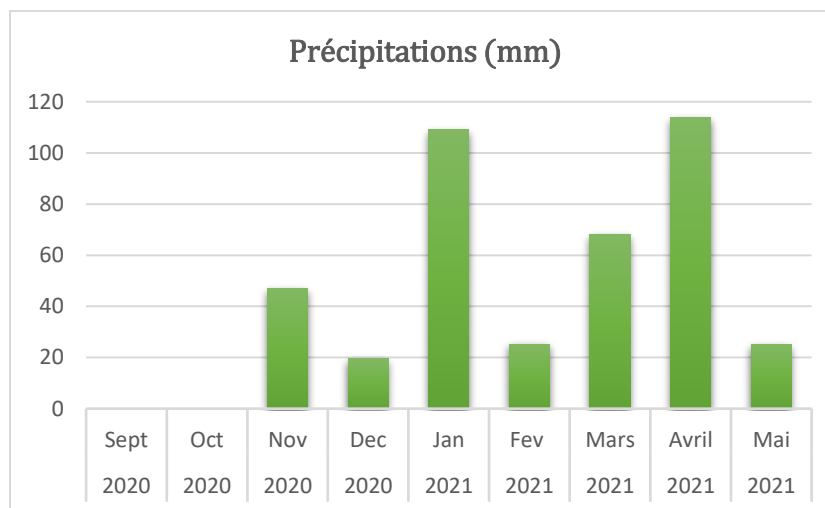


Figure 3 : Évolution des précipitations au niveau du domaine expérimental du Douyet. (Campagne agricole 2020/2021)

Le début de la campagne agricole 2020/2021 a été caractérisé par des conditions climatiques défavorables avec un déficit hydrique notable et une répartition dans le temps inadéquate, ayant retardé l'installation des cultures d'automne et impacté négativement l'état des parcours. Les pluies importantes et généralisées enregistrées les mois de janvier, mars et avril ont par ailleurs eu un impact très positif sur l'évolution de la campagne agricole, à travers :

- ❖ L'amélioration du couvert végétal en général
- ❖ La dynamisation des travaux d'entretien (désherbage chimique et manuel)
- ❖ L'amélioration des retenues des barrages à usage agricole et des niveaux des nappes phréatiques ;

Les cultures d'automne ont connu une bonne dynamique, dès la 3^{ème} décennie du mois de novembre 2020, marquée par une prédominance du travail mécanique des sols qui a concerné près de 94% de la superficie travaillée.

Le cumul pluviométrique moyen au niveau de la station du Douyet au 31 mai 2021 s'est baissé à 407,5 mm avec une bonne répartition temporelle contre 510 mm pour la moyenne des 40 dernières années, soit une baisse de 20%.

IV- Matériel végétal

Les essais concernés sont l'essai élite de rendement I et II. Le nombre de lignées testées par essai est de 20. Ces lignées représentent une partie du fruit de la stratégie d'amélioration des fèves suivie par le laboratoire d'amélioration de la fève et de la féverole du CRRA de Meknès. Parmi ces lignées, deux témoins performants sont implantés au hasard dans chaque répétition afin de mieux discerner par la suite les résultats obtenus. Il s'agit des lignées 19 et 20 (Lobab et Alfia21).

V- Protocole expérimental

1. Itinéraire technique

L'itinéraire technique utilisée pendant notre parcelle expérimentale est comme suit :

Tableau 2 : Itinéraire technique (INRA, 2021)

Date	Opération
01/10/2020	Labour profonds 3 disque
13/10/2020	Cover-crop
25/10/2020	Epannage d'engrais
03/11/2020	Enfouissement d'engrais (cover-crop)
20/11/2020	Semis manuel
10/02/2021	Désherbage
19/02/2021	Traitement insecticide
02/03/2021	Traitement Orobanche
15/03/2021	Désherbage
26/03/2021	Traitement insecticide
27/03/2021	Découpage des allées
05/04/2021	Traitement insecticide
08/04/2021	Traitement insecticide
20/04/2021	Traitement insecticide

2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental adopté pour chaque essai correspond à un dispositif en bloc aléatoire complet à trois répétitions chacun. La parcelle élémentaire consiste en 4 lignes de 4 m de long. Les allées entre les blocs sont 2 m, l'interligne est de 0,6 m. Le nombre de lignées testées par essai est 20 y compris deux témoins, soit au total 40 lignées testées.

3. Données expérimentales

Pour chaque variété, le début de formation des gousses ainsi que les fins de floraisons ont été noté en premier temps. Après maturation, des mesures ont été prises sur cinq plantes récoltées au hasard au niveau de chaque parcelle élémentaire pour chaque répétition.

Les données mesurées après maturation et auxquels nous nous sommes intéressés lors de l'évaluation des 40 lignées étudiées sont les suivants :

- ❖ Hauteur de la plante de la base jusqu'à le sommet en cm.
- ❖ Nombre de tiges secondaires par plante
- ❖ Nombre de nœuds fructifères par tige principale
- ❖ Nombre de gousses par tige principale
- ❖ Nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires
- ❖ Nombre de gousses par tiges secondaires
- ❖ Nombre de graines par tige principale
- ❖ Nombre de graines par tiges secondaires
- ❖ Rendement par plante

4. Traitement des données :

La saisie des données et les graphes ont été effectués par Excel. La manipulation des données a été faite par Python sous la plateforme Jupyter Notebook pour nettoyer les données (de révéler les données aberrantes) en premier temps, puis pour la réalisation des corrélations partielles, l'ANOVA et la régression linéaire multiple. Relativement à cette dernière, la méthode descendante (*Backward*) est la méthode retenue pour décider quelles sont les variables explicatives à exclure dans notre modèle de régression. Cette technique permet de sélectionner un sous-ensemble de variables. Elle consiste à prendre en compte l'ensemble des variables contenues dans le modèle global, et à éliminer une à une les variables correspondant à la plus petite valeur de t. Quant à la modélisation par le Path Analysis, elle a été réalisée par le module Lavaan sous le logiciel R (Rosseel, 2012).

I- Variation des données Végétatives

EYT1

L'analyse de la variance (Tableau 3) a montré que :

Les lignées de l'essai élite 1 diffèrent très hautement significative par la hauteur de la tige principale en premier lieu. Aussi, elles se différencient que par les caractères liés à la tige principale tels que significativement par (Nbre_Tiges_Secondaires, Nbre_Noeuds_Fructifères_TP, Poids_TP) et hautement significative par les deux caractères (Nbre_Gousses_TP, Nbre_Grn_TP).

Tableau 3 : Synthèse de l'analyse de la variance des composantes du rendement

Caractère	Pvalue	Signification
Hauteur TP	0,000	Très Hautement Sig.
Nbre_Tiges_Secondaires	0,044	Significative
Nbre_Noeuds_Fructifères_TP	0,013	Significative
Nbre_Gousses_TP	0,001	Hautement Sig.
Nbre_Noeuds_Fructifères_TS	0,058	NS
Nbre_Gousses_TS	0,209	NS
Nbre_Grn_TP	0,002	Hautement Sig.
Poids_TP	0,010	Significative
Nbre_Grn_TS	0,266	NS
Poids_TS	0,171	NS
Rdt_par_Plante	0,163	NS

1- Hauteur de la tige principale

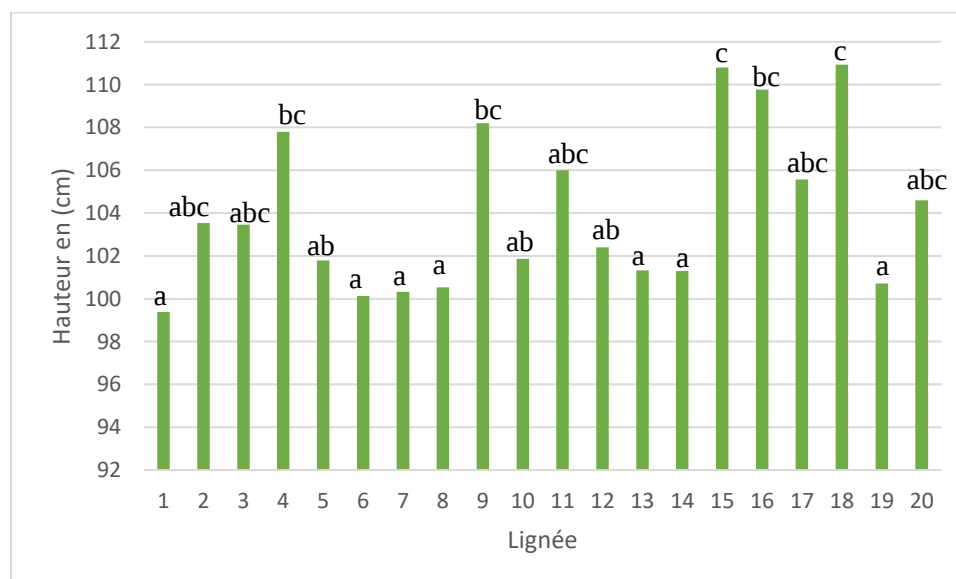


Figure 4 : Variation de la hauteur en fonction des lignées

La hauteur de la tige principale chez les lignées testées varie entre 99 et 111 cm avec une moyenne de 104 cm (Figure 4).

Suite à l'analyse de la variance, nous pouvons conclure que les lignées testées présentent des hauteurs très hautement significatives (Tableau 3).

La plupart des lignées ont une hauteur supérieure à la hauteur des témoins.

La comparaison des moyennes, selon la méthode de Student-Newman-Keuls, a montré que les lignées 1 et 6 sont statistiquement plus courtes et que les lignées 16, 15 et 18 sont statistiquement les plus hautes (Figure 4). Les groupes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différents à alpha à 5%.

2- Nombre de tiges secondaires

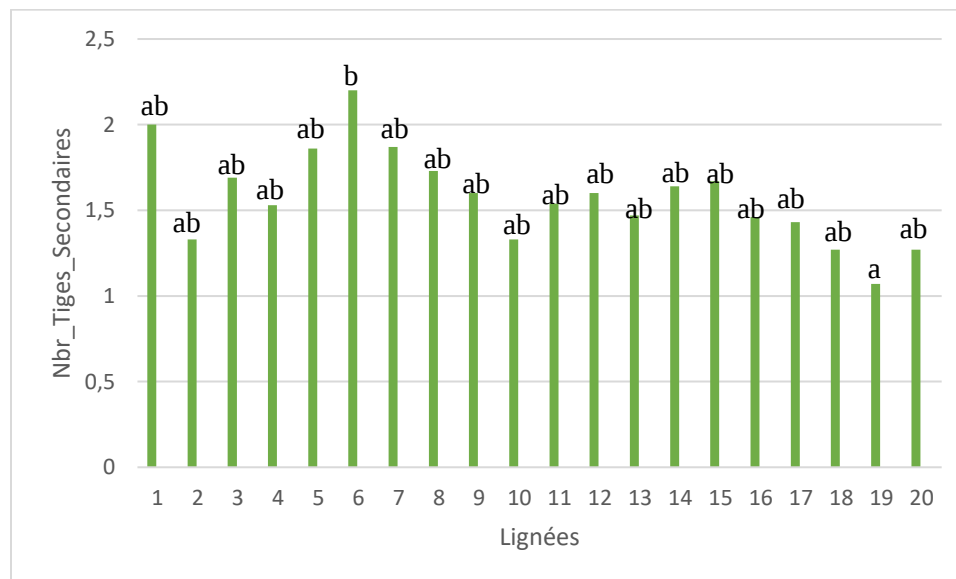


Figure 5 : Variation de nombre de tiges secondaires en fonction des lignées

D'après la figure, le nombre de tiges par plante varie considérablement entre les lignées testées : 1,07 à 2,2 tiges par plante avec une dominance représentée par 12 lignées dépassant 1,5 tiges par plante. La lignée 6 a donné le maximum de tiges secondaires parmi les lignées testées.

Il est à noter que le 1^{er} sous-groupe « a » possède moins de tiges secondaires (1,07 tiges). Alors que le 2^{ème} sous-groupe « b » montre plus de tiges secondaires (2,2 tiges).

3- Nombre de nœuds fructifères par tige principale

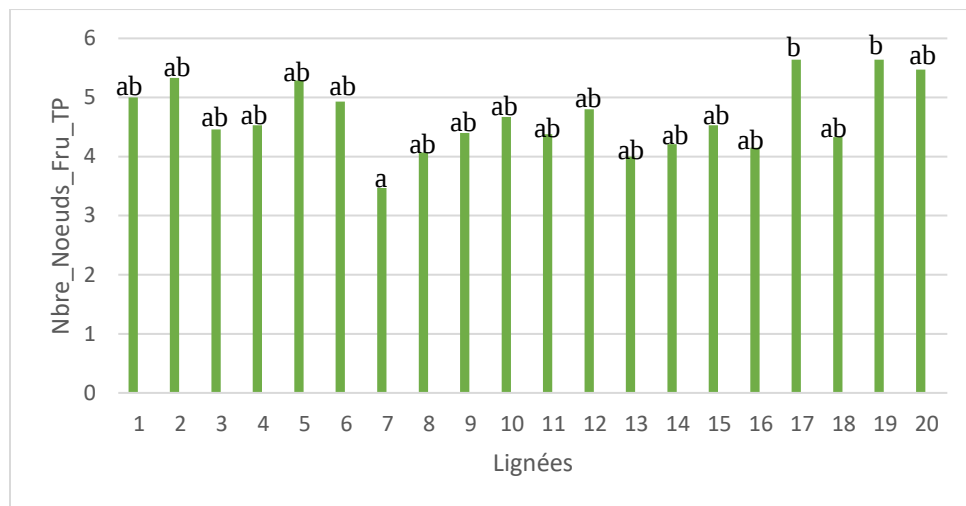


Figure 6 : Variation du nombre de nœuds fructifères par tige principale

La comparaison des moyennes a permis de mettre en évidence 2 sous-groupes a, et b (figure 6). Les groupes avec la même lettre ne sont pas significativement différents à alpha à 5%.

Nous avons remarqué, pour la figure 6, que le nombre de nœuds fructifères par tige principale varie entre 3,47 et 5,64. Suivies de la lignée 20, les lignées 17 et 19 ont produit le maximum de nœuds fructifères par tige principale. Alors que le minimum de nœuds fructifères a été réalisé par la lignée 7.

4- Nombre de gousses par tige principale

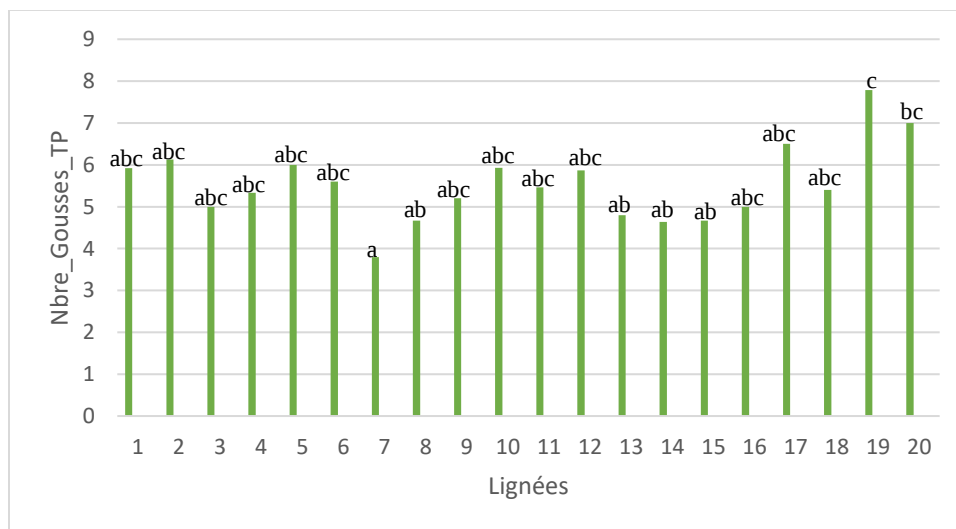


Figure 7 : Variation du nombre de gousses par tige principale en fonction des lignées.

La comparaison des moyennes en fonction a permis de mettre en évidence 3 sous-groupes a, b et c. Nous avons constaté, de la figure 7, que le nombre de gousses par tige principale varie entre 3,8 et 7,79. Suivies de la lignée 17, les lignées 19 et 20 ont données le maximum de gousses par tige principale. Alors que la lignée 7 a produit moins de gousses par tige principale.

Il est à noter que le 3^{ème} sous-groupe « c » représenté par le témoin 19 a montré le maximum de gousses par tige principale.

5- Nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires

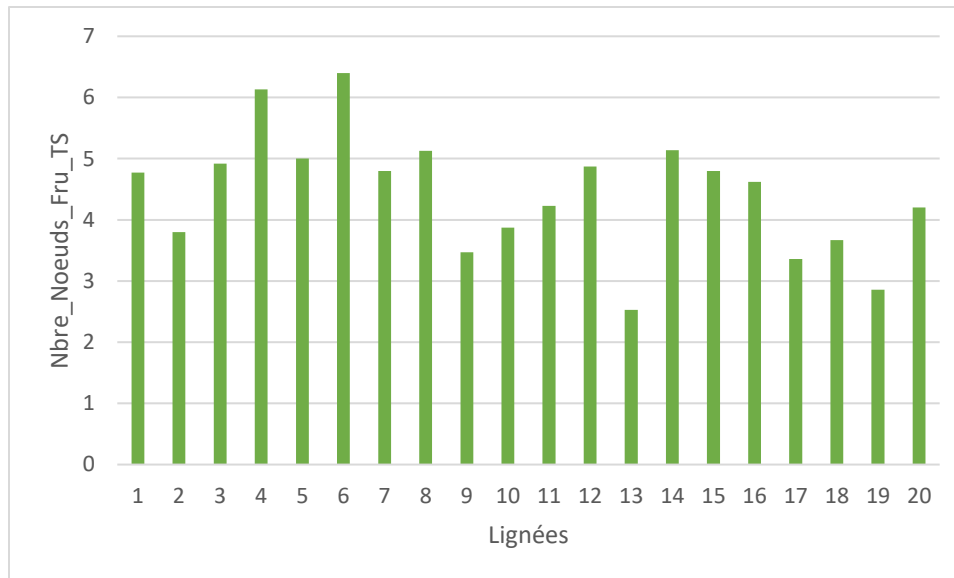


Figure 8 : Variation du nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires

D'après la figure 8, nous distinguons que le nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires varie entre 2,53 et 6,4. La lignée 6 a produit le maximum de nœuds fructifères par tiges secondaires. Alors que le minimum a été produit par les lignées 13 et 19 respectivement.

6- Nombre de gousses par tiges secondaires

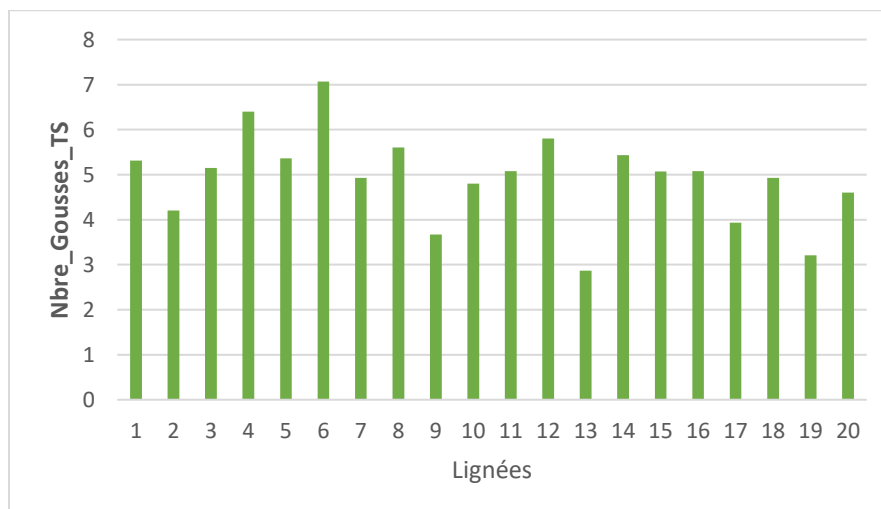


Figure 9 : Variation du nombre de gousses par tiges secondaires en fonction des lignées.

D'après la figure 9, nous avons constaté que les lignées 13 et 19 ont produit le minimum de gousses par tiges secondaires. Nous avons noté que la lignée 6 a produit le maximum de gousses par tiges secondaires, sachant qu'elle a culminé le nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires. La lignée 13 a réalisé moins de nœuds fructifères par tiges secondaires que la lignée 19, alors elle a produit moins de gousses par tiges secondaires que la lignée 19. La lignée 4 a dépassé les autres fèves pour ce caractère et avoisine la lignée 6.

7- Nombre de graines par tige principale

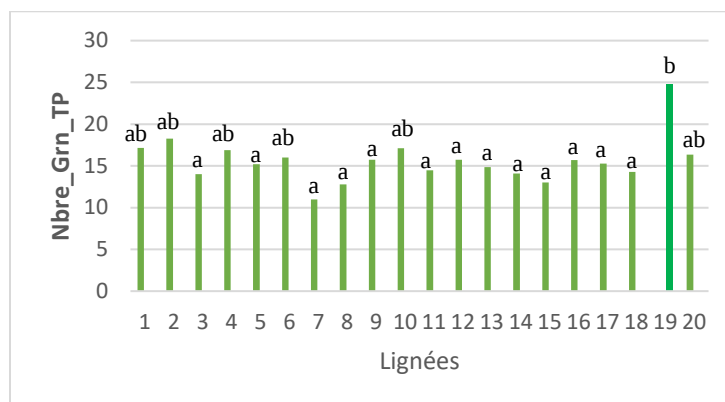


Figure10 : Variation du nombre de graines par tige principale en fonction des lignées.

La figure 10, montre que le nombre de graines par tige principale est compris entre 11 et 24,71. Nous observons que toutes les lignées ont produit plus de graines par tige principale à l'exception de la lignée 7 qui a produit le minimum de graines par tige principale. Alors que la lignée témoin 19 a dépassé les autres lignées très significativement en produisant presque 25 graines par tige principale. Cette dernière a montré le même comportement concernant le nombre de gousses par tige principale. Cependant, la lignée 7 a été marquée par sa production faible des gousses par tige principale.

8- Poids total de graines par tige principale



Figure 11 : Variation du poids total des graines au niveau de la tige principale.

D'après la figure, le poids total de graines par tige principale est compris entre 12,1 et 25,5g. La lignée 19 possède le poids total de graines le plus élevé. La lignée 2 vient en deuxième position avec une différence de 5g avec le témoin 19. Sachant que les deux lignées mentionnées ont déjà pris les mêmes positions concernant le nombre de graines par tige principale.

Encore, la lignée 7 reste en dernier avec un poids total de graines de 12,1g.

9- Nombre de graines par tiges secondaires

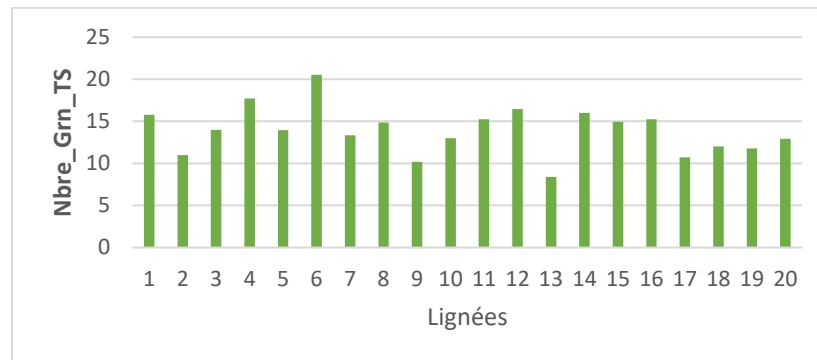


Figure 12 : Variation du nombre de graines par tiges secondaires en fonction des lignées.

Le nombre de graines par tiges secondaires varie entre 8,4 et 20,5. Nous remarquons que les lignées 6 et 4 ont produit plus de graines par tiges secondaires. Ces lignées dépassent le témoin 19 en termes de production de graines par tiges secondaires. La lignée 13 a donné le minimum de graines par tiges secondaires.

Il est à noter que la lignée 6 suivi du 4 ont produit le maximum de graines par tiges secondaires, sachant qu'elles ont produit le maximum de nœuds fructifères par tiges secondaires. Ainsi, La lignée 13 a réalisé moins de nœuds fructifères par tiges secondaires que la lignée 19, alors elle a produit moins de nombre de gousses par tiges secondaires.

10- Poids total de graines par tiges secondaires

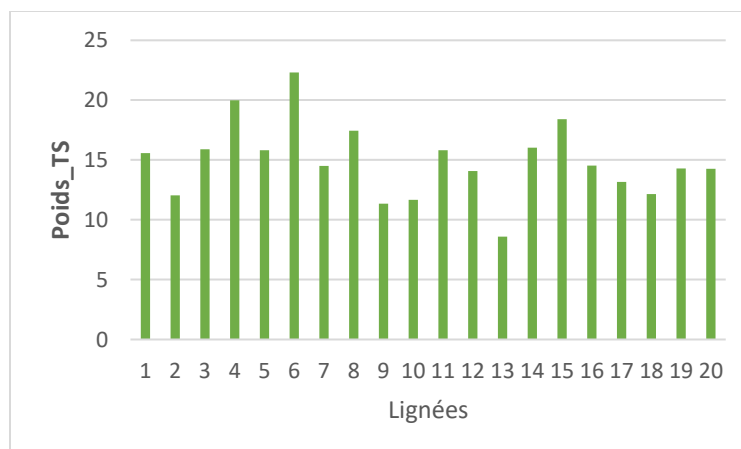


Figure 13 : Variation du poids total des graines au niveau de la tiges secondaires en fonction des lignées.

La figure 13 montre que le poids total de graines par tiges secondaires est compris entre 8,5 et 22,3g. Les résultats mentionnés dans cette figure viennent en parallèle avec la précédente.

Dont les lignées 6 et 4 donnent les deux premiers poids maximaux. Tandis que la lignée 13 demeure en dernier d'un poids minimal de 8,5g par tiges secondaires.

11- Rendement par plante

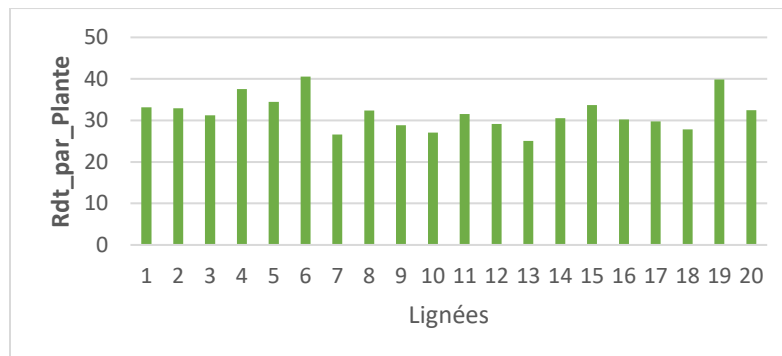


Figure 14 : Rendement par plante en fonction des lignées

D'après la figure 14, nous remarquons que le rendement par plante est compris entre 25 et 40,5. La lignée 6 avoisinée du témoin 19 ont montré un rendement plus élevé par rapport aux autres lignées et au témoin 20. Cependant, la lignée 13 a le rendement par plante le plus faible.

Corrélations partielles entre les composantes du rendement

Tableau 4 : Corrélations partielles entre les composantes du rendement.

	Nbre Tiges Secondaires	Nbre Nœuds Fructifères TP	Nbre Gousses TP	Nbre Nœuds Fructifères TS	Nbre Gousses TS	Nbre Grn TP	Poids TP	Nbre Grn TS	Poids TS
Hauteur TP	-0,111	-0,010	-0,098	-0,059	-0,064	-0,092	-0,047	-0,075	-0,038
Nbre Tiges Secondaires		-0,092	-0,125*	0,644**	0,601**	-0,071	-0,028	0,604**	0,617**
Nbre Nœuds Fructifères TP			0,870**	0,029	0,078	0,606**	0,499**	0,013	-0,023
Nbre Gousses TP				0,006	0,092	0,670**	0,520**	0,017	-0,034
Nbre Nœuds Fructifères TS					0,959**	-0,012	-0,016	0,878**	0,842**
Nbre Gousses TS						0,042	0,019	0,895**	0,843**
Nbre Grn TP							0,826**	0,065	0,031
Poids TP								0,032	0,119*
Nbre Grn TS									0,929**

L'analyse des corrélations partielles (Tableau 4) nous permet de tirer les points suivants :

- ❖ Le nombre de TS est positivement corrélé avec (Nbre de Nœuds Fruc TS, Nbre de Gousses TS, Nbre de Grn TS, Poids TS) au niveau $\alpha = 0,05$ et négativement avec le nbre de gousses TP au niveau $\alpha = 0,01$.
- ❖ Le nombre de nœuds fructifères par TP est positivement corrélé avec (Nbre de gousses TP, Nbre Grn TP, Poids TP) au niveau $\alpha = 0,05$.
- ❖ Le nombre de gousses TP est positivement corrélé avec (Nbre de Grn TP, Poids TP) au niveau $\alpha = 0,05$.
- ❖ Le nombre de nœuds fructifères par TS est positivement corrélé avec (Nbre de Gousses TS, Nbre de Grn TS, Poids TS) au niveau $\alpha = 0,05$.
- ❖ Le nombre de gousses TS est positivement corrélé avec (Nbre de Grn TS, Poids TS) au niveau $\alpha = 0,05$.
- ❖ Le nombre de graines TP est positivement corrélé avec le poids TP au niveau $\alpha = 0,05$.
- ❖ Le poids TP est positivement corrélé avec le poids TS au niveau $\alpha = 0,01$.
- ❖ Le nombre de graines TS est positivement corrélé avec le poids TS au niveau $\alpha = 0,05$.

Nous notons que la hauteur ne présente aucune corrélation significative avec les autres paramètres étudiés.

EYT2

L'analyse de la variance (Tableau 5) a montré que :

Les lignées de l'essai élite 2 diffèrent hautement significative par la hauteur TP en premier lieu, puis par les caractères liés aux tiges secondaires tels que, Hautement significatives (Nbre_Noeds_Fructifères_TS, Poids_TS) et significatives (Nbre_Gousses_TS, Nbre_Grn_TS) et enfin le rendement par plante.

Tableau 5 : Analyse de la variance des composantes de rendement

Caractère	pvalue	Signification
Hauteur TP	0,002	Hautement Sig.
Nbre_Tiges_Secondaires	0,086	NS
Nbre_Noeds_Fructifères_TP	0,815	NS
Nbre_Gousses_TP	0,267	NS
Nbre_Noeds_Fructifères_TS	0,006	Hautement Sig.
Nbre_Gousses_TS	0,011	Significative
Nbre_Grn_TP	0,084	NS
Poids_TP	0,101	NS
Nbre_Grn_TS	0,019	Significative
Poids_TS	0,008	Hautement Sig
Rdt_par_Plante	0,012	Significative

1. Hauteur de la tige principale

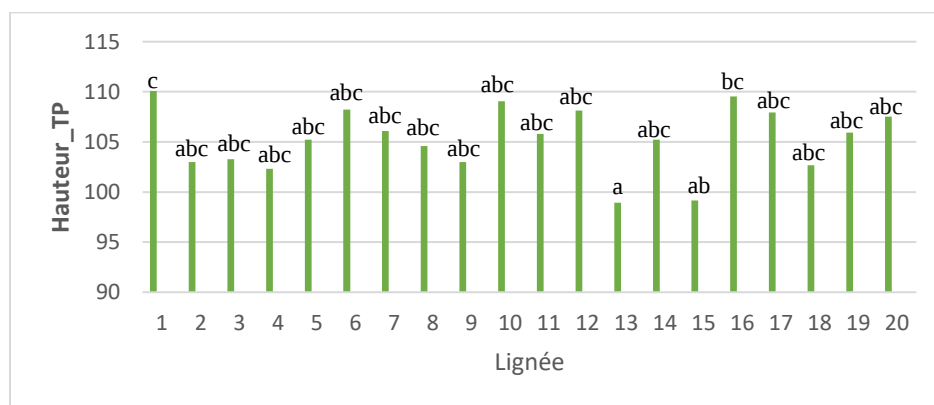


Figure 15 : Variation de la hauteur en fonction des lignées

La comparaison des moyennes (Student-Newman-Keuls) a permis de mettre en évidence 3 sous-groupes a, b et c (figure 15). Il est à noter que le 3^{ème} sous-groupe « c » qui a la hauteur la plus élevée est constitué uniquement de la lignée 1. Les groupes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différents à alpha à 5%. D'après la figure, La hauteur de la tige principale chez les lignées testées varie entre 98.9 et 110 cm avec une moyenne de 103 cm. Les lignées 1, 16 et 10 ont montré des hauteurs plus élevées par rapport à celles des autres lignées testées. Ces dernières sont suivies des lignées 6, 12 et 17 allant jusqu'au 108 cm et qui dépassent les deux témoins 19 et 20. Les lignées 13 et 15 possèdent les hauteurs les plus basses.

2. Nombre de tiges secondaires

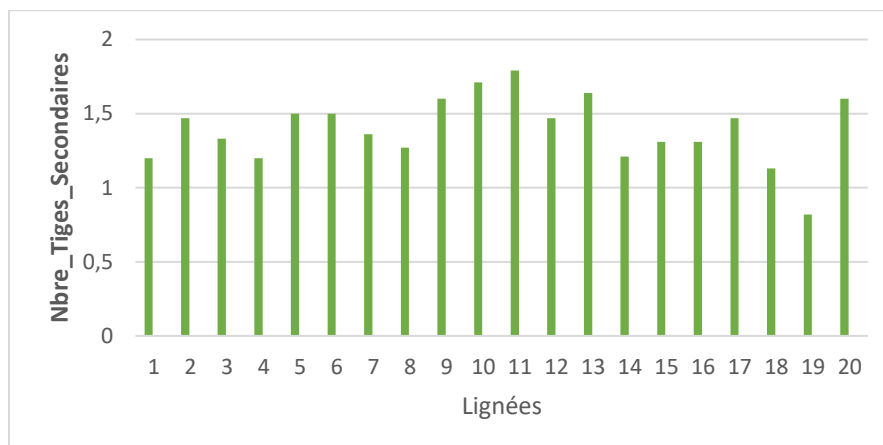


Figure 16 : Variation de nombre de tiges secondaires en fonction des lignées

D'après la figure, Le nombre de tiges par plante varie bien entre les lignées testées : 0,87 à 1,79 tiges par plante. Contrairement à l'essai élite 1, ces lignées ne dépassent pas 1,8 tiges par plante. Les lignées 11 et 10 possèdent plus de tiges secondaires par rapport aux autres lignées testées.

3. Nombre de nœuds fructifères par tige principale

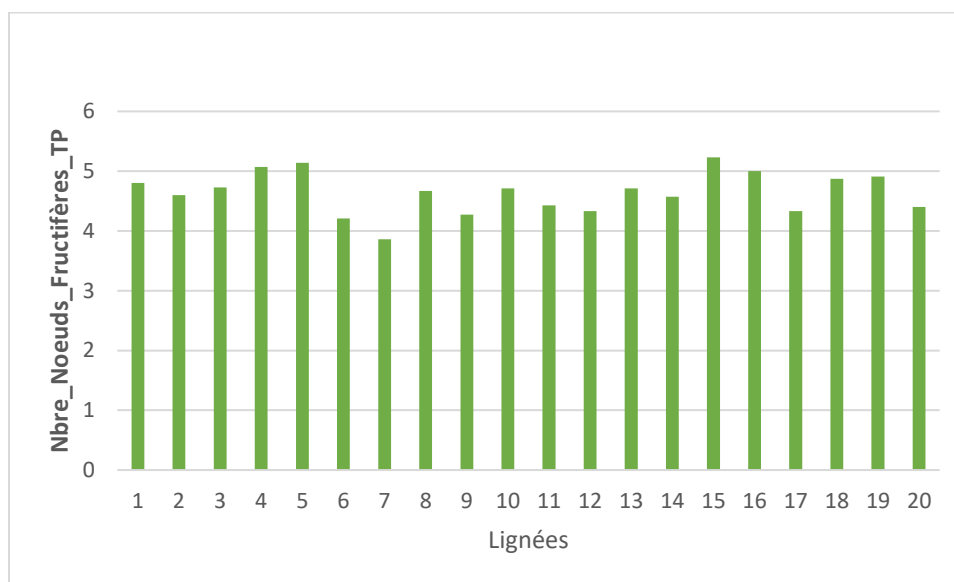


Figure 17 : Variation du nombre de nœuds fructifères par tige principale

Nous avons remarqué, pour la figure 17, que le nombre de nœuds fructifères par tige principale varie entre 3,86 et 5,23. La lignée 15 a produit le maximum de nœuds fructifères par tige principale. Alors que le minimum de nœuds fructifères a été réalisé par la lignée 7.

4. Nombre de gousses par tige principale

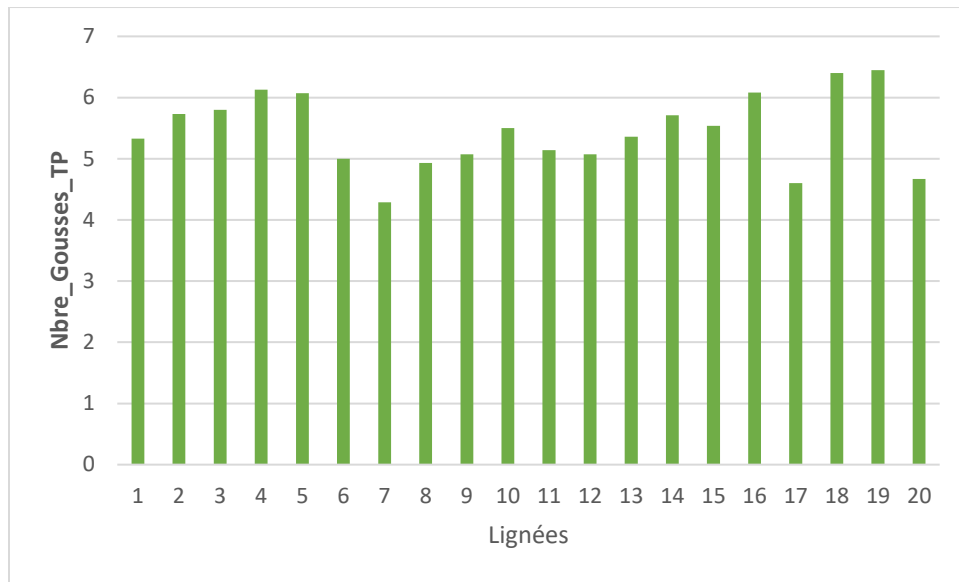


Figure 18 : Variation du nombre de gousses par tige principale en fonction des lignées.

Nous avons constaté, de la figure 18, que le nombre de gousses par tige principale varie entre 4,29 et 6,45. Suivies des lignées 4, 16 et 5, les lignées 19 et 18 ont données le maximum de gousses par tige principale. Alors que la lignée 7 a produit moins de gousses par tige principale.

5. Nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires

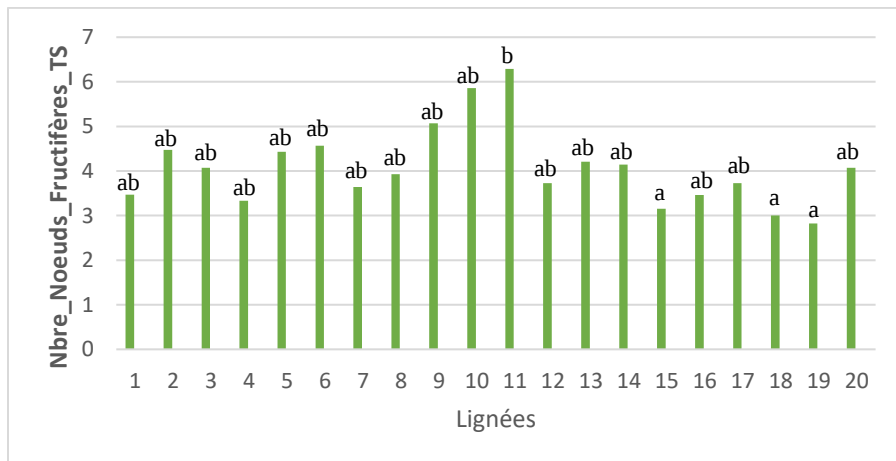


Figure 19 : Variation du nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires

D'après la figure 19, nous distinguons que le nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires varie entre 2,82 et 6,29. La lignée 11 a donné le maximum de nœuds fructifères par tiges secondaires. Le minimum a été produit par les lignées 18 et 19.

Nous notons que la lignée 11 représente uniquement le 2^{ème} sous-groupe « b ». Alors que le 1^{er} sous-groupe « a » est représenté par les lignées 19, 18 et 15 qui ont données respectivement moins de nœuds fructifères par tiges secondaires. La lignée 15 a produit le maximum de nœuds fructifères par tige principale.

6. Nombre de gousses par tiges secondaires

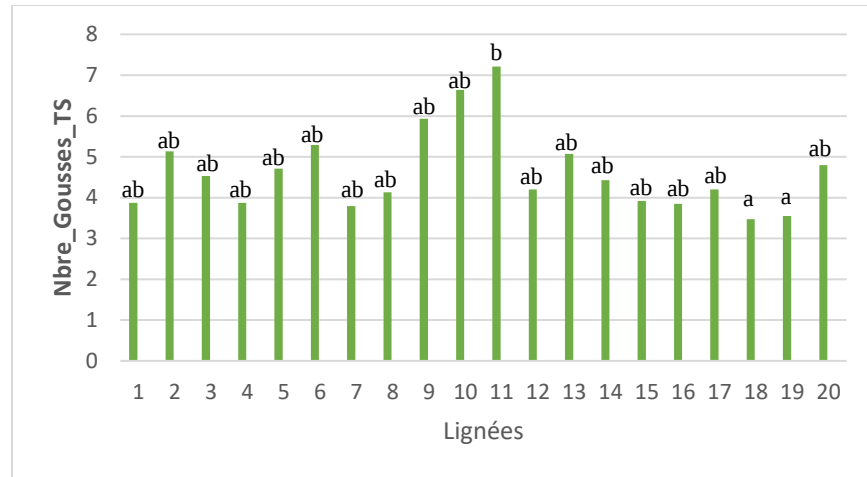


Figure 20 : Variation du nombre de gousses par tiges secondaires en fonction des lignées.

D'après la figure 20, nous avons constaté que les lignées 18 et 19 ont produit le minimum de gousses par tiges secondaires. Nous avons noté que la lignée 11 a produit le maximum de gousses par tiges secondaires, sachant qu'elle a produit le maximum de nœuds fructifères par tiges secondaires. Le 1^{er} sous-groupe « a » comprend les deux témoins. Tandis que le 2^{ème} sous-groupe est représenté par la lignée 11.

7. Nombre de graines par tige principale

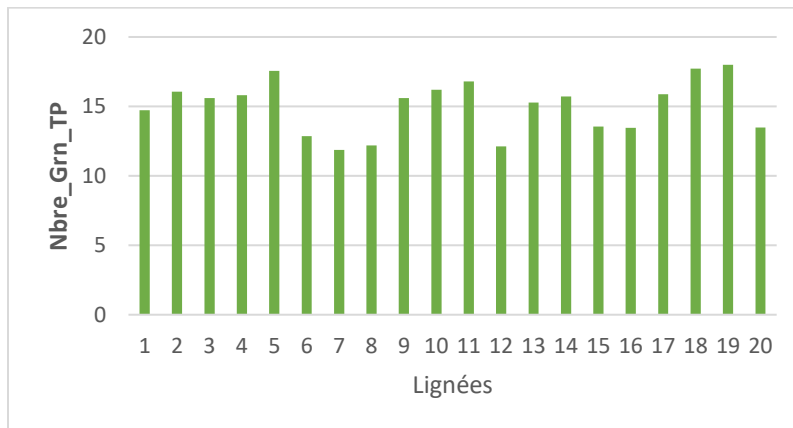


Figure 21 : Variation du nombre de graines par tige principale en fonction des lignées.

La figure 21, montre que le nombre de graines par tige principale est compris entre 11,86 et 18. Nous avons remarqué que les lignées témoins 18, 19 et 5 ont données le maximum de graines par tige principale. Sachant que les lignées 18 et 19 ont produit le maximum de gousses par tige principale au niveau de l'essai élite 2. La lignée 7 a donné le minimum de graines par tige principale puisqu'elle a produit moins de gousses par tige principale.

8. Poids total de graines par tige principale

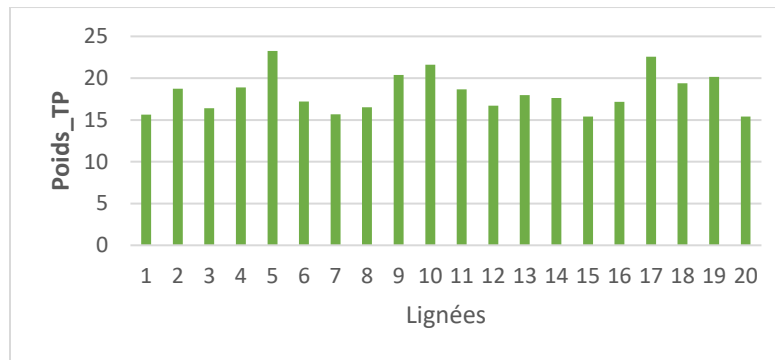


Figure 22 : Variation du poids total des graines au niveau de la tige principale.

La figure 22 montre que le poids total de graines par tige principale est compris entre 15,41 et 23,27g. La lignée 5 présente le poids total de graines le plus élevé. Cette dernière a avoisiné le témoin 18 en termes de nombre de graines par tige principale. Toutes les lignées ont dépassé les 15g. les lignées 15, 20, 1 et 7 ont montré les poids minimaux parmi les lignées testées.

9. Nombre de graines par tiges secondaires

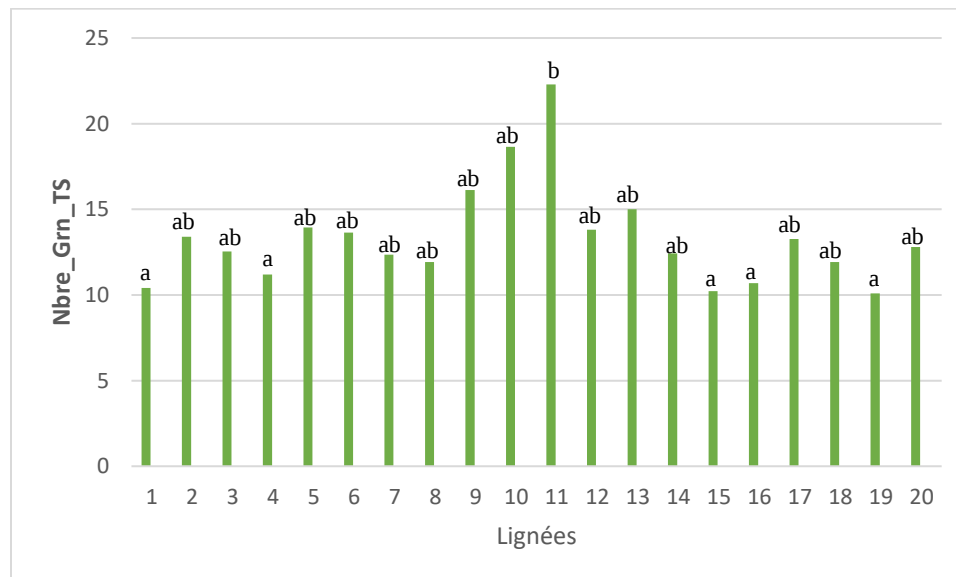


Figure 23 : Variation du nombre de graines par tiges secondaires en fonction des lignées.

Le nombre de graines par tiges secondaires varie entre 10,09 et 22,29. Nous remarquons que les lignées 11 et 10 ont produit le maximum de graines par tiges secondaires. La lignée témoin 19 a produit le minimum de graines par tiges secondaires.

Il est à noter que la lignée 10 suivi du 11 ont produit le maximum de gousses par tiges secondaires, sachant qu'elles ont produit le maximum de nœuds fructifères par tiges secondaires. Ainsi, La lignée 19 a réalisé moins de nœuds fructifères par tiges secondaires bien que la lignée 18, alors elle a produit moins de gousses par tiges secondaires.

10. Poids total de graines par tiges secondaires

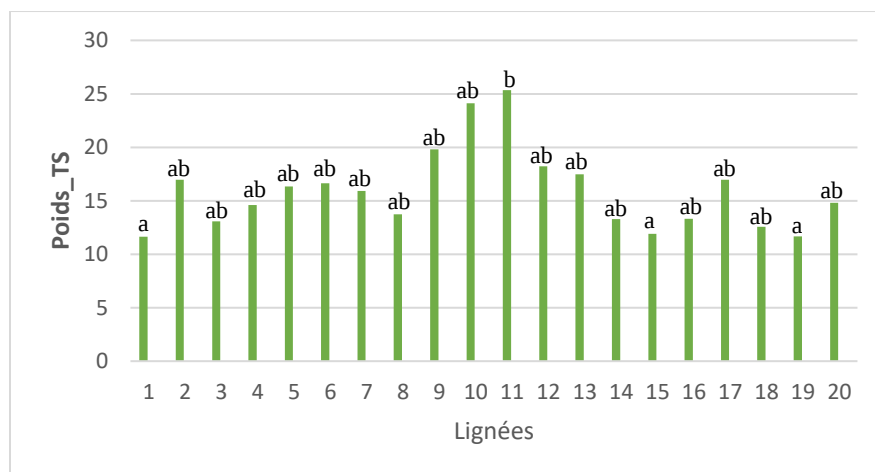


Figure 24 : Variation du poids total des graines au niveau de la tiges secondaires en fonction des lignées.

La figure 24 montre que le poids total de graines par tiges secondaires est compris entre 11,65 et 25,35g. Le groupe « a » représenté par les lignées 1, 15 et 19 vient en dernier par des poids situés entre 11.65 et 11,91g. Alors que le groupe « b » reste en premier par un poids marquant de 25,35g. Nous remarquons que Le 1^{er} sous-groupe « a » reste instable en termes de chiffres au niveau des tiges secondaires. Cependant, le 2^{ème} sous-groupe « b » montre des performances élevées.

11. Rendement par plante

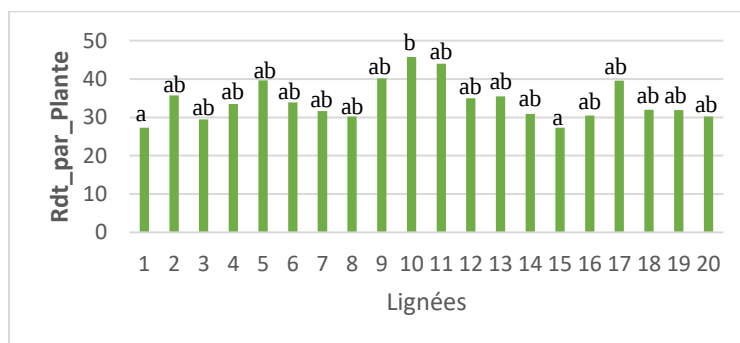


Figure 25 : Rendement par plante en fonction des lignées

D'après la figure 25, nous remarquons que le rendement par plante est compris entre 27,29 et 45,71. La lignée 10 a un rendement élevé par rapport aux autres lignées et aux témoin 19 et 20. Alors qu'elle est avoisinée par la lignée 11. Notons que la lignée 1 vient en dernier donnant un rendement faible.

Corrélations partielles entre les composantes du rendement

Tableau 6 : Corrélation partielle entre les composantes du rendement.

	Nbre Tiges Secondaires	Nbre Nœuds Fructifères TP	Nbre Gousses TP	Nbre Nœuds Fructifères TS	Nbre Gousses TS	Nbre Grn TP	Poids TP	Nbre Grn TS	Poids TS
Hauteur TP	0,001	0,061	0,014	0,061	0,023	0,012	0,108	0,020	0,072
Nbre Tiges Secondaires		-0,035	-0,065	0,651**	0,634**	-0,052	0,035	0,580**	0,586**
Nbre Nœuds Fructifères TP			0,862**	0,133*	0,154**	0,698**	0,544**	0,138*	0,105
Nbre Gousses TP				0,134*	0,183**	0,775**	0,599**	0,157**	0,118*
Nbre Nœuds Fructifères TS					0,948**	0,155**	0,186**	0,850**	0,815**
Nbre Gousses TS						0,173**	0,204**	0,879**	0,834**
Nbre Grn TP							0,771**	0,215**	0,181**
Poids TP								0,238**	0,318**
Nbre Grn TS									0,927**

L'analyse des corrélations partielles (Tableau 6) nous permet de tirer le point suivant :

La hauteur n'est pas corrélée avec les composantes de rendement.

La plupart des caractères sont positivement corrélés deux à deux au niveau de $\alpha = 0,01$ et $\alpha = 0,05$.

Le nombre de tiges secondaires ne présente aucune corrélation significative entre (Nbre de Nœuds Fruct TP, Nbre de Gousses TP, Nbre de Graines TP et le Poids TP). Aussi, le même cas entre le nombre de nœuds fructifères TP et poids TS.

II- Régression linéaire entre les composantes de rendement

Vu que toutes données, à l'exception du nombre de tige, présentent une tendance linéaire avec le rendement, nous avons opté pour la régression linéaire multiple. (Figure 26)

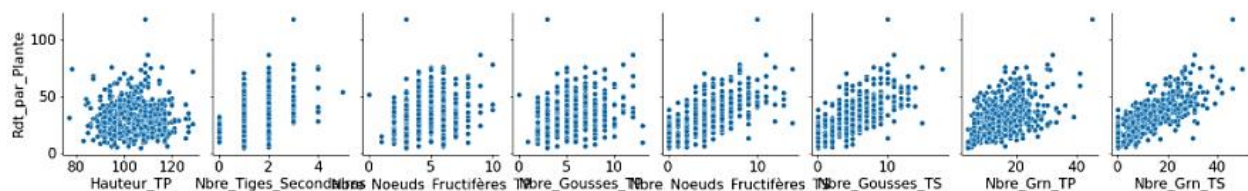


Figure 26 : Diagrammes de distribution des différents paramètres relativement au rendement

Nous avons opté pour construire un modèle de régression linéaire multiple entre le rendement en fonction de la hauteur TP, nombre de tiges secondaires, nombre de nœuds fructifères par TP, nombre de gousses TP, nombre de nœuds fructifères TS, nombre de gousses TS, nombre de graines TP, nombre de graines TS. (Modèle de départ) (Tableau 7)

D'abord nous avons testé le modèle de la régression linéaire multiple incluant tous les caractères cités ci-dessus. Puis nous éliminons la variable qui a la plus grande valeur p relative à t de Student.

Dans ce cas, il s'agit d'éliminer le Nbre_Noeuds_Fructifères_TS. Nous procédons de la sorte jusqu'à ce que toutes les variables aient toutes une valeur p significative (<0,05).

Ainsi, nous avons obtenu le modèle final incluant la Hauteur TP, le nombre de tiges secondaires, le nombre de graines TP, le nombre de graines TS. (Tableau 8)

Tableau 7 : Résultat de la régression linéaire multiple du modèle de départ

	<i>coef</i>	<i>std err</i>	<i>t</i>	<i>P> t </i>
Const	-9,0461	4,051	-2,233	0,026
Hauteur_TP	0,1204	0,037	3,292	0,001
Nbre_Tiges_Secondaires	1,144	0,559	2,047	0,041
Nbre_Noeuds_Fructifères_TP	0,3076	0,404	0,761	0,447
Nbre_Gousses_TP	-0,4381	0,329	-1,33	0,184
Nbre_Noeuds_Fructifères_TS	0,0467	0,414	0,113	0,910¹
Nbre_Gousses_TS	0,1074	0,388	0,277	0,782
Nbre_Grn_TP	0,9608	0,071	13,614	0,000
Nbre_Grn_TS	0,973	0,078	12,548	0,000

Tableau 8 : Résultat de la régression linéaire multiple du modèle final

	<i>coef</i>	<i>std err</i>	<i>t</i>	<i>P> t </i>
Const	-9,8058	4,004	-2,449	0,015
Hauteur_TP	0,1261	0,036	3,491	0,001
Nbre_Tiges_Secondaires	1,3183	0,524	2,518	0,012
Nbre_Grn_TP	0,9050	0,049	18,414	0,000
Nbre_Grn_TS	1,0097	0,043	23,273	0,000

Ainsi, l'équation de régression linéaire multiple est :

$$Y = -9,8058 + 0,1261 \text{ HTP} + 1,3183 \text{ NTS} + 0,9050 \text{ NGTP} + 1,0097 \text{ NGTS}$$

- **HTP** : Hauteur de la tige principale **NGTP** : Nbre de graines par tige principale
- **NTS** : Nombre de tiges secondaires **NGTS** : Nbre de graines par tiges secondaires

✚ Avec $R^2 = 0,723$; notre modèle retenu explique 72% de la variabilité du rendement par plante.

- ✓ Jafarnadeh , Scheikh et Souldani (2017) ont travaillé sur quelques paramètres de la plante *Vicia faba* L. (jour de l'émergence, jour de floraison, hauteur de la plante, nombre de gousses par plante, nombre de graines par gousses) liées au rendement en graines, utilisant des modèles de régression. Ils ont trouvé la droite de régression suivante :

$$Y=1216,83 + 20,47 \text{ R1} + 20,58 \text{ PH} + 19,79 \text{ NPP} + 145,51 \text{ NSP}$$

- ❖ Y : rendement en grains en kilogrammes par hectare
- ❖ R1 : nombre de jour jusqu'à floraison
- ❖ PH : hauteur de la plante
- ❖ NPP : nombre de gousses par plante
- ❖ NSP : nombre de graines par gousses

- ✓ Moussamih (2018) a choisi un modèle comprenant le nombre de graine par plante, nombre de gousses totales, nombre de nœuds fructifères/plante.

Leur modèle de régression retenu est significatif : $F(3, 286) = 235,41$, $p < 0,001$, $R^2 = 0,712$. Ainsi, l'équation de régression linéaire multiple est :

$$Y=0,880+0,796 \text{ Nb de gr par pte} - 0,726 \text{ Nb de gs totale} + 0,663 \text{ Nb de nds fruct par pte}$$

Avec :

- ❖ Nb de gr par pte : nombre de graines par plante
- ❖ Nb de gs totale : nombre de gousses totales
- ❖ Nb de nds fruct par pte : nombre de nœuds fructifères par plante.

Comparant les différents modèles mentionnés avec notre modèle, la hauteur de la plante et le nombre de graines ont été aussi trouvé comme composantes de rendement du modèle de régression développé par Jafarnadeh et *al.*(2017). Sauf que la hauteur de la plante n'a pas été significatif pour le modèle de régression développé par Moussamih (2018).

Vérification des hypothèses du modèle de régression retenu

1- La variance résiduelle doit être constante :

Pour que le modèle soit valable, il faut que quand le rendement prédit standardisé augmente, la variance des résiduelles standardisées doit rester constante.

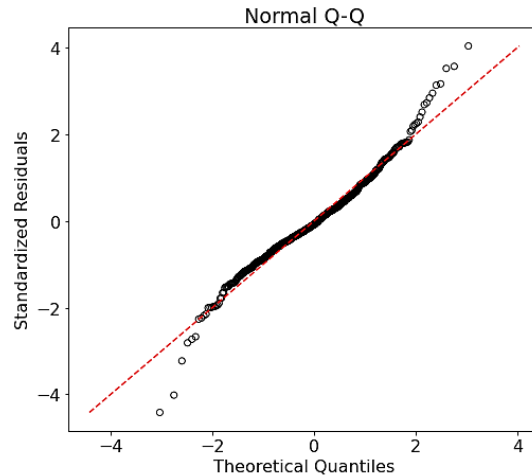


Figure 27 : Diagramme de dispersion des résiduelles standardisées en fonction du rendement prédit standardisé

2- La valeur des résiduelles doit suivre une distribution normale.

La figure 28 nous montre que les valeurs résiduelles standardisées suivent une distribution normale.

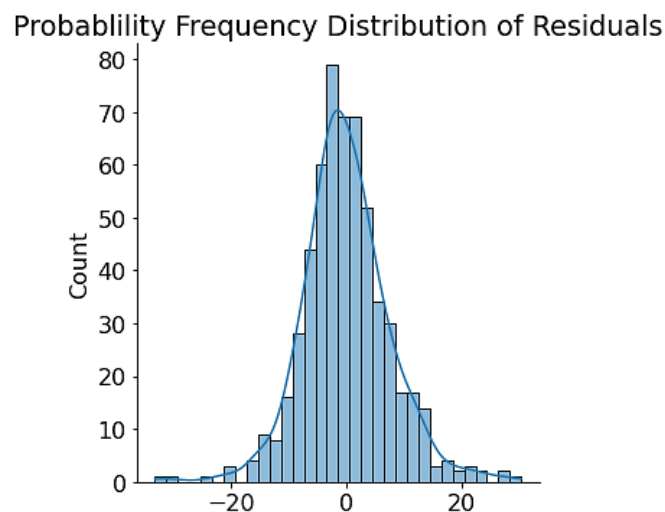


Figure 28 : Distribution de fréquence des valeurs résiduelles standardisées

✚ Ainsi, ces deux conditions étant satisfaites, le modèle retenu est validé.

1.1. Test de validité du modèle

La première phase de l'analyse statistique du modèle de cheminement est le test de validité du modèle postulé. Un ajustement acceptable du modèle est indiqué par une valeur de CFI (Comparative Fit Index ou Indice d'ajustement comparatif) supérieure ou égale à 0,90. Suite à la vérification de cet indicateur ou paramètre : **CFI = 0,989**, le modèle postulé dans la présente étude est bien accepté.

1.2. Flux de causalité entre les différentes variables

Après vérification de la validité du modèle, nous avons calculé les coefficients standardisés (H1 à H17), ainsi que les coefficients de détermination R^2 . Le nouveau diagramme obtenu correspond à la figure 30.

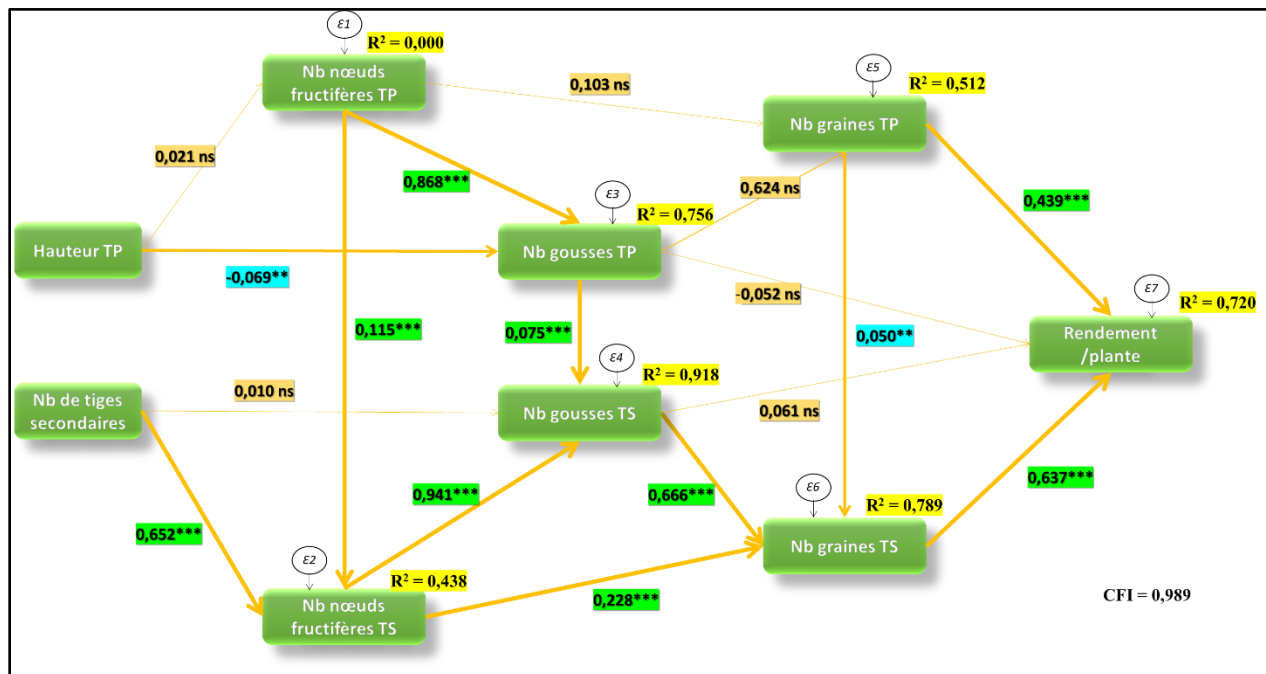


Figure 30 : Modèle postulé pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez *Vicia faba* L.

(CFI : Indice d'ajustement comparatif ; R^2 : coefficients de détermination ; *** : Flux de causalité très hautement significatif ; ** : Flux de causalité hautement significatif ; ns : Flux de causalité non significatifs).

Le diagramme Path analysis (Figure 30), établi après le calcul des coefficients standardisés (H1 à H17), et des coefficients de détermination R^2 , nous permet d'estimer la significativité des flux de causalité entre différentes variables.

1.2.1. Effet direct très hautement significatif

- **Le nombre de graines par tige principale et secondaire** ont un effet direct positif très hautement significatif sur le **rendement par plante** respectivement de ($H16 = 0,439^{***}$ et $H17 = 0,637^{***}$). Ces résultats corroborent ceux obtenus par Ajana (2020). Ils ont trouvé que Le nombre de graines par plante a un effet direct positif très hautement significatif ($H10 = 0,89^{***}$) sur le rendement par plante. Contrairement aux résultats de Ben Mbarek et al. (2012) dans leur étude sur le pois chiche Kabuli, que le nombre de graines/m² a un effet direct négatif très hautement significatif ($- 0,47^{***}$) sur le rendement par plante.
- **Le nombre de nœuds fructifères TS et le nombre de gousses TS** ont un effet direct positif très hautement significatif sur **nombre de graines TS** respectivement de ($H9 = 0,228^{***}$ et $H13 = 0,666^{***}$).
- **Le nombre de nœuds fructifères TS et le nombre de gousses TP** ont également un effet direct positif très hautement significatif sur le **nombre de gousses TS** respectivement de ($H10 = 0,075^{***}$ et $H8 = 0,941^{***}$).
- **Le nombre de nœuds fructifères TP** a un effet positif très hautement significatif sur le **nombre de gousses TP** ($H7 = 0,868^{***}$). Ainsi que sur le **nombre de nœuds fructifères TS** ($H5 = 0,115^{***}$).
- En fin, le **nombre de tiges secondaires** a un effet direct positif très hautement significatif sur le **nombre de nœuds fructifères TS** ($H4 = 0,652^{***}$).

1.2.2. Effet direct hautement significatif

La **hauteur TP** a un effet direct négatif hautement significatif sur le **nombre de gousses TP** ($H2 = -0,069^{**}$). Cependant, le **nombre de graines TP** a un effet positif hautement significatif sur le **nombre graines TS** ($H15 = 0,050^{**}$).

1.2.3. Effet direct non significatif

Notre travail a pu mettre en évidence des effets de causalité non significatifs entre :

- ❖ La hauteur et le nombre de nœuds fructifères TP ($H1 = 0,021$ ns).
- ❖ Le nombre de tiges secondaires et le nombre de gousses TS ($H3 = 0,010$ ns).
- ❖ Le nombre de nœuds fructifères TP et le nombre de graines TP ($H6 = 0,103$ ns).
- ❖ Le nombre de gousses TP et le nombre de graines TP ($H11 = 0,624$ ns).
- ❖ Le nombre de gousses TP et le rendement par plante ($H12 = -0,052$ ns).
- ❖ Le nombre de gousses TS et le rendement par plante ($H14 = 0,061$).

Le coefficient de détermination R^2 est le rapport de la variance expliquée par le modèle, sur la variance totale. Ce coefficient nous permet de déterminer à quel point le modèle est adapté pour décrire la distribution. Le coefficient de détermination de la variable rendement par plante ($R^2 = 0,72$), nous permet d'affirmer que la causalité entre, d'une part, le nombre de nœuds fructifères TP, le nombre de nœuds fructifères TS, le nombre de gousses TP et le nombre de gousses TS, le

nombre de graines TP et le nombre de graines TS et le rendement par plante d'autre part, explique 72 % de la variabilité totale dans notre expérimentation.

Le nombre de gousses TS ($R^2 = 0,918$) permet d'expliquer 91,8 % de la variabilité du nombre de graines TS. En dépit de l'absence d'un flux de causalité significatif entre le nombre de nœuds fructifères TP et le nombre de gousses TP par plante vis-à-vis du nombre de graines TP, les deux facteurs (le nombre de nœuds fructifères TP et le nombre de gousses TP) ont expliqué une part assez importante de la variabilité ($R^2 = 0,512$).

2. Analyse et interprétation de la médiation

En plus du flux de causalité direct entre les variables : nombre de graines TP, nombre de graines TS, d'une part ; et entre ces deux variables sur le rendement par plante, nous avons aussi observé l'influence indirecte de ces paramètres mesurés entre eux et sur le rendement. Ainsi, pour une modélisation du rendement en relation avec ses paramètres par le biais de l'analyse du cheminement (Path analysis), il est très important de prendre en compte non seulement les effets de causalité directs mais aussi les effets de causalité indirects par le biais de médiateurs. En d'autres termes, l'effet total est la résultante des effets directs et des effets indirects.

$$\text{Effet total} = \text{Effets directs} + \text{Effets indirects}$$

Afin de bien caractériser ces médiateurs, nous allons tester si cette médiation, quand elle existe, est totale ou partielle. Cette analyse nous permettra une caractérisation détaillée des relations de notre modèle. À cet effet, et à partir du diagramme de cheminement adopté (Figure 30), nous allons tester les différentes hypothèses par l'intermédiaire du logiciel-R.

1- Médiation 1

Le nombre de graines TS est un médiateur entre le nombre graines TP et rendement (Figure 31).

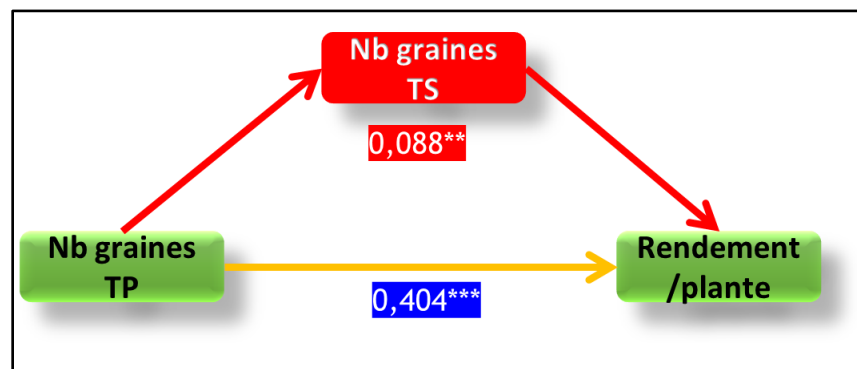


Figure 31 : Analyse du cheminement du nombre de graines TP sur le Rendement par plante via le médiateur nombre de graines TS.

Nous constatons, d'une part, que, le nombre de graines TP a un effet direct très hautement significatif sur le rendement non seulement à travers le médiateur nombre de graines TS (0,404***), mais aussi sans ce médiateur (0,492***). D'autre part, ce nombre de graines TP a un effet indirect hautement significatif sur le rendement (0,088**). À cet effet, la médiation est une **médiation partielle** (Tableau 9).

2- Médiation 2

Le nombre de gousses TS est un médiateur entre le nombre de nœuds fructifères TS et nombre de graines TS (Figure 32).

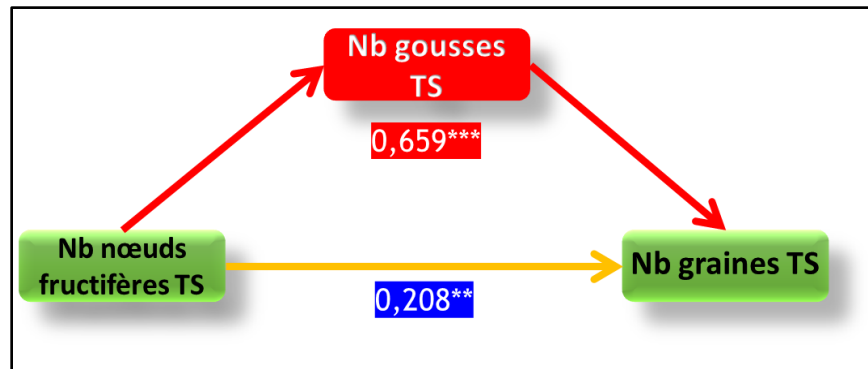


Figure 32 : Analyse du cheminement du nombre de nœuds fructifères TS sur le nombre de graines TS via le médiateur nombre de gousses TS.

Le nombre de nœuds fructifères TS a un effet direct très hautement significatif sur le nombre de graines TS non seulement à travers le médiateur nombre de gousses TS (0,208**), mais aussi sans ce médiateur (0,866***) d'un côté. D'un autre côté, il a un effet indirect très hautement significatif sur le nombre graines TS (0,659***). A cet effet, la médiation est une **médiation partielle** (Tableau 9).

Tableau 9 : Effets directs ou indirects et type de médiation du Path analysis pour le rendement de la fève et ses composantes

Hypothèse	Effet direct sans médiateur	Effet direct avec médiateur	Effet indirect	Type de médiation
1	0,492***	0,404***	0,088**	Partielle
2	0,866***	0,208**	0,659***	Partielle

3. Modèle final de la médiation Path analysis du rendement

Le modèle final de la médiation Path analysis retenu (Figure 33) est obtenu après élimination des chemin non significatifs. En comparant, les coefficients standardisés (H_i) du modèle initial (Figure 29) avec le modèle final retenu (Figure 33), nous constatons qu'il n'y a pas de changement significatif au niveau de ces coefficients. C'est le cas, également, pour les coefficients de détermination R^2 . Ce modèle final est considéré aussi comme valide, suite à une vérification du CFI qui est dans les normes : **CFI = 0,987**.

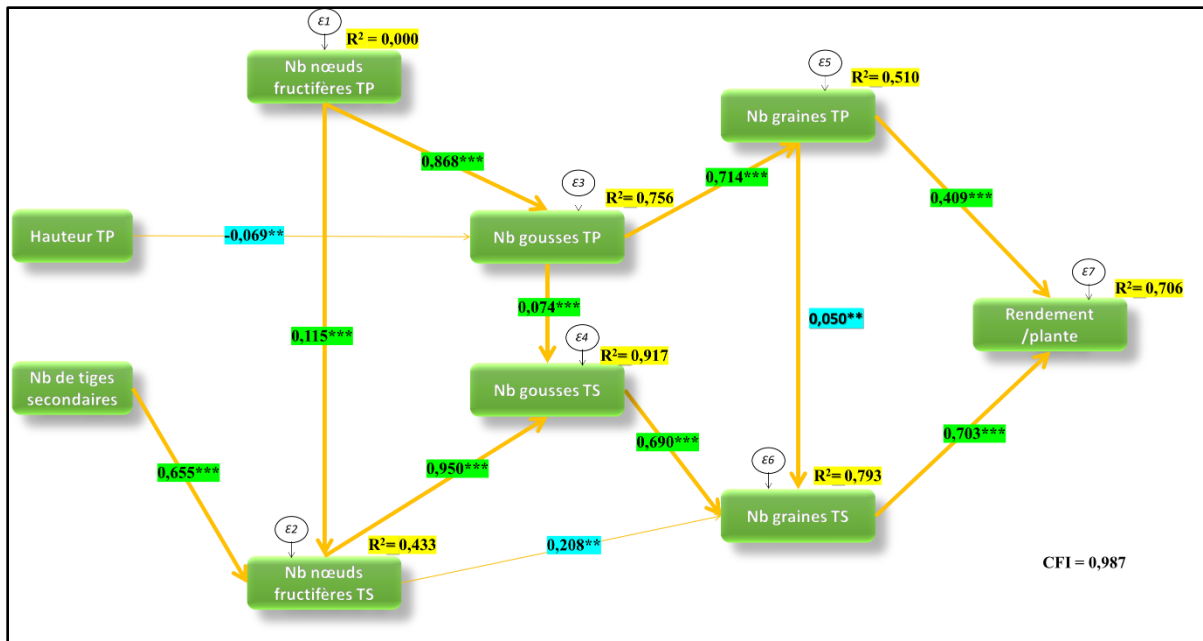


Figure 33 : Modèle final du Path analysis du rendement et ses composantes chez *Vicia faba* L.

À partir du modèle final (Figure 33), nous pouvons constater :

- ❖ Un flux de causalité direct très hautement significatif du nombre de graines TP et du nombre de graines TS sur le rendement par plante.
- ❖ Un flux de causalité indirect hautement significatif de nombre graines TP sur le rendement par plante via le nombre de graines TS.
- ❖ Un flux de causalité indirect très hautement significatif du nombre de nœuds fructifères TS sur le nombre de graines TS par le biais de médiateur nombre de gousses TS.
- ❖ Un flux de causalité indirect du nombre de nœuds fructifères TP sur le nombre de graines TP via le médiateur nombre de gousses TP.
- ❖ Un flux de causalité indirect du nombre de nœuds fructifères TP sur le nombre de gousses TS par le biais des médiateurs nombre de gousses TP et nombre nœuds fructifères TS.
- ❖ Un flux de causalité indirect du nombre de tiges secondaires le nombre de gousses TS à travers le médiateur nombre de nœuds fructifères TS.
- ❖ Sans oublier l'effet indirect de la hauteur TP sur le nombre de gousses TS à travers le nombre de gousses TP. Ainsi que l'effet direct hautement significatif du nombre de nœuds fructifères TS sur le nombre de graines TS et par conséquent sur le rendement.

Enfin et sur la base de l'analyse du modèle de cheminement illustré à la figure 33, nous avons constaté, que les facteurs directs les plus importants déterminant le rendement par plante de *Vicia faba* L., expliquent 71% de la variabilité totale, et sont :

- ❖ **Nombre de graines TP**
- ❖ **Nombre de graines TS**

Alors que les facteurs indirects les plus importants qui agissent significativement sur le rendement sont les suivants :

- ❖ **La Hauteur TP** qui influe négativement le nombre de gousses TP en faveur de la formation des gousses TS d'une part, et qui agit sur le nombre de graines TP à travers le nombre de gousse TP et donc sur le rendement en d'autre part.
- ❖ **Le nombre de tiges secondaires** qui appui très significativement la production de graines TS directement à travers le nombre de nœuds fructifères TS et fortement indirect par le biais du médiateur nombre de gousses TS.

Ces résultats confirment ceux obtenus par la régression linéaire multiple, dont le coefficient de variabilité R^2 est presque le même pour les deux méthodes utilisées. Les variables clés dans la détermination du rendement sont identiques. Sauf que le Path Analysis permet de zoomer grand sur les interactions entre les différents caractères à travers les flux des causalités qui représentent eux-mêmes des régressions. Et donc au lieu d'avoir un modèle qui permet d'en tirer que les caractères significatifs, l'analyse de cheminement offre l'opportunité de savoir exactement les liens à travers lesquels le rendement est alimenté, ainsi que leur degré d'influence ou d'impact.

Selon le modèle descendant (*Backward*), et le modèle final du Path Analysis du rendement nous pouvons donc tire que le nombre de graines par TP, le nombre de graines par TS ; le nombre de tiges secondaires et la hauteur TP constituent les principaux caractères dont le sélectionneur doit tenir compte dans l'objectif d'amélioration le rendement de *Vicia faba* L.

La présente étude, conduite au niveau du domaine expérimental de Douyet (Institut National de la Recherche Agronomique « INRA », Laboratoire d'Amélioration de la fève et de la féverole), en vue de modéliser le rendement en relation avec ses composantes, par le biais des modèles de régression linéaire multiple et l'analyse du cheminement (Path analysis) chez 40 lignées testées de *Vicia faba* L.

Les résultats de l'ANOVA sur l'essai élite 1 ont montré que les 20 lignées se différencient très significativement par la hauteur TP. Ainsi que par le nombre de gousses TP et le nombre de graines TP avec une différence hautement significative suivies du (Nbre de tiges secondaires, Nbre de nœuds fructifères TP et le poids TP). Dans cet essai, la lignée 6 a marqué un rendement très élevé en dépassant le témoin 19. Cette dernière a dominé presque tous les paramètres de la tige principale à l'exception de la hauteur. Contrairement à la lignée 6 qui a dominé tous les paramètres étudiés des tiges secondaires.

Autrement, l'analyse de la variance étudiée pour les composantes de rendement chez l'essai élite 2 a permis de marquer des différences hautement significatives par la hauteur TP, le nombre de nœuds fructifères TS et le poids TS suivies du (Nbre de gousses TS et Nbre de graines TS). Tous les paramètres des tiges secondaires ont été dominés respectivement par les lignées 11, 10 et 9. Alors que la lignée 10 a réalisé le rendement le plus élevé. L'analyse des corrélations partielles pour chaque essai a confirmé ses résultats par l'absence d'une corrélation significative entre la hauteur et les composantes de rendement.

Nous avons opté pour construire un modèle de régression linéaire multiple entre le rendement d'une part et la hauteur TP, nombre de tiges secondaires, nombre de nœuds fructifères par TP, nombre de gousses TP, nombre de nœuds fructifères TS, nombre de gousses TS, nombre de graines TP, nombre de graines TS d'autre part. Grâce à la méthode descendante nous avons pu retenir le modèle incluant la Hauteur TP, le nombre de tiges secondaires, le nombre de graines TP, le nombre de graines TS. Nous avons vérifié la validité de ce modèle notamment par la distribution normale des résiduelles et la constance de la variance résiduelle.

Encore, Les résultats de ce travail montrent que notre modèle final postulé pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez *Vicia faba* L. est bien validé, suite à une vérification du paramètre CFI.

Le calcul des coefficients standardisés dans le modèle final, nous mène à déterminer en premier lieu, les variables ayant un effet direct très hautement significatif sur le rendement par plante. À savoir, le nombre de graines TP, le nombre de graines TS. En deuxième lieu, le nombre de gousses par TP et par TS, le nombre de nœuds fructifères par TP et par TS, le nombre de tiges secondaires constituent les variables ayant un effet indirect très hautement significatif sur le rendement par plante. Finalement, la hauteur TP est la variable présentant un effet indirect hautement significative sur le rendement par plante.

L'analyse du modèle postulé indique, un flux de causalité direct très hautement significatif du nombre de graines par TP et du nombre de graines par TS sur le rendement par plante. Nous constatons donc que ces deux variables ont une influence directe et décisive sur le rendement par plante expliquant 72% de la variabilité totale.

En plus, nous observons un flux de causalité indirect du nombre de nœuds fructifères TP sur le rendement par plante via le nombre de gousses TP d'un côté. Et d'un autre côté, un flux de causalité indirect du nombre de tiges secondaires sur le rendement par le biais des médiateurs nombre de nœuds fructifères TS et nombre de graines TS. Ainsi, la hauteur a une influence indirecte sur le rendement par plante. À cet effet, nous pouvons conclure que le nombre de graines par TP et par TS, constituent les principaux caractères dont le sélectionneur doit tenir compte dans l'objectif de l'amélioration du rendement de *Vicia faba* L. Notons également que la hauteur et le nombre de tiges secondaires ont une empreinte non négligeable sur le rendement par plante de la fève. Par conséquent, ces deux composantes peuvent également être adoptées pour l'amélioration du rendement chez la fève. Pour conclure, la modélisation du rendement de *Vicia faba* L. par le biais de l'analyse du cheminement (Path analysis) est une voie prometteuse dans le programme de sélection des variétés de fève et de féverole à haut potentiel de rendement, stables et tolérantes aux principaux stress biotiques et abiotiques. De plus, elle a un effet positif sur l'amélioration du rendement par la détermination des flux de causalité entre le rendement et ses composantes. Enfin, le présent travail montre, qu'en général, les modèles statistiques offrent plusieurs avantages à titre d'exemple aider les améliorateurs à prendre une bonne décision, classer correctement une gamme de scénarios techniques testés, identifier celui qui donne les meilleurs résultats, et prédire la qualité et la quantité de certaines paramètres.

Il est recommandé de conduire les mêmes expérimentations sur les fèves et féveroles séparément.

Ajana G. 2020. Modélisation par Path Analysis : Illustration avec les paramètres de rendement chez *Vicia faba* L. PFE Master Gestion et Conservation de la Biodiversité. FST de Fès.

Alaoui S. B. 2009. Référentiel pour la Conduite Technique de la fève (*Vicia faba* L). 92101.

Bennett, R. E. 1976. *THE STUDY AND EVALUATION OF PROTEINS FROM CHICKPEA (CICER ARIETINUM, L.) AND HORSE BEAN (VICIA FABA, L.) FLOURS.* Kansas State University ; 15p.

Bhatt G.M, 1973. Significance of path coefficient analysis in determining the nature of character association. *Euphytica*, 22(2): 338-343.

Biabani A.R. & Pakniyat H, 2008. Evaluation of seed yield-related characters in sesame (*Sesamum indicum* L.) using factor and path analysis. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 11(8): 1157–1160.

Bond D.A, 1966. Yields and components of yield in diallel crosses between inbred lines of winter beans (*Vicia faba* L.). *J. agric. Sci. Cambridge*, 67: 325-336.

Bond D.A. & Lawes D.A. & Poulsen M, 1980. Broadbean (Faba Bean). In: *Hybridization of Crop Plant*, Editions, American Society of Agronomy, p 203-213.

Bond D.A., Laws D.A., Hawtin G.C., Saxena M.C. & Stephens J.H. 1985. Faba bean (*Vicia faba* L.). In: *Grain Legume Crops*. R.J. Summerfield and E.H.

Casagrande M, 2008. Évaluation 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), p 223.

Chaux C. & C. Floury. 1994. légumineuses potagères, légumes, fruits. Production légumière sec, Tome 3, *Technique et documentation Lavoisier* : 3-15.

Chitra R. & Rajamani K, 2010. Character association and path analysis in glory lily (*Gloriosa superba* L.). *Commun. Biom. Crop Sci*, 5: 78–82.

Colbach N. & Clermont-Dauphin C. & Meynard J.M, 2001. "GENESYS: a model of the influence of cropping system on gene escape from herbicide tolerant rapeseed crops to rape volunteers - II. Genetic exchanges among volunteer and cropped populations in a small region." *Agriculture Ecosystems & Environment*, 83(3): 255- 263.

Cyprien M. & Kumar V, 2011. Correlation and path coefficient analysis of rice cultivates data. *Journal of Reliability and Statistical Studies*, 4(2): 119-131.

Dajoz R., 2000 éléments d'écologie .Ed. Bordas Paris, 5^{ème} édition, 540p.

Daoui K. 2007. Recherche de stratégies d'amélioration de l'efficience d'utilisation du phosphore chez la fève (*Vicia faba* L.) dans les conditions d'agriculture pluviale au Maroc. Thèse présentée de Doctorat en Sciences agronomiques et ingénierie biologique, 215p.

- De Marco A., De Simone C., Raglione M. & Lorenzoni P. 1995.** Influence of soil characteristics on the clastogenic activity of maleic hydrazide in root tips of *Vicia faba*. *Genet. Toxicol. Environ. Mutag*, 5-12.
- De Wit C.T, 1978.** Introduction. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. C. T. de Wit. Wageningen, Centre for Agricultural Publishing and Documentation, p 1-5.
- Divya K. & Lekshmanan. & Abdul Vahab M, 2016.** Correlation and path coefficient analysis of yield and its component characters among different accessions of cluster beans [*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub. Department of Olericulture. Legume Research, 41(1): 53-56.
- 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.
- Duc G., B. Shiyang, B. Michael, R. Bob, M. Sadiki, M. Jose & M. Vishniakova 2010.** Diversity maintenance and use of *Vicia faba* L. genetic resources. *Field Crops Research* 53: 99-109.
- FAO 2021** Fao statistic. [Avantages nutritionnels des légumineuses \(fao.org\)](https://www.fao.org/nutrition/legumes/)
- FAOSTAT 2021** Available in: www.fao.org/foostat
- Fatemi Z. 1996.** Situation de la culture des fèves au Maroc, in: *Réhabilitation of faba bean*. Ed actes, Rabat Maroc, 33-38.
- Ferrara G., Loffredo E. & Senesi N. 2004.** Anticlastogenic, antitoxic and absorption effects of humic substances on the mutagen maleic hydrazide tested in leguminous plants. *Eur. J. Soil Sci.* 55: 449-458.
- Frances K. & Hasani C. & Carter A. & Amaury N, 2004.** Path Analysis: An Introduction and Analysis of a Decade of Research. *The Journal of Educational Research*, 98(1) : 15-13.
- Gepts P., W.D. Beavis, E.C. Brummer, R.C. Shoemaker & H.T. Stalker, 2005.** Legumes as a Model Plant Family. Genomics for Food and Feed Report of the Cross-Legume Advances through Genomics Conference. *Plant Physiology* 137: 1228– 1235.
- Ghobary H.M.M. & AbdAllah S.A.M, 2010.** Correlation and path coefficient studies in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *J. Plant Prod*, 9: 1233–1239.
- Gordan M.M. 2004.** Haricots secs: situation, prospective et agroalimentaires. Botanique, édition Masson, Canada, 1-7.
- Graham P.H. & Vance C.P. 2003.** Legumes: Importance and constraints to greater use.
- Jafarnodeh, S., Sheikh, F., Soltani, A. 2017.** Identification of plant characteristics related to seed yield of faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes using regression models. *Iranien journal of the science of culture*. 3 (19), 208-219.
- Kanaya N., Gill B.S., Grover I.S., Murin A., Osiecka R., Sandhu S.S. & Andersson H.C. 1994.** *Vicia faba* L, chromosomal aberration assay. *Mutat. Res.Fundam. Mol. Mech. Mutag*. 310 (2): 231-247.

Khalidi R., Zekri S., Maatougui M.E.H. & Ben Yassine A. 2002. l'économie des légumineuses alimentaires au Maghreb et dans le monde. Proceeding du 2^{ème} séminaire du réseau remafeve/remala. « le devenir des légumineuses alimentaires dans le Maghreb ». Hammamet, Tunisie, 100p.

Laamari A, 2015. Etude Données de Base des Légumineuses Alimentaires Au Maroc : Analyse de l'offre Coûts de Production et Indicateurs de Performances. L'initiative Morocco-Indienne pour le développement des légumineuses alimentaires (IMILA) : INRA Settat, p 74.

Laumonier R. 1979. Cultures légumières et maraichères, Tome III. Ed. J.B.bailliere, 276p.

Lezrek B.F. 2008. Analyse de la diversité génétique et systématique des populations naturelles tunisiennes de *Medicago Truncatula* et recherche des QTL. 245p.

López-Bellido, F. J., López-Bellido, L., & López-Bellido, R. J. (2005). Competition, growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.). *European Journal of Agronomy*, 23(4), 359-378.

Loss S.P. & Siddique K.H.M, 1997. Adaptation of faba bean (*Vicia faba* L) to dryland Mediterranean-type environments .1. Seed yield and yield components. *Field Crop Res*, 52 : 17–28.

MADRPM, 2012. L'agriculture marocaine en chiffre. Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime. [En ligne] 2012.

<http://www.agriculture.gov.ma/sites/default/files/agriculture-en-chiffres-2012.pdf>

Manggoel W. & Uguru M. & Ndam O. & Dasbak M, (2012). Genetic variability, correlation and path coefficient analysis of some yield components of ten cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp] accessions. *J. Plant Breed. Crop Sci.*, 4 : 80-86.

MAPM 2002 Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime ; l'agriculture marocaines en chiffres.

Marina A, 1992. Le secteur des légumineuses alimentaires au Maroc. Rabat : Actes Edition, 360p.

McIntosh, C. S., Smith, S. M., & Withers, R. V. (1984). Energy balance of on-farm production and extraction of vegetable oil for fuel in the United States' inland northwest. *Energy in agriculture*, 3, 155-166.

Mekhlouf A. & Bouzerzour H. & Benmahammed A. & Hadj Sahraoui A. & Harkati N, (2006). Adaptation des variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) au climat semi-aride; Sécheresse, 17 (4) : 507-13 mensuel d'information et de liaison de PNTTA, 1-4.

Mohamed, M. Beshir .1986. Responses of faba bean to sowing date at El Rahad, Sudan, FABIS Newsletter, 14: 19-22.

Mohammadi S.A. & Prasanna B.M. & Singh N.N, 2003. Sequential path model for determining interrelationships among grain yield and related characters in maize. *Crop Science*, 43:1690-1697.

Moule C. 1972. Plantes sarclées et diverses, tome III. *Phytotechnie spéciale*. (eds): La maison rustique, Paris,: 3-14

Moussamih Y. 2019. Identification des caractéristiques des 20 géotypes de *Vicia faba* L. en relation avec le rendement à l'aide des modèles de régression. PFE Master Gestion et Conservation de la Biodiversité. FST de Fès.

Nanda K. & Bastia D.N. & Ashutosh N, 2019. Character association and path coefficient analysis for yield and its component traits in slender grain rice (*Oryza sativa* L.); Department of Plant Breeding and Genetics, O.U.A.T, Bhubaneswar, 10 (3): 963-969.

Navaselvakkumaran T. Babu C. Sudhagar R & Sivakumar C.D, 2019. Studies on interrelationship and path coefficient analysis of fodder yield and yield component traits in fodder cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp). Department of Forage Crops, Centre for Plant Breeding and Genetics, Tamil Nadu Agricultural University, Electronic Journal of Plant Breeding, 10 (2): 720-726.

Neal J.R. & McVerty P.B.E, 1984. Yield structure of faba bean, (*Vicia faba* L.) Grown in Manitoba, Field Crop Research, 8: 349-360.

Osman A. & Abdel Aziz H. & Bakheit Gailani M, 2013. Correlation between Seed Yield and Yield Components in Faba Bean (*Vicia faba* L.). Advances in Environmental Biology, 7(1): 82-85

Peat, J. R., & Jeffcoat, B. (1982). *The potential for increasing soyabean yield with plant growth regulators* (No. RESEARCH). Butterworth Scientific.

Piper, E. L., Boote, K. J., Jones, J. W., & Grimm, S. S. (1996). Comparison of two phenology models for predicting flowering and maturity date of soybean. *Crop Science*, 36(6), 1606-1614.

Polhill R., M. Raven. & Stirton C.H. 1981. Evolution and systematic of Leguminous. In: *Advances in legume Systematics*. Eds. Polhill, R.M, and Royal, P. P. Botanic Gardens, Kew, UK. 191-208.

Rachef S.A., Oumer F & Ouffroukh A. 2005. Inventaire des ravageurs de la fève en Algérie (identification), 16.36-41.

Radetski C.M., Ferrari B., Cotellet S., Masfaraud J.F. & Ferard J.F. 2004. Evaluation of the génotoxic, mutagenic and oxidant stress potentials of municipal solid waste incinerator bottom ash leaf chates. *Sci. Total Environ.* 33: 209-216.

Raphalen J.L., Girard C., Lacombe J.P. 1986. Développement, croissance et élaboration du rendement des pois et féveroles. *Perspect. Agric.*, 103,14-23.

Revue *fabis news letter* N°5 Ed ICARDA Syria,: 26-31

Roberts (Editors). Collins, London, 199-265.

Rochester I.J., Peoples M.B., Hulugalle N.R., Gault R.R & Constable G.A. 2001. Using legume to enhance nitrogen fertility and improve soil condition in cotton cropping systems. *Field Crops Research* 70: 27-41.

Roger-Estrade, J., Colbach, N., Leterme, P., Richard, G., & Caneill, J. (2001). Modelling vertical and lateral weed seed movements during mouldboard ploughing with a skim-coulter. *Soil and Tillage Research*, 63(1-2), 35-49.

- Rosseel Y (2012).** “lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling.” *Journal of Statistical Software*, 48(2), 1–36. <https://www.jstatsoft.org/v48/i02/>.
- Rowland D.G, 1955.** The problem of yield in faba bean. *Agric progress*, 30: 137-147.
- Sadiki M, 1990.** Germplasm Development and Breeding for Improved Biological NitrogenFixation of Faba Bean in Morocco. Thèse de Doctorat, p 298.
- Samonte S.O.P.B. & Wilson L.T. & McClung A.M, 1998.** Path analyses of yield and yield-related traits of fifteen diverse rice genotypes. *Crop Sci*, 38:1130–1136.
- Sang N. & Li G. 2004.** Genotoxicity of municipal landfill leachate on root tips of *Vicia faba*. L, *Mutat. Res.-Genet. Toxicol. Environ. Mutag.* 560 (2):159-165.
- Schneider A. & Hayghe C, 2015.** Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables. Editions Quae. Versailles Cedex, p 515.
- Semenov, M. A. (2009).** Impacts of climate change on wheat in England and Wales. *Journal of the Royal Society Interface*, 6(33), 343-350.
- Shivanna J. & Ravi C.S. & Sreeramu B.S, 2007.** Character association and path coefficient analysis among economic traits in Makoi (*Solanum nigrum* L.). *Karnataka J. Agr. Sci*, 20: 575-577.
- Silim S.N., Saxena M.C. 1992.** Comparative performance of some faba bean (*Vicia faba* L.) cultivars of contrasting plant types. I. Yield, yield components and nitrogen fixation. *J. agric. Sci., Cambridge*, 118,325-332.
- Sindhu J.S. & Singh O.P & Singh K.P, 1985.** Component analysis of the factors determining grain yield in faba bean (*Vicia faba* L.) FABIS News Letter ICARDA, Faba bean Information Service, 13:3-5. In Correlation and Path Coefficient Analysis of seed yield components in the Narbon Bean (*Vicia narbonensis* L.) Yucel et al (2004) *Turk. J. Agric*, 28: 371-376.
- Wathman F., 1967.** Fleurs du bassin méditerranéen. VI^{ème} édition, Paris.56-61.
- Wright S, 1921.** Correlation and causation. *Journal of Agricultural Research*, 20 : 557–585.

Annexe 1

Application du modèle Path analysis

Ben Mbarek et al. (2012) ont appliqué cette méthode sur huit génotypes de pois chiche du type *kabul*i. Leurs travaux visaient la prédiction du rendement en graines du pois chiche à travers des paramètres de développement végétatif (longueur du système racinaire, hauteur moyenne des plantes, nombre de branches par plante, biomasse aérienne), des paramètres phénologiques (date de floraison précoce, durée de la phase de floraison, date de maturité précoce, date de maturité), et de production (nombre de gousses par m², nombre de graines par m², nombre de graine par gousse, poids des gousses, poids de 100 graines, indice de récolte, rendement en grains).

Ils ont opté une modélisation du rendement et ses composants à l'aide d'une analyse conventionnelle par le coefficient de piste (Path analysis).

Les résultats de cette étude indiquent que :

- ✚ 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.
- ✚ Les durées des phases de floraison et de maturité ont les effets indirects totaux positifs respectifs 0,434 et 0,46 sur le rendement en graines
- ✚ Le taux de nouaison, la hauteur moyenne des plantes, le nombre de branches par plante de pois chiche ont un important effet indirect total positif respectif 0,659, 0,572 et 0,498 sur le rendement en graines.
- ✚ Le nombre de gousses/m², le nombre de graines/m² et le nombre de graines/gousse ont les effets indirects totaux positifs respectifs 0,7 ; 1,32 et 0,747.
- ✚ 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