



PROJET DE FIN D'ÉTUDES

PRESENTE EN VUE D'OBTENTION DU DIPLOME DE

MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES

GESTION ET CONSERVATION DE LA BIODIVERSITE

**Modélisation du rendement de six variétés de *Vicia faba*
L. en condition d'irrigation d'appoint à l'aide des modèles
de régression et du Path Analysis**

Présenté par : KARIM Aicha

Encadré par : Pr. Mr FATEMI Zain El Abidine (INRA MEKNES)

Pr. DERRAZ Khalid (FST FES)

Pr. CHETTO Oumaima (INRA MEKNES)

Soutenu le : 19 Juillet 2022

Devant le jury composé de :

- Pr. Mr FATEMI Zain El Abidine (INRA MEKNES)
- Pr. CHETTO Oumaima (INRA MEKNES)
- Pr. DERRAZ Khalid (FST FES)
- Pr. BENJELLOUN Meryem (FST FES)
- Pr. AZZOUZI Amal (FST FES)

Année Universitaire : 2021/2022

RÉSUMÉ

La culture de la fève (*Vicia faba L.*) a une grande importance, dans la filière des légumineuses alimentaires au niveau national, du fait qu'elle occupe en moyenne à peu près la moitié de la superficie emblavée en légumineuses alimentaires, d'où l'amélioration du rendement du *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, la présente étude a été conduite au cours de l'année universitaire 2021-2022 au sein de l'Institut National de la Recherche Agronomique de Meknès et plus particulièrement dans le Domaine Expérimental de Douyet. Elle a comme objectif principal, la modélisation du rendement de la fève en relation avec ses composantes à condition d'irrigation d'appoint.

Pour répondre à cet objectif, nous avons testé six variétés de fève et de féverole avec deux répétitions pour chaque traitement d'irrigation apporté au stade floraison, I1 (53mm) et I2 (106mm). Les paramètres étudiés sont la hauteur, le diamètre, le rang, le nombre de gousses TP, le nombre de gousses TS, le nombre graines gousse TP, le nombre graines gousse TS, le nombre de tiges, le poids moyen graine TP, le poids moyen graine TS.

Pour se faire, nous avons eu recours à la régression linéaire multiple et à la modélisation par le modèle de cheminement ou Path Analysis.

Nos résultats indiquent que pour l'irrigation 1 les facteurs directs les plus importants déterminant le rendement par plante de *Vicia faba L.* qui expliquent 89% de la variabilité totale sont : le poids d'une graine TP, le nombre de graines/gousse TP, le nombre de graines/gousse TS, le nombre de gousses TP et le nombre de gousses TS.

Alors que pour l'irrigation 2 les facteurs directs déterminant le rendement par plante expliquent 70% de la variabilité totale sont : le poids d'une graine TP, le nombre de gousses TP et le nombre de gousses TS.

Mots clés : Vicia faba L. Rendement. Composantes du rendement. Irrigation. Le modèle de cheminement. Médiation

DEDICACES

A ceux qui me sont les plus chers

A ceux qui ont toujours cru en moi

A ceux qui m'ont toujours encouragée

Je dédie ce travail marquant de ma vie :

A mon très cher père,

Mon plus haut exemple et mon modèle de persévérance pour aller toujours de l'avant et ne jamais baisser les bras. J'espère que ce travail sera à la hauteur de tes attentes et qu'elle soit l'accomplissement de tous tes efforts.

A ma très chère mère,

Pour son affection, sa patience, sa compréhension, sa disponibilité, son écoute permanente et son soutien sans égal dans les moments les plus difficiles de ma vie.

A mes chers frères Youssef, Ayoub et Yassine pour vous exprimer toute mon affection et ma tendresse.

A ma chère sœur Houda pour sa bonté, sa générosité de cœur et son aide.

A mon mari Zakaria pour son soutien et son encouragement.

A mes très chers oncles et tantes,

Vos grands cœurs, vos qualités humaines m'ont toujours impressionnée. Vous m'aviez soutenue dans les différentes étapes de ma vie et de mes études. Mon amour pour vous est si profond.

A mes grands-parents, qui sont toujours présents pour m'orienter et me conseiller.

A ma grande famille, mes amis et tous ceux et toutes celles que j'ai involontairement omis de citer et qui n'en demeurent pas moins chers.

A tous mes enseignants et professeurs,

Du primaire, passant par le collège, le lycée et enfin la faculté des sciences et techniques Fès.

REMERCIEMENTS

*J'aimerais en premier lieu remercier **mon Dieu Allah** qui m'a donné la volonté et le courage pour la réalisation de ce travail.*

*Mes remerciements s'adressant particulièrement à monsieur **FATEMI Zain El Abidine**, chercheur à l'INRA du Meknès (Maroc), Je suis très sensible à l'honneur que vous me faites en acceptant d'encadrer mon travail. Je vous exprime ma grande admiration pour vos hautes qualités morales, humaines et professionnelles. Je vous prie de trouver, dans ce modeste travail, l'expression de ma sincère reconnaissance et ma respectueuse admiration.*

*Je tiens à remercier en ce lieu monsieur **DERRAZ Khalid**, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, pour son encadrement, ses conseils, ses corrections et ses orientations au cours de son encadrement.*

*Je voudrais aussi bien exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury, madame **BENJELLOUN Meryem**, madame **AZZOUZI Amal** et madame **CHETTO Oumaima** qui m'ont honoré en acceptant de juger ce travail et de l'enrichir par ses remarques constructives.*

*Une pensée très sincère à tous les enseignants de la filière de la formation **Gestion et Conservation de la Biodiversité**, qui ont su nous donner une formation didactique et appréciable tout au long de notre cursus universitaire.*

À vous tous, un grand merci

Liste des Figures

Figure 1 : feuilles de la plante <i>Vicia faba</i> L.....	6
Figure 2 : Fleurs de <i>Vicia faba</i> L.....	7
Figure 3 : gousse de <i>Vicia faba</i> L.....	7
Figure 4 : Fleur visitée par une abeille (A) ou un bourdon (B).....	8
Figure 5 : Stades et phases du cycle de développement de la fève.....	9
Figure 6 : La plante Orobanche.....	13
Figure 7 : L'effet de l'anthracnose sur la feuille de la fève.....	14
Figure 8 : la rouille de la fève.....	14
Figure 9 : Localisation du site d'expérimentation.....	20
Figure 10 : Variation des précipitations au niveau du Domaine Expérimental de Douyet, durant la campagne 2021-2022.....	22
Figure 11 : Plan de la parcelle d'expérimentation.....	23
Figure 12 : Pied à coulisse.....	24
Figure 13 : Diagrammes de distribution des différents paramètres relativement au rendement.....	26
Figure 14 : Diagramme de dispersion des résiduelles standardisées en fonction du rendement prédit standardisé.....	28
Figure 15 : Distribution de fréquence des valeurs résiduelles standardisées.....	28
Figure 16 : Diagramme de dispersion des résiduelles standardisées en fonction du rendement prédit standardisé.....	30
Figure 17 : Distribution de fréquence des valeurs résiduelles standardisées.....	31
Figure 18 : Diagrammes de distribution des différents paramètres relativement au rendement.....	31
Figure 19 : Diagramme de dispersion des résiduelles standardisées en fonction du rendement prédit standardisé.....	33
Figure 20 : Distribution de fréquence des valeurs résiduelles standardisées.....	34
Figure 21 : Modèle initial postulé pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba</i> L.....	35
Figure 22 : Modèle postulé témoin pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba</i> L.....	36

Figure 23 : Analyse du cheminement du nombre de gousses par TP sur le Rendement par plante via le médiateur nombre de graines/gousse par TP	39
Figure 24 : Analyse du cheminement du nombre de graines/gousses par TP sur le Rendement par plante via le médiateur poids d'une graine par TP	39
Figure 25 : Analyse du cheminement du poids d'une graine par TP sur le Rendement par plante via le médiateur poids d'une graine par TS.....	40
Figure 26 : Modèle final témoin du Path Analysis du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba L.</i>	41
Figure 27 : Modèle postulé irrigation 1 pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba L.</i>	42
Figure 28 : Analyse du cheminement du nombre de gousses par TP sur le Rendement par plante via le médiateur nombre de graines/gousse par TP.....	44
Figure 29 : Modèle final irrigation 1 du Path Analysis du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba L.</i>	45
Figure 30 : Modèle postulé irrigation 2 pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba L.</i>	46
Figure 31 : Analyse du cheminement du nombre de gousses par TP sur le Rendement par plante via le médiateur nombre de graines/gousse par TP	48
Figure 32 : Analyse du cheminement du nombre de graines/gousses par TP sur le Rendement par plante via le médiateur poids d'une graine par TP	49
Figure 33 : Analyse du cheminement du nombre de gousses par TP sur le Rendement par plante via le médiateur nombre de gousses par TS.....	49
Figure 34 : Modèle final du Path Analysis du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba L.</i>	50

Liste Des Tableaux

Tableau 1 : Production et superficie des légumineuses alimentaires pendant la campagne agricole 2020-2021.....	4
Tableau 2 : Nom et caractéristiques des variétés testées.....	21
Tableau 3 : Itinéraire technique INRA pour le traitement irrigation.....	22
Tableau 4 : Résultat de la régression linéaire multiple du modèle de départ.....	26
Tableau 5 : Résultat de la régression linéaire multiple du modèle final.....	27
Tableau 6 : Résultat de la régression linéaire multiple du modèle de départ.....	29
Tableau 7 : Résultat de la régression linéaire multiple du modèle final.....	29
Tableau 8 : Résultat de la régression linéaire multiple du modèle de départ.....	32
Tableau 9 : Résultat de la régression linéaire multiple du modèle final.....	32
Tableau 10 : Effets directs ou indirects et type de médiation du Path Analysis pour le rendement de la fève et ses composantes « Témoin »	40
Tableau 11 : Effets directs ou indirects et type de médiation du Path Analysis pour le rendement de la fève et ses composantes « I ₂ »	50

Liste des abréviations

PIB : Produit intérieur brut

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

SAU : Surface Agricole Utile

SIAM : Salon International de l'Agriculture au Maroc

qx/ha. : Quintaux par hectare

TP : tige principale

TS : Tige secondaire

Nb : nombre

CFI : indice d'ajustement comparatif

R^2 : coefficient de détermination

Sommaire

INTRODCUTION GENERALE.....	1
Partie 1 : Revue Bibliographique	
I. Les légumineuses alimentaires au Maroc.....	4
1. Production et superficie des légumineuses alimentaires	4
2. Répartition de la culture des légumineuses et de la fève au Maroc	4
3. Importance des légumineuses alimentaires	5
II. Généralités sur <i>Vicia Faba L.</i>	5
1. Origine et répartition géographique	5
2. Systématique	5
3. Biologie de l'espèce	6
4. Reproduction	8
5. Croissance et développement de la fève	9
6. Intérêt culturel de la fève.....	9
7. Installation de la culture	10
a. Date de semis.....	10
b. Profondeur de semis.....	10
c. Dose et mode de semis	10
8. Conduite de l'irrigation	10
9. Gestion des mauvaises herbes	10
a. Lutte manuelle :.....	11
b. Lutte mécanique :.....	11
c. Lutte chimique :.....	11
10. Récolte des fèves	11
11. Le stockage	11
12. Exigences écologiques de la fève	12
a. Les sols de culture	12
b. Le climat	12
13. Contraintes de la culture de la fève	12
a. Contraintes abiotiques	12
b. Contraintes biotiques	13
III. L'irrigation d'appoint.....	15
1. Définition	15

2.	Effets	15
IV.	Modélisation statistique du rendement et ses composantes	15
1.	Régression linéaire multiple.....	16
a.	Définition.....	16
b.	Equation	16
c.	Conditions d'application.....	16
d.	Avantages et inconvénients.....	17
2.	Path Analysis.....	17
a.	Définition.....	17
b.	Avantages.....	17
I.	But de ce travail.....	20
II.	Site expérimental.....	20
III.	Matériel végétal.....	20
IV.	Données pédoclimatiques de la station expérimentale.....	21
V.	Protocole expérimental.....	22
1.	Itinéraire technique.....	22
2.	Dispositif expérimental	23
3.	Données expérimentales.....	24
4.	Analyses de données	24
I.	Régression linéaire entre les composantes de rendement	26
1.	Témoin	26
2.	Irrigation 1	28
3.	Irrigation 2.....	31
II.	PATH ANALYSIS.....	34
1.	Path Analysis appliqué sur le témoin	36
a.	Test de validité du modèle.....	36
b.	Flux de causalité entre les différentes variables.....	36
c.	Analyse et interprétation de la médiation	38
d.	Modèle final témoin de la médiation Path Analysis du rendement	41
2.	Path Analysis appliqué sur le traitement irrigation 1	42
a.	Test de validité du modèle.....	42
b.	Flux de causalité entre les différentes variables.....	42
c.	Analyse et interprétation de la médiation	44
d.	Modèle final irrigation 1 de la médiation Path Analysis du rendement.....	45

3. Path Analysis appliqué sur le traitement irrigation 2 :	46
a. Test de validité du modèle.....	46
b. Flux de causalité entre les différentes variables	46
c. Analyse et interprétation de la médiation	48
d. Modèle final du Path Analysis du rendement et de ses composantes	50
CONCLUSION.....	53
Références bibliographiques.....	55

INTRODUCTION GENERALE

Au Maroc, l'agriculture représente aujourd'hui 20% du PIB national et un moteur clef de la croissance. En effet, il 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, suivie des légumineuses alimentaires.

Les légumineuses alimentaires occupent la seconde place dans l'assolement après les céréales. Elles jouent plusieurs rôles sur le plan agronomique, nutritionnel et économique. En effet, ces cultures contribuent d'une part à l'amélioration de la structure du sol et son enrichissement en azote à travers leurs propriétés biologiques permettant la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique et améliorent la qualité de la ration alimentaire humaine et animale vu leur richesse en protéines. D'autre part, par leur production en sec, et en vert, les légumineuses alimentaires représentent des sources non négligeables en matière de trésorerie des agriculteurs.

La fève (*Vicia faba L.*), est la principale légumineuse alimentaire au Maroc qui constitue une composante essentielle dans les systèmes de production agricoles marocains grâce à ses multiples rôles sur le plan agrobiologique et socio-économique, largement cultivée pour l'alimentation humaine et l'alimentation animale (Oliveira et al., 2016). La superficie dédiée à cette culture dans la campagne agricole 2020/2021 représente près de 42% de la superficie totale occupé par les légumineuses alimentaires au Maroc (ONICL, 2021). Toutefois, 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 biotiques et abiotiques. La sécheresse est largement reconnue comme le premier facteur limitant la production agricole mondiale (Turner, 1986 ; Passioura, 1996). *Vicia faba L.* est l'une des cultures qui est très sensible à la sécheresse, surtout pendant ses stades critiques à savoir la germination et la floraison (Day et Legg, 1983).

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).

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 en condition d'irrigation d'appoint à l'aide des modèles de régression et du Path analysis chez 6 variétés de *Vicia faba L.*

Le présent document comporte trois grandes parties :

- ❖ Une première partie bibliographique, rassemblant les diverses données générales collectées sur les légumineuses et sur l'espèce *Vicia faba L.*
- ❖ Ensuite une deuxième partie constituée du matériel et des méthodes utilisés pendant notre expérimentation.
- ❖ Enfin, la dernière partie des différents résultats et discussions des paramètres étudiés.

Partie 1
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Les légumineuses alimentaires au Maroc

1. Production et superficie des légumineuses alimentaires

D'après le Ministre de l'Agriculture de la Pêche Maritime de Développement Rural et des Eaux et Forêts les légumineuses alimentaires d'automne occupent environ 168.000 Ha durant la campagne agricole 2020-2021, dont 6% en irrigué avec les fèves (56%), les Petits pois (20%), Lentilles (21%) et autres (3%). (Source : <https://www.agriculture.gov.ma>)

Le rendement moyen varie de 6,5 à 8 qx/ha. La problématique de l'amélioration et de la stabilité des rendements est étroitement liée à l'utilisation efficiente de l'eau car la quasi-totalité des légumineuses alimentaires sont des cultures non irriguées. La pratique de techniques culturales appropriées, l'utilisation de variétés productives et résistantes aux maladies et la lutte contre les mauvaises herbes sont parmi les moyens susceptibles d'augmenter le niveau et la stabilité de la production.

Les dernières statistiques de la production et la superficie des principales légumineuses alimentaires durant l'année 2020-2021 au Maroc, à savoir la fève, le petit pois, la lentille et le pois chiche, sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Production et superficie des légumineuses alimentaires pendant la campagne agricole 2020-2021

(Source : <https://www.onicl.org.ma>)

	Fèves	Pois	Lentilles	Pois chiche	Total
Production (en 1000 qx)	1312	344	416	725	2798
Superficie (en 1000 ha)	105	40	42	63	250

Donc, d'après ce tableau on peut constater que la production des légumineuses la plus élevée au cours de l'année 2020-2021 est celle de la Fève avec une quantité de 1312 qx dans une superficie de 105 ha.

2. Répartition de la culture des légumineuses et de la fève au Maroc

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

La part de la fève dans la production nationale de légumineuses alimentaires est de 46% pendant la campagne 2020-2021. Elle est suivie par les pois chiches (25%), les lentilles (14%) puis les pois (12%).

Selon la répartition des légumineuses, on constate que la fève est la culture dominante avec 42% de la superficie totale. La filière existe dans presque toutes les régions agricoles du Maroc, bien qu'elle soit plus concentrée dans le Nord.

3. Importance des légumineuses alimentaires

Chez les phanérogames, les légumineuses sont la troisième famille la plus importante en nombre d'espèces (18 000 à 20 000 espèces), après les astéracées et les orchidacées. Alors que l'importance des légumineuses est reconnue en botanique, cette famille constitue aussi le deuxième grand groupe après les graminées en agropastoralisme (Doree, 2000). Les espèces qui composent la famille des légumineuses sont d'une importance considérable pour l'homme. Du point de vue économique par leur partie herbacée, autant que par leurs fruits riches en hydrates de carbone. Elles contribuent dans une large mesure aussi bien à la nourriture de l'homme (légumineuses alimentaires : pois, haricot, fève, lentille) qu'à l'alimentation quotidienne des animaux domestiques (légumineuses fourragères) (Borget, 1989). Ces dernières ont d'autres utilisations alternatives, qui actuellement semblent s'orienter vers des objectifs relatifs à l'amélioration durable de l'environnement, en particulier pour favoriser la remontée biologique des milieux dégradés (comme plante de couverture) et leur utilisation en agroforesterie liée à la prévention des incendies des forêts ainsi que, dans la lutte contre la désertification en zone aride (Masson et Giuntzbutger, 2000). Aussi les légumineuses jouent un rôle très important dans la rotation des cultures grâce à ses propriétés biologiques qui aident à l'amélioration de la structure du sol ainsi que son enrichissement en azote.

II. Généralités sur *Vicia faba* L.

1. Origine et répartition géographique

Selon MATHON (1985), la fève est une plante cultivée par l'homme depuis le Néolithique. La plupart des formes primitives de la fève ont été trouvées dans la région d'Afghanistan et au Nord de l'Inde, ce qui suggère que cette espèce a pris naissance dans le sub-continent indien (Shultze Motel, 1972). Selon Mathon (1985), elle est originaire des régions méditerranéennes ou du Moyen-Orient. La fève s'est propagée vers l'Europe, le long du Nil, jusqu'en Ethiopie et de la Mésopotamie vers l'Inde (Cubero, 1974).

2. Systématique

D'après Dajoz (2000), la fève est classée botaniquement comme suit :

- Règne : Végétal
- Embranchement : Spermaphytes
- Sous-embranchement : Angiospermes
- Classe : Dicotylédones

- Sous-classe : Dialypétales
- Série : Caliciflores
- Ordre : Rosales
- Famille : Fabacées
- Sous-famille : Papilionacées
- Genre : *Vicia*
- Espèce : *Vicia faba* L.

L'espèce *Vicia faba* L. peut être divisée en trois sous espèces selon la taille des graines (Kolev, 1976)

- *Vicia faba* minor Beck à petites graines appelées couramment fêverole.
- *Vicia faba* equina Pers à graines moyennes appelées couramment févette.
- *Vicia faba* major Hartz à grosses graines appelées couramment fève.

3. Biologie de l'espèce

La fève est une plante herbacée annuelle présentant :

- **Une tige** principale qui comporte 0 à 5 ramifications à la base. Elle est épaisse, longue, quadrangulaire et creuse. Se dressant à plus d'un mètre de hauteur (Peron, 2006), la taille de la tige varie en fonction de nombreux facteurs dont la température et la pluviométrie.
- **Les nœuds** qui sont en nombre variable entre 10 et 40. Cette variabilité est en fonction du génotype et des conditions de la culture (Le Guen et Duc, 1992). À partir de ces nœuds, les feuilles prennent naissance.
- **Les feuilles** sont alternes de couleur vert glauque ou grisâtre, composées-pennées et sont constituées de 2 à 4 paires de folioles amples et ovales. La foliole terminale est caractérisée par une arrête étroite non enroulée en vrille au niveau de l'extrémité du limbe. Les feuilles sont accompagnées de deux larges stipules bien visibles en forme dentée (Chaux et Foury, 1994).



Figure 1 : feuilles de la plante *Vicia faba* L.

- **La fleur** est caractéristique des papilionacées avec un calice composé de 5 sépales soudés et une corolle constituée de 5 pétales : deux ailes, un étendard et 2 pétales soudés formant une carène. La surface du stigmate est couverte de papilles qui, lorsqu'elles sont brisées, forment une ouverture libérant un exsudat facilitant la pénétration du pollen. Chaque fleur comporte dix étamines dont la plus haute est libre et les neuf autres sont unies en une gaine renfermant l'ovaire. Les fleurs sont de couleur blanche avec des taches plus ou moins violettes indiquant la présence de tannins dans la graine (Singh et Tomer, 1988). Ces fleurs sont disposées en inflorescence de 4 à 6 sur le nœud.



Figure 2 : Fleurs de *Vicia faba* L.

- **Les fruits** sont des gousses pendantes noircissant à la maturité (Laumonier, 1979).
- **La gousse** de la fève est charnue de longueur variable (4,5 à 16 cm), Elle est érigée pour la fève de la fève et pendante ou horizontale pour la fève, avec deux à huit graines par gousse, La croissance de la plante est naturellement indéterminée.



Figure 3 : gousse de *Vicia faba* L.

- **Les graines** sont charnues, vertes et tendres à l'état immature. A complète maturité, elle développe un tégument épais et coriace de couleur brun-rouge, à blanc verdâtre et prend une forme aplatie à couleur presque circulaire (Chaux et Flourey, 1994).
- **Le système racinaire** *Vicia faba* L., et selon Duc (1997), est formé par une racine principale pivotante et des racines secondaires portant des nodosités contenant des bactéries fixatrices d'azote (*Rhizobium leguminosarum*).

4. Reproduction

Vicia faba L. est une espèce possédant un système de reproduction partiellement allogame. En d'autres termes, le mode de reproduction de la fève est intermédiaire entre l'autogamie et l'allogamie. L'allogamie est réalisée par les insectes pollinisateurs à savoir les abeilles et les bourdons. Ces insectes interviennent principalement comme vecteurs de pollen entre fleurs de la même plante ou entre fleurs de plantes différentes, En fonction du génotype, la structure de la fleur peut varier légèrement, déterminant une séparation plus ou moins importante entre le stigmate et les étamines, Dans certains cas, cette séparation constitue une barrière à l'autopollinisation, Dans d'autres, elle est infime ou inexistante. Dans ce cas, la fleur est alors auto fertile et peut être pollinisée sans déclenchement entomophile (Bond et Poulsen, 1983, Mesquida et al, 1990).

Le taux d'allogamie varie de 4 à 84 %, avec une moyenne de 35 %, il dépend en grande partie de l'interaction entre les visites des insectes pollinisateurs, l'ouverture des fleurs et l'autofertilité (Sadiki et Lazrak, 1998).



Figure 4 : Fleur visitée par une abeille (A) ou un bourdon (B) (Huber, 2011)

5. Croissance et développement de la fève

Cinq stades principaux sont distingués pour caractériser le développement des fèves : germination et levée, développement végétatif, développement reproductif, sénescence de la gousse et sénescence de la tige.

Le développement végétatif se poursuit après que le développement reproductif ait commencé.

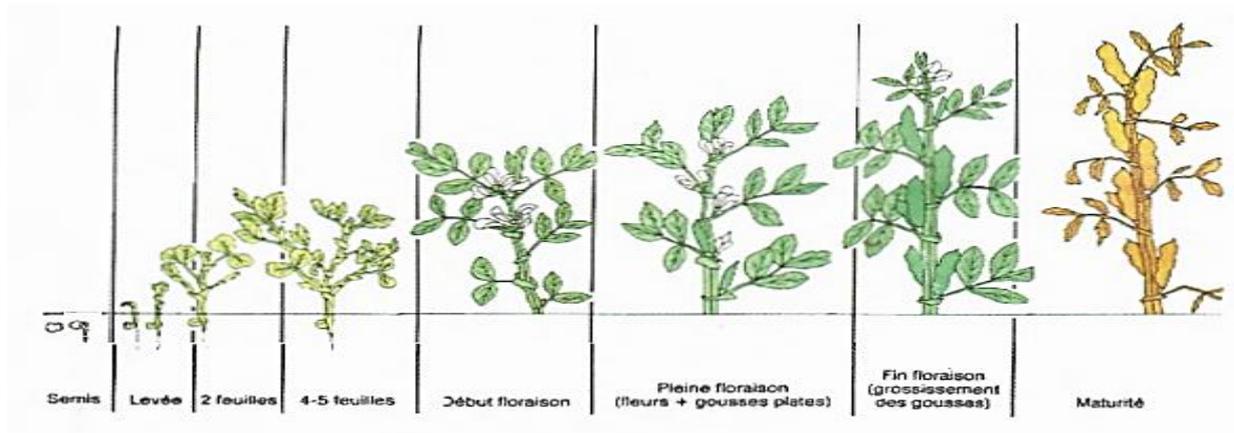


Figure 5 : Stades et phases du cycle de développement de la fève.

6. Intérêt culturel de la fève

Intérêt agronomique

Vicia faba L. 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 ; Racheff 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.

Intérêt alimentaire

La fève est l'une des légumineuses à grains les plus communes. Elle est très utilisée pour la consommation humaine et animale (Goyoaga et al, 2011). Selon Gordon (2004), cette légumineuse a une teneur en protéine élevée et une excellente source de fibres solubles et insolubles, de glucides complexes, de vitamines (B9 et C) et de minéraux. Elle constitue un aliment nutritif très important surtout pour les populations à faibles revenus, qui ne peuvent pas toujours s'approvisionner en protéine d'origine animale (Daoui, 2007).

7. Installation de la culture

a. Date de semis

Vu que les fèves sont sensibles au stress hydrique, aux gelées et aux fortes températures pendant la phase critique de floraison et de formation du fruit, la date de semis, qui conditionne le rendement grain final, en permettant de bien placer ces différents stades de développement critiques dans des conditions climatiques favorables, doit être précoce.

Le semis de fève doit avoir lieu de mi-octobre à fin décembre selon les zones agro climatiques. Les semis précoces sont préconisés pour les zones côtières et les semis tardifs pour les plaines intérieures et les zones de montagne. La levée intervient généralement entre 10 et 20 jours, suivant la température du sol.

b. Profondeur de semis

La profondeur de semis préconisée doit être comprise entre 4 et 5 cm, puisque la fève est caractérisée par une grosse graine

c. Dose et mode de semis

Il est recommandé, en semis manuel, de semer une graine tous les 15 cm, en lignes distantes de 50 à 75 cm dans un sillon profond de 5 cm, selon la technique choisie pour la lutte contre les adventices. Ceci correspond à une dose comprise entre 80 et 180 kg/ha. Dans le but de mieux contrôler la profondeur et les espacements entre les rangs de fève, il est recommandé de recourir au semis mécanique. Dans ce cas, les écartements préconisés varient entre 20 et 80 cm. Le peuplement qui sera obtenu varie ainsi entre 10 à 15 plants de fève par mètre linéaire.

8. Conduite de l'irrigation

Bien que la fève soit généralement conduite en "Bour", elle répond bien aux apports d'eau. L'humidité du sol doit être maintenue au-dessus de 50% de la capacité au champ sur les premiers 30 cm du profil. Pour une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation, il est préconisé de procéder à des irrigations pendant les phases critiques chez la fève. Ces phases correspondent au début de la ramification, la floraison, et le remplissage des grains.

Il est déconseillé d'irriguer la fève pendant les deux premières semaines qui suivent le semis, vu qu'un excès d'eau à ce stade réduit la croissance de la culture et augmente les risques de pourriture des racines.

On conseille d'effectuer les irrigations tôt le matin pour laisser le temps au feuillage des plantes de sécher avant la tombée de la nuit. Un total de 250 à 400 mm d'eau est nécessaire, selon la nature du climat, du type de sol et du matériel génétique utilisé.

9. Gestion des mauvaises herbes

La fève est une plante peu compétitive vis-à-vis les mauvaises herbes, particulièrement pendant le stade plantule. Les pertes de rendements liées au manque de désherbage ou à un désherbage inadéquat varient entre 30 et 70%. Le désherbage est donc très important pour permettre des

rendements optimums. Il est préconisé de nettoyer les champs de fève pendant les premiers deux mois du cycle de la culture. Ce nettoyage peut se faire manuellement pour les parcelles de petites superficies ou mécaniquement et chimiquement pour les grandes superficies.

a. Lutte manuelle :

Cette opération consiste à arracher les mauvaises herbes entre les rangs et sur les rangs, manuellement ou à l'aide de binettes. Le désherbage manuel est efficace, mais coûteux et consommateur de temps.

b. Lutte mécanique :

Cette technique consiste à effectuer des passages de la bineuse pour détruire les mauvaises herbes entre les rangs. Elle est moins coûteuse et permet d'économiser le temps par comparaison à la lutte manuelle. Cependant, le binage mécanique peut causer des blessures des plantules de fève. L'association de la lutte mécanique ou désherbage manuel donne de bons résultats vis leur complémentarité.

c. Lutte chimique :

Les herbicides constituent une technique très efficace de lutte contre les mauvaises herbes, ce qui permet d'augmenter les rendements, d'améliorer la qualité et de réduire la main-d'œuvre dans la production des cultures. D'après Arevalo et al. (1992), l'application d'un certain nombre d'herbicides permet de lutter de manière satisfaisante contre les mauvaises herbes dans la culture des fèves et surtout contre l'orobanche.

10. Récolte des fèves

La récolte des fèves s'effectue avant leur pleine maturité physiologique, car l'égrenage des gousses et leur pourrissement pourraient être la conséquence d'une récolte tardive ou une récolte avant le moment opportun, en particulier lorsque la pluie survient. Le meilleur stade pour la récolte de la fève est lorsque les feuilles et les gousses se dessèchent. Les fèves peuvent se récolter à la moissonneuse-batteuse, mais la récolte manuelle est d'usage courant. Nous arrachons les plantes, ou nous les coupons à l'aide d'une faucille. La récolte se fait généralement tôt le matin ou en fin d'après-midi, pour diminuer les pertes dues à l'égrenage. Les plantes récoltées sont disposées en petits tas et laissées à sécher au champ pendant quelques jours en fonction de la température.

11. Le stockage

Les légumineuses sont plus sensibles aux conditions de stockage que les céréales. Dommages mécaniques, haute température, humidité relative élevée, haute teneur en humidité des graines, exposition à la lumière et période de stockage prolongée sont autant de conditions nuisibles à la qualité des graines. Elles peuvent provoquer une altération de la qualité commerciale et culinaire caractérisée principalement par une durée plus longue de cuisson, une mauvaise appétence, une diminution de la qualité de la protéine, et une couleur des graines assombrie (Anonymes, 2016). La conservation doit se faire dans des locaux propres, secs, sains, aérés et à l'abri des rongeurs et des oiseaux. Il est fortement recommandé de traiter les graines stockées contre les bruches de stockage à l'aide d'un insecticide. Mais s'agissant de produits pouvant présenter une toxicité sur l'homme et l'animal, il est fortement recommandé de s'entourer de

précautions de soigneusement laver les semences avant la consommation (Sadiki et Lazraq, 1998).

12. Exigences écologiques de la fève

a. Les sols de culture

La fève s'adapte à une large gamme de types de sols, mais préfère ceux argilo-limoneux profonds bonne capacité de rétention, dont le pH se situe entre 6 et 8. Cependant, une rétention d'eau trop importante entraîne un risque d'avortement des fleurs et des jeunes gousses. Par conséquent, le rendement est réduit et la maturation retardée. Il faut donc éviter les sols présentant un faible pouvoir de drainage ou excessivement humides. La fève est sensible aux sols compacts, il faut donc réduire les opérations de travaux avant et après le semis pour limiter le compactage.

b. Le climat

La fève est très sensible à la sécheresse et exige un approvisionnement régulier en eau durant la période de végétation. Une pluviométrie supérieure à 350 mm par an est nécessaire à un bon rendement. Le stress hydrique durant la phase reproductive induit l'avortement des fleurs et une réduction considérable de la production. La phase la plus sensible à la sécheresse coïncide avec le début de la formation des gousses.

13. Contraintes de la culture de la fève

a. Contraintes abiotiques

Sècheresse terminale

Au niveau climatique, la sécheresse constitue de loin la contrainte la plus importante qui entrave la production des fèves au Maroc (El Bouhamdi et Sadiki, 2002). Cette contrainte constitue un facteur limitant de la production dans les hauts plateaux et les plaines côtières, car la culture de la fève exige beaucoup d'eau (Gerard, 1990). Les rendements de la fève deviennent plus importants, en milieux irrigués (Green, et al, 1986).

Froid hivernal et gelé printanier

Les basses températures provoquent la coulure des fleurs et la mortalité des plantes qui montrent une formation de cristaux de glace dans les espaces intercellulaires des tissus. Par conséquent, les cellules végétales se déshydratent (Link et al., 2010). En plus, le volume élevé des cristaux entraîne la destruction des parois des cellules.

Chaleur

Les fortes chaleurs causent un arrêt de croissance, une chlorose (décoloration due à un manque de chlorophylle) et peuvent même conduire au flétrissement de la culture. De même, la chaleur

peut nuire la qualité des graines, les rendant précocement amères et farineuses (Chaux et Floury, 1994).

Salinité

C'est une contrainte qui concerne notamment les zones sahariennes, où les fèves sont irriguées avec des eaux assez chargées en sodium. L'effet du sel sur les plantes et sur les propriétés physiques et chimiques du sol réduit la productivité (Maatougui, 1996).

b. Contraintes biotiques

Parmi les facteurs biotiques qui affectent les fèves, nous pouvons citer par ordre d'importance : l'orobanche, les maladies cryptogamiques, les nématodes, les maladies virales et les insectes

Plantes parasites

- **Orobanche** C'est une plante sans chlorophylle, qui dépend entièrement de son hôte, pour réaliser son cycle biologique (Kharrat, 2002). Elle occasionne des pertes considérables, et pouvant entraîner la destruction totale de la fève (Kharrat, 2002). Cette plante parasite a des fleurs gamopétales et appartient à la famille des orobanchacées (Dorette, 2005).



Figure 6 : La plante Orobanche

Maladies cryptogamiques Les principales maladies cryptogamiques qui affectent la fève sont :

- **Les tâches chocolat** Cette maladie cryptogamique cause des tâches de couleur rouge-brun sur les feuilles, tiges et gousses. Ces tâches ou lésions peuvent causer une défoliation de la plante et même sa mort. Cette maladie est causée par *Botrytis fabae*.

Rhaim (2002) a rapporté qu'une attaque sévère, par celle-ci, peut engendrer des pertes de rendement allant jusqu'à 100% lorsque les conditions défavorables se prolongent.

- **L'Anthracnose** Est une maladie cryptogamique due à *Ascochyta fabae*. Elle se manifeste par des taches rondes, brun chocolat. Elles se développent sur les feuilles, les tiges, les gousses et le tégument des graines. Elles peuvent se développer jusqu'à ce que des parties de la plante

entièrement noircies meurent (Planquaert et Girard, 1987). Elle provoque aussi des pertes en quantité et en qualité sur la fève (Kharrat, 2002).



Figure 7 : L'effet de l'antracnose sur la feuille de la fève

- **La rouille** Cette maladie cryptogamique, causée par *Uromyces fabae*, se manifeste par des taches brunes à rougeâtres sur les feuilles, causant un dessèchement et une chute de feuilles (Chaux et Floury, 1994).



Figure 8 : la rouille de la fève

Principaux ravageurs

- **Les pucerons** (*Aphis faba*) : c'est un insecte piqueur suceur. Il vit en colonies compactes, à l'extrémité des plantes de la fève. Il provoque l'enroulement, le dessèchement et la chute des feuilles (Hamadache, 2003). De plus, cet insecte peut transmettre plus de 30 virus pathogènes (Blackman et Eastop, 2007).

- **Bruche de la fève** (*Bruchus rufimanus*) : c'est un insecte qui peut engendrer des dégâts importants et compromettre la récolte durant le stockage. À partir du mois de février, lorsque les températures dépassent 15 °C, cet insecte sort de la graine pour s'accoupler et les œufs sont déposés sur les gousses (Boughdad, 1996). À l'éclosion, la larve pénètre dans une graine et s'y nourrit. La Bruche peut rester longtemps dans la graine. Les symptômes sont l'apparition de trous sur les graines.

III. L'irrigation d'appoint

Pour permettre leur croissance végétative et leur développement, les plantes ont besoin d'eau appropriée en qualité et en quantité, à portée de leurs racines et au bon moment. La plus grande partie de l'eau absorbée par une plante sert à transporter les nutriments dissous du sol jusqu'aux organes aériens des plantes, d'où elle est libérée dans l'atmosphère par transpiration : l'utilisation de l'eau en agriculture est intrinsèquement consommatrice. Chaque culture a des besoins en eau particuliers, qui varient selon les conditions climatiques locales.

1. Définition

L'irrigation d'appoint consiste à apporter un complément d'eau nécessaire au développement de la culture durant un ou plusieurs stades phénologiques.

Elle comprend l'ajout de quantités limitées d'eau d'irrigation à des cultures essentiellement pluviales afin d'améliorer et de stabiliser les rendements pendant les périodes où les précipitations n'assurent pas suffisamment d'humidité pour la croissance normale des plantes.

2. Effets

L'irrigation d'appoint a fait l'objet de nombreuses études en tant que stratégie de production précieuse et durable pour une large gamme de cultures dans les régions sèches. Cette pratique, qui consiste à limiter les applications de l'eau aux stades de croissance sensibles à la sécheresse, vise à optimiser la productivité de l'eau et à la stabiliser plutôt que d'optimiser les rendements (Geerts and Raes 2009 1, FAO 2002 2).

IV. Modélisation statistique du rendement et ses composantes

La modélisation statistique est une manière simplifiée et formalisée mathématiquement d'approcher la réalité, en d'autres termes, de décrire les processus qui génèrent vos données. D'autre manière, elle permet de faire des prévisions à partir de cette approximation.

A partir de données éventuellement hétérogènes, la modélisation permet d'agencer les différents facteurs et de quantifier leurs effets dans un but de prévision.

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. 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.

Les modèles de modélisation statistique sont très nombreux. On va choisir deux modèles dans le présent travail, pour appliquer la modélisation du rendement et ses composantes chez *Vicia faba L.*

1. Régression linéaire multiple

a. Définition

La régression linéaire multiple est une des méthodes statistiques les plus utilisées dans de nombreux domaines pour l'étude de données multidimensionnelles. Elle constitue la généralisation naturelle de la régression simple, où on cherche à expliquer les valeurs prises par la variable endogène à l'aide de variables exogènes.

En général, les modèles de régression sont construits dans le but d'expliquer la variance d'un phénomène (variable dépendante) à l'aide d'une combinaison de facteurs explicatifs (variables indépendantes). Dans le cas de la régression linéaire multiple, la variable dépendante est toujours une variable continue tandis que les variables indépendantes peuvent être continues ou catégorielles.

La régression linéaire est appelée multiple lorsque le modèle est composé d'au moins deux variables indépendantes. À l'inverse, un modèle de régression linéaire simple ne contient qu'une seule variable indépendante. Comme il est excessivement rare, voire impossible, de prédire un phénomène à l'aide d'une seule variable, cette section porte sur la régression linéaire multiple. Cependant, tout le contenu s'applique également aux résultats d'une régression simple

b. Equation

Les modèles de régressions linéaires multiples sont ainsi définis par l'équation

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \dots + \beta_p X_{ip} + \epsilon_i$$

Avec :

- ✓ Y_i : les réponses (variable dépendante) observées,
- ✓ i : l'indice des observations,
- ✓ X_{ij} : les valeurs observées des j ($=1$ à p) variables indépendantes,
- ✓ β_p : les paramètres inconnus des modèles, et qui vont être estimés, parfois appelés "pentes partielles",
- ✓ ϵ_i : les résidus,

c. Conditions d'application

Quatre conditions doivent être respectées :

- **Linéarité** des relations entre la réponse et les variables prédictives (utilisation d'une transformation si besoin)

- **Normalité** des résidus
- **Homoscédasticité** des résidus
- **Absence de multicollinéarité** (forte corrélation linéaire) entre les variables prédictives.

d. Avantages et inconvénients

L'analyse des données à l'aide d'un modèle de régression multiple présente deux avantages principaux. Le premier est la capacité de déterminer l'influence relative d'une ou plusieurs variables prédictives sur la valeur du critère. Le deuxième avantage est la capacité d'identifier les valeurs aberrantes ou les anomalies.

D'après Casagrande (2008) et Valantin-Morison & Meynard (2008) 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.

2. Path Analysis

a. Définition

L'analyse conventionnelle par le coefficient de pistes ou analyse de pistes causales, ou dite encore, analyse de parcours (path analysis), est basée sur la régression partielle standardisée (Samonte et al., 1998). Dogan, (2009) a rapporté qu'elle permet d'étudier les relations entre l'ensemble de variables dont certaines sont considérées comme dépendantes et d'autres comme indépendantes et de diviser les coefficients de corrélation en effets directs et effets indirects.

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

b. Avantages

Cette méthode a l'avantage de montrer l'influence d'une variable indépendante sur une ou plusieurs variables dépendantes et de tester l'influence de certaines variables dépendantes sur d'autres variables dépendantes.

Ainsi, elle permet d'estimer les effets directs et indirects et de mesurer l'importance relative des facteurs étudiés (Dewery et Lu, 1959). Cette méthode statistique, jugée la plus fiable, a été

largement utilisée dans les programmes de sélection variétale pour déterminer la nature des relations entre le rendement en graines et ses composantes et identifier celles qui ont des effets significatifs sur le rendement à fin de les exploiter comme critères de sélection pour l'amélioration du rendement des cultures, notamment, le maïs (Mohammadi et al., 2003) et (Sadek et al., 2006), le riz (Surek et Beser, 2003), l'arachide (Pathirana, 1993), le soja (Arshad et al., 2006), et le pois chiche (Ali, et Tahir, 1999; Saleem et al., 1999; Noor et al., 2003; Arshad et al., 2004; Talebi et al., 2007).

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

PARTIE 2

MATERIEL ET METHODES

I. But de ce travail

Le présent travail a pour objectif, d'analyser et d'évaluer certains paramètres morphologiques, afin de mettre en évidence l'effet de l'irrigation d'appoint et du génotype sur la production de fève et de féverole.

II. Site expérimental

La présente étude a été 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) (Figure 9).

Il est géographiquement situé à une latitude de 34°02'N, et une longitude de 5°07'W. Il s'agit d'un domaine expérimental implanté en zone Bour favorable de la plaine du Sais. La superficie totale est de 440 ha dont 430 ha de superficie agricole utile. L'altitude s'élève à 416m.



Figure 9 : Localisation du site d'expérimentation

III. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans notre étude est constitué de 6 variétés (quatre fèves et deux féveroles) de *Vicia faba* L.

Le nom et les caractéristiques de ces variétés sont résumés dans le tableau suivant (Tableau 2) :

Tableau 2 : Noms et caractéristiques des variétés testées

Variétés	Nom	Caractéristiques	Fève /fèverole
V1	Aguadulce	Variété à très longue gousse est une plante vigoureuse et productive à larges gousses de 2 cm et atteignant environ 35 à 40 cm de long. Les gousses renferment 7 à 9 grains assez volumineux et charnus.	Fève
V2	Extra Hative	Variété donnant des gousses d'environ 24 à 26 cm contenant de gros grains blancs. Sensible aux fortes gelées.	Fève
V3	Hiba	Variété Productive et moyennement résistantes au botrytis d'une forme Aplatie et a une réaction modérée à l'antracnose, sa floraison et maturité sont moyennement précoces et ses gousses sont retombantes et à déhiscence faible.	Fève
V4	Defes	Variété à courte ou moyenne gousse et forme moyennement incurvée, les graines sont petites aplaties Variété à demi précoce a demi tardive maturité.	Fève
V5	Alfia17	Variété à courte gousse et moyenne longueur de foliole.	Fèverole
V6	Zina	Variété Productive, moyennement résistantes au botrytis et possède une floraison et une maturité semi-précoces. Ses gousses sont semi-dressées et à déhiscence moyenne.	Fèverole

IV. Données pédoclimatiques de la station expérimentale

Il s'agit d'un sol argilo-calcaire, très fertile et bien profond. La pluviométrie moyenne est de 510 mm.

La température est de type méditerranéen à hivers froids et à étés chauds et secs. La température maximale de 46 °C, température minimale de 5°C. La température moyenne varie de 10 à 27°C. La campagne agricole de cette année, présentent les meilleures conditions pour une évolution positive et un bon développement des légumineuses (Figure 10). De fortes pluies

sont enregistrées au mois de Mars 2022. Janvier est le mois au cours duquel de faibles précipitations sont enregistrées (20 mm).

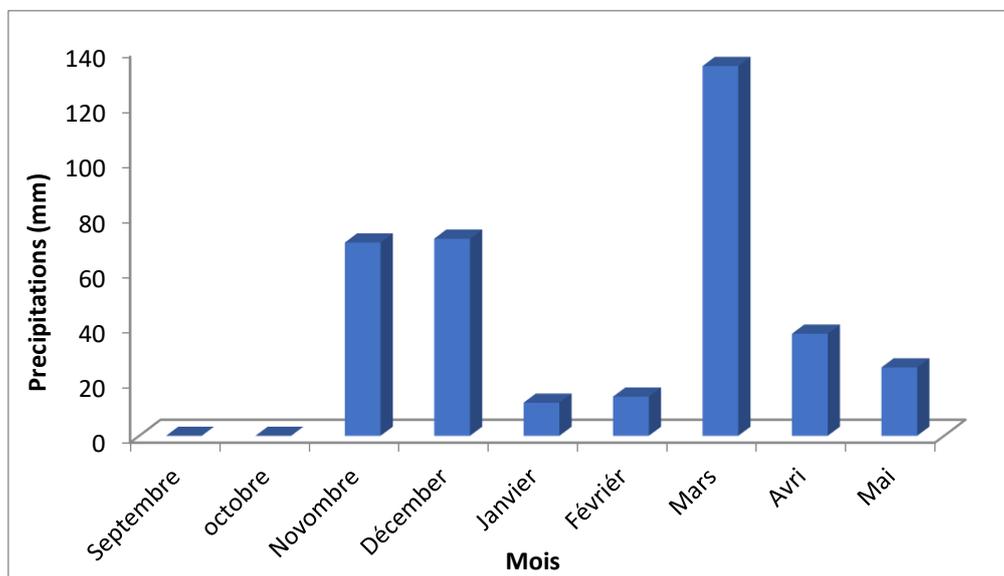


Figure 10 : Variation des précipitations au niveau du Domaine Expérimental de Douyet, durant la campagne 2021-2022.

V. Protocole expérimental

1. Itinéraire technique

L’itinéraire technique utilisé (Tableau 3) pendant notre parcelle expérimentale est comme suit :

Tableau 3 : Itinéraire technique INRA pour le traitement irrigation

Opération	Date
Labour profonds 3 disque	19-10-2021
Cover-crop	02-11-2021
Epandage d’engrais	08-12-2021
Enfouissement d’engrais	11-12-2021
Semis manuel	14-12-2021
Binage Désherbage	11-02-2022

Binage Désherbage	12-02-2022
Binage Désherbage	14-02-2022
Fertilisation organique (biostimulant)	23-02-2022
Installation irrigation	06-04-2022
Découpage des allées	29-04-2022

2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental en split plot est installé dans cette étude avec un traitement d'irrigation d'appoint (I1, I2 et témoins) en grande parcelle et un traitement variétés en petites parcelles avec deux répétitions.

La parcelle élémentaire consiste en six lignes de 4 m de long par variété. Les allées entre les répétitions sont de 3 m et l'interligne est de 0,60 m (Figure 11).

Dans le traitement I1, la quantité d'eau apportée à la floraison est de 53 mm. Alors que pour I2, la quantité d'eau apportée à la floraison est de 106 mm. Le témoin est sans apport d'eau.

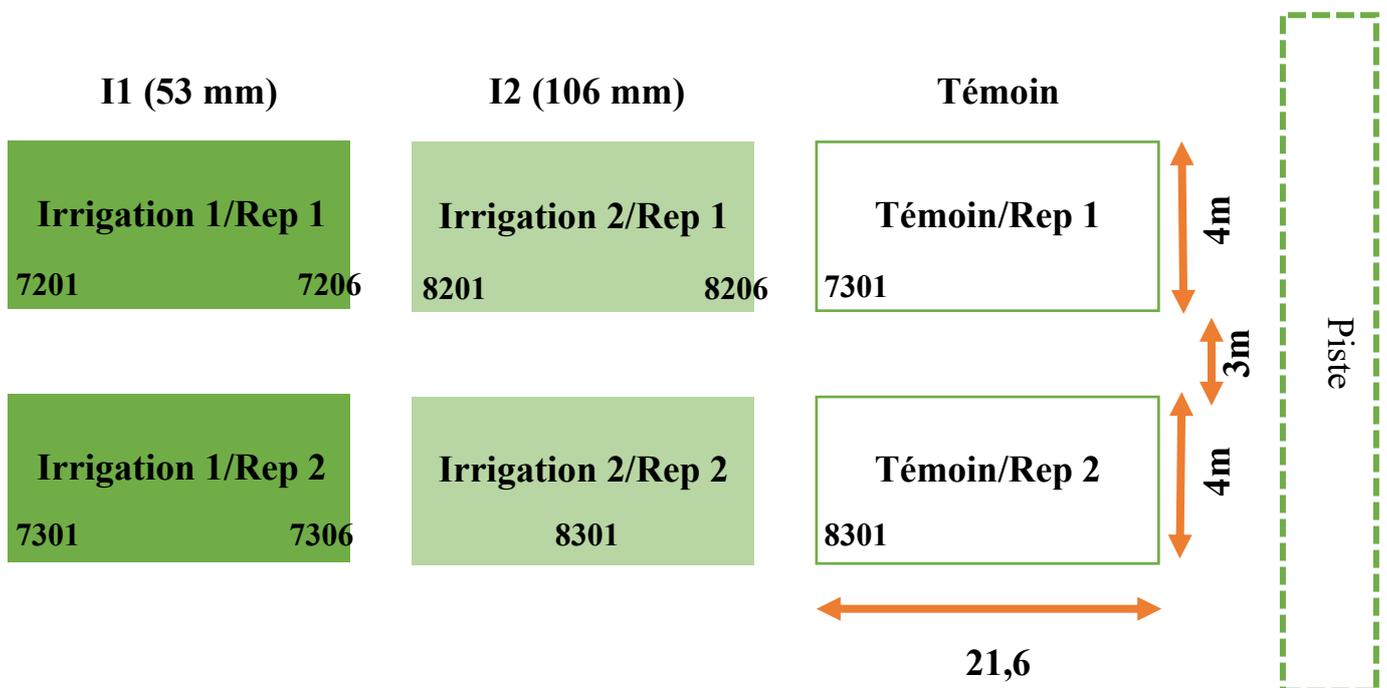


Figure 11 : Plan de la parcelle d'expérimentation.

3. Données expérimentales

Sur cinq plantes prises au hasard au niveau de chaque variété, les composantes du rendement suivantes ont été mesurées pour chaque plante :

- ✓ Hauteur de la plante (en cm) : au stade de maturité physiologique. Elle est mesurée de la base au sommet de la plante par un mètre ruban ;
- ✓ Diamètre de la tige principale (en mm) : elle est mesurée entre le 1^{er} et le 2^{eme} nœud par un pied à coulisse (Figure 12) ;



Figure 12 : Pied à coulisse

- ✓ Nombre de tiges totales ;
- ✓ Rang du premier nœud fructifère ;
- ✓ Nombre de gousses par tige principale ;
- ✓ Nombre de gousses par tige secondaire ;
- ✓ Nombre de graines par tige principale ;
- ✓ Nombre de graines par tige secondaire ;
- ✓ Poids de graines de la tige principale et de la tige secondaire (en g): ce poids est mesuré par une balance électrique.

4. Analyses de données

Les données recueillies ont été soumises à une modélisation à l'aide de la régression linéaire multiple et le modèle de cheminement ou Path Analysis qui est réalisée par le module Lavaan sous le logiciel R (Rossel, 2012).

PARTIE 3

RESULTATS ET DISCUSSIONS

I. Régression linéaire entre les composantes de rendement

1. Témoin

Vu que toutes les variables, à l'exception du nombre de tiges, présentent une tendance linéaire avec le rendement, nous avons opté pour la régression linéaire multiple.

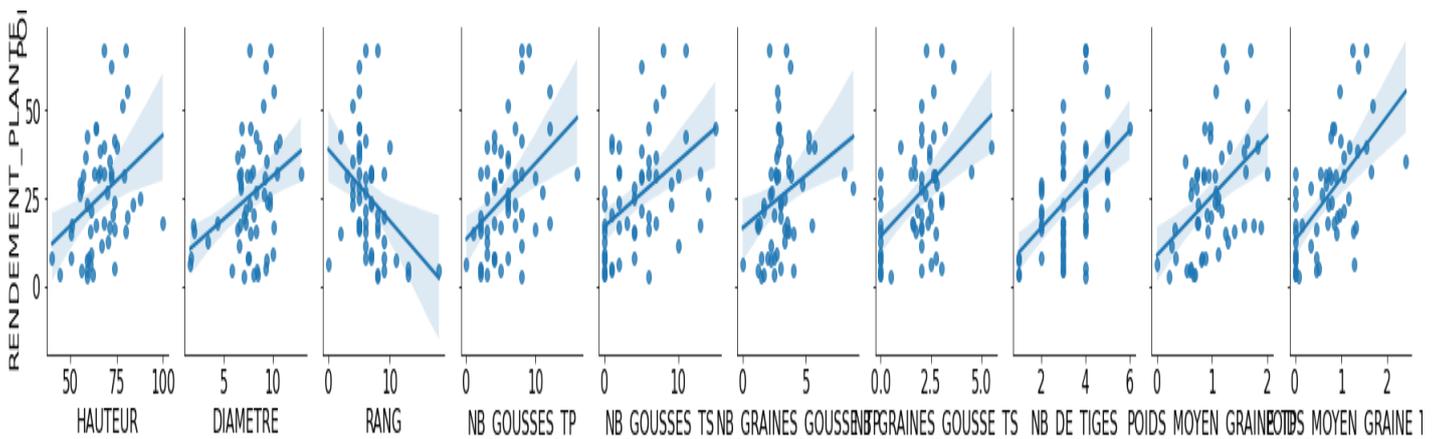


Figure 13 : Diagrammes de distribution des différents paramètres relativement au rendement

Nous avons établi un modèle de régression linéaire multiple entre le rendement en fonction de la hauteur, diamètre, rang, nombre de gousses TP, nombre de gousses TS, nombre grains gousse TP, nombre grains gousse TS, nombre de tiges, poids moyen graine TP, poids moyen graine TS. (Modèle de départ) (Tableau 4)

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.

Tableau 4 : Résultat de la régression linéaire multiple du modèle de départ

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-19.5273	8.281	-2.358	0.023	-36.206	-2.848
HAUTEUR	-0.0978	0.120	-0.816	0.419	-0.339	0.144
DIAMETRE	-0.1539	0.531	-0.290	0.773	-1.224	0.916
RANG	0.0401	0.436	0.092	0.927	-0.837	0.917
NB_GOUSSSES_TP	2.3231	0.400	5.813	0.000	1.518	3.128
NB_GOUSSSES_TS	0.8197	0.356	2.305	0.026	0.103	1.536
NB_GRAINES_GOUSSSE_TP	3.4730	0.810	4.289	0.000	1.842	5.104
NB_GRAINES_GOUSSSE_TS	-0.0693	1.372	-0.051	0.960	-2.832	2.693
NB_DE_TIGES	1.2317	1.325	0.929	0.358	-1.437	3.901
POIDS_MOYEN_GRAINE_TP	11.5442	2.850	4.050	0.000	5.803	17.285
POIDS_MOYEN_GRAINE_TS	13.1196	3.126	4.196	0.000	6.823	19.416

Dans notre cas, il s'agit d'éliminer le nombre graines gousse TS qui possède la plus grande valeur P égale à « 0,960 », nous procédons de la sorte jusqu'à ce que toutes les variables aient une valeur p significative (<0,05).

Finalement, nous avons obtenu le modèle final incluant le nombre de gousses TP, le nombre de gousses TS, le nombre de graines gousse TP, le poids moyen graine TP et le poids moyen graine TS. (Tableau 5)

Tableau 5 : Résultat de la régression linéaire multiple du modèle final

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-22.5433	3.938	-5.724	0.000	-30.454	-14.633
NB_GOUSSSES_TP	2.1939	0.348	6.302	0.000	1.495	2.893
NB_GOUSSSES_TS	1.0209	0.273	3.744	0.000	0.473	1.569
NB_GRAINES_GOUSSE_TP	3.3111	0.746	4.438	0.000	1.813	4.810
POIDS_MOYEN_GRAINE_TP	11.7944	2.514	4.692	0.000	6.745	16.844
POIDS_MOYEN_GRAINE_TS	12.5724	1.997	6.297	0.000	8.562	16.583

Ainsi, l'équation de régression linéaire multiple est :

$$Y = -22.5432 + 2.1938 \text{ NGTP} + 1.0209 \text{ NGTS} + 3.3110 \text{ NGGTP} + 11.7944 \text{ PMGTP} + 12.5724 \text{ PMGTS}$$

❖ Dont :

- **NGTP** : nombre de gousses TP
- **NGTS** : nombre de gousses TS
- **NGGTP** : nombre graines gousse TP
- **PMGTP** : poids moyen graine TP
- **PMGTS** : poids moyen graine TS

Avec $R^2 = 0,799$; donc notre modèle retenu explique un peu près de 80% de la variabilité du rendement par plante.

✓ Vérification des hypothèses du modèle de régression retenu

1- La variance résiduelle doit être constante :

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

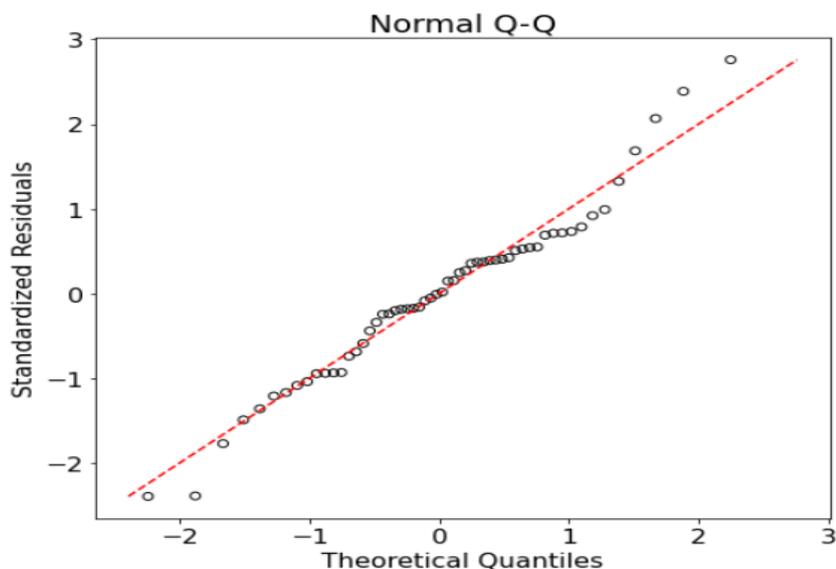


Figure 14 : Diagramme de dispersion des résiduelles standardisées en fonction du rendement prédit standardisé

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

La figure 15 nous montre que les valeurs résiduelles standardisées suivent une distribution normale.

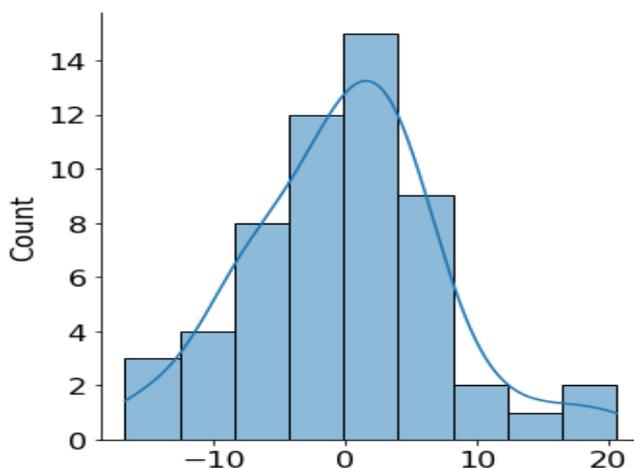


Figure 15 : Distribution de fréquence des valeurs résiduelles standardisées

Donc, ces deux conditions étant satisfaites pour dire que le modèle retenu est validé.

2. Irrigation 1

Nous avons construit un modèle de régression linéaire multiple du rendement en fonction de la hauteur, diamètre, rang, nombre de gousses TP, nombre de gousses TS, nombre graines gousses TP, nombre graines gousses TS, nombre de tiges, poids moyen graine TP, poids moyen graine TS. (Modèle de départ) (Tableau 6)

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.

Tableau 6 : Résultat de la régression linéaire multiple du modèle de départ

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-16.4538	3.146	-5.230	0.000	-22.847	-10.060
HAUTEUR	0.0086	0.039	0.223	0.825	-0.070	0.087
DIAMETRE	0.0101	0.200	0.051	0.960	-0.396	0.416
RANG	-0.1184	0.177	-0.668	0.508	-0.478	0.242
NB_GOUSSES_TP	2.0665	0.231	8.927	0.000	1.596	2.537
NB_GOUSSES_TS	1.2542	0.196	6.400	0.000	0.856	1.652
NB_GRAINES_GOUSSE_TP	3.4096	0.514	6.632	0.000	2.365	4.454
NB_GRAINES_GOUSSE_TS	0.4757	0.356	1.337	0.190	-0.248	1.199
NB_DE_TIGES	0.1175	0.404	0.291	0.773	-0.704	0.939
POIDS_MOYEN_GRAINE_TP	8.2932	2.240	3.702	0.001	3.740	12.846
POIDS_MOYEN_GRAINE_TS	2.5386	1.809	1.403	0.170	-1.138	6.215

Dans ce cas, on va éliminer le diamètre qui possède la plus grande valeur P égale à « 0,960 », nous procédons de la sorte jusqu'à ce que toutes les variables aient une valeur p moins de 0,05.

Donc, nous avons obtenu le modèle final incluant le nombre de gousses TP, le nombre de gousses TS, le nombre de graines gousse TP, le nombre de graines gousse TS et le poids moyen graine TP. (Tableau 7)

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

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-16.6915	2.202	-7.579	0.000	-21.146	-12.237
NB_GOUSSES_TP	2.0323	0.215	9.471	0.000	1.598	2.466
NB_GOUSSES_TS	1.3921	0.142	9.774	0.000	1.104	1.680
NB_GRAINES_GOUSSE_TP	3.3702	0.457	7.376	0.000	2.446	4.294
NB_GRAINES_GOUSSE_TS	0.8124	0.215	3.776	0.001	0.377	1.248
POIDS_MOYEN_GRAINE_TP	9.1913	1.784	5.152	0.000	5.583	12.800

Ainsi, l'équation de régression linéaire multiple est :

$$Y = -16.6915 + 2.0323 \text{ NGTP} + 1.3923 \text{ NGTS} + 3.3702 \text{ NGGTP} + 0.8124 \text{ NGGTS} + 9.1913 \text{ PMGTP}$$

❖ Dont :

- **NGTP** : nombre de gousses TP
- **NGTS** : nombre de gousses TS
- **NGGTP** : nombre graines gousse TP
- **NGGTS** : nombre graines gousse TS
- **PMGTS** : poids moyen graine TS

Avec $R^2 = 0,879$; donc notre modèle retenu explique 87% de la variabilité du rendement par plante.

✓ 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 reste constante.

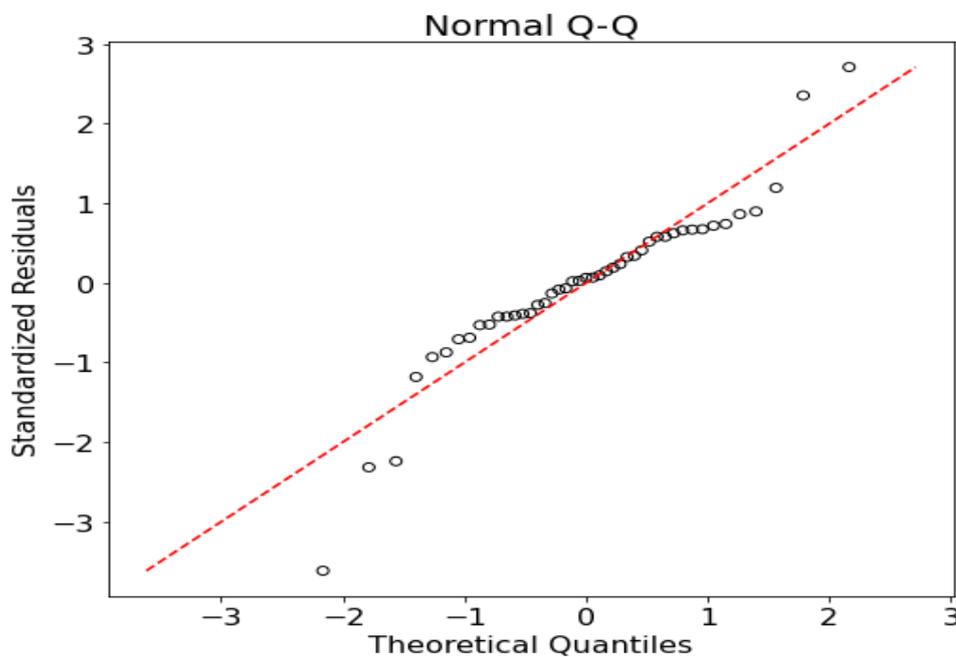


Figure 16 : Diagramme de dispersion des résiduelles standardisées en fonction du rendement prédit standardisé

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

La figure 17 nous montre que les valeurs résiduelles standardisées suivent une distribution normale.

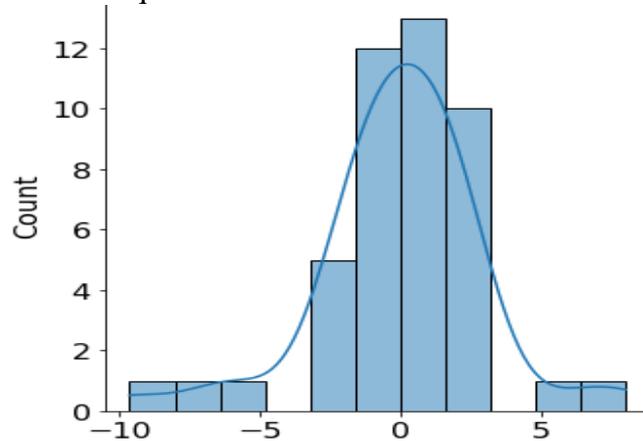


Figure 17 : Distribution de fréquence des valeurs résiduelles standardisées

Donc, d'après ces deux paramètres on peut constater que le modèle retenu est validé.

3. Irrigation 2

Vu que toutes les variables, à l'exception du nombre de tiges, présentent une tendance linéaire avec le rendement, nous avons opté pour la régression linéaire multiple.

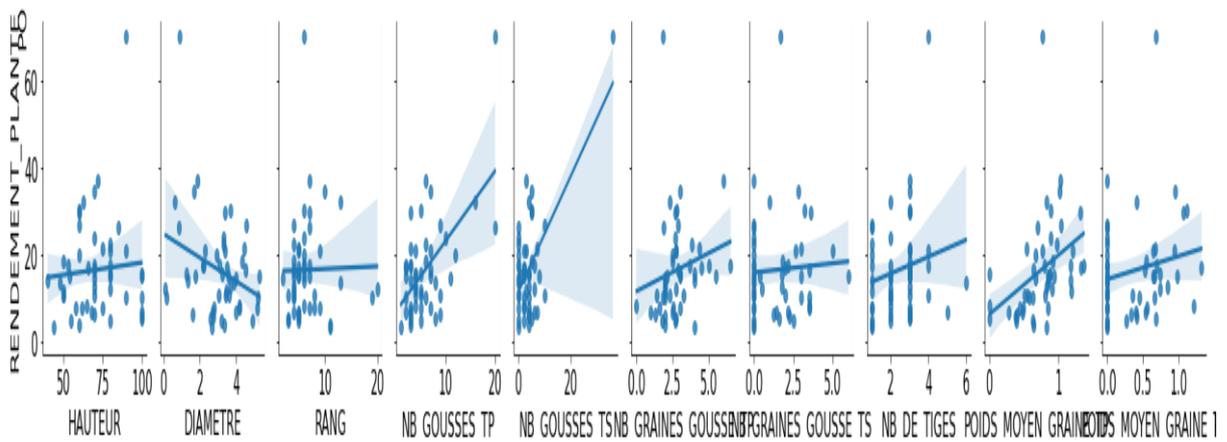


Figure 18 : Diagrammes de distribution des différents paramètres relativement au rendement

Nous avons établi un modèle de régression linéaire multiple entre le rendement en fonction de la hauteur, diamètre, rang, nombre de gousses TP, nombre de gousses TS, nombre graines

gousse TP, nombre graines gousse TS, nombre de tiges, poids moyen graine TP, poids moyen graine TS. (Modèle de départ) (Tableau 8)

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.

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

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-18.0408	6.345	-2.843	0.007	-30.885	-5.197
HAUTEUR	-0.0181	0.049	-0.371	0.713	-0.117	0.081
DIAMETRE	0.1490	0.745	0.200	0.842	-1.358	1.656
RANG	0.0870	0.240	0.363	0.719	-0.399	0.573
NB_GOUSSES_TP	1.6941	0.217	7.810	0.000	1.255	2.133
NB_GOUSSES_TS	0.9287	0.163	5.694	0.000	0.599	1.259
NB_GRAINES_GOUSSE_TP	3.3433	0.779	4.291	0.000	1.766	4.921
NB_GRAINES_GOUSSE_TS	0.8508	0.789	1.079	0.288	-0.746	2.447
NB_DE_TIGES	0.4866	0.723	0.673	0.505	-0.978	1.951
POIDS_MOYEN_GRAINE_TP	10.7694	2.807	3.836	0.000	5.086	16.453
POIDS_MOYEN_GRAINE_TS	3.4459	3.226	1.068	0.292	-3.086	9.977

On va éliminer le diamètre qui possède la plus grande valeur P égale à « 0,842 », nous procédons de la sorte jusqu'à ce que toutes les variables aient une valeur p significative (<0,05).

Finalement, nous avons obtenu le modèle final incluant le nombre de gousses TP, le nombre de gousses TS, le nombre de graines gousse TP, le poids moyen graine TP et le poids moyen graine TS. (Tableau 9)

Tableau 9 : Résultat de la régression linéaire multiple du modèle final

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-16.5403	2.777	-5.957	0.000	-22.140	-10.941
NB_GOUSSES_TP	1.6132	0.194	8.334	0.000	1.223	2.004
NB_GOUSSES_TS	1.0018	0.140	7.150	0.000	0.719	1.284
NB_GRAINES_GOUSSE_TP	3.0227	0.676	4.469	0.000	1.659	4.387
NB_GRAINES_GOUSSE_TS	1.5446	0.471	3.279	0.002	0.595	2.494
POIDS_MOYEN_GRAINE_TP	11.9965	2.437	4.923	0.000	7.082	16.911

Ainsi, l'équation de régression linéaire multiple est :

$$Y = -16.5403 + 1.6132 \text{ NGTP} + 1.0018 \text{ NGTS} + 3.0227 \text{ NGGTP} + 1.5446 \text{ NGGTS} + 11.9965 \text{ PMGTP}$$

❖ Dont :

- **NGTP** : nombre de gousses TP
- **NGTS** : nombre de gousses TS
- **NGGTP** : nombre graines gousse TP
- **NGGTS** : nombre graines gousse TS
- **PMGTS** : poids moyen graine TS

Avec $R^2 = 0,847$; donc notre modèle retenu explique 84% de la variabilité du rendement par plante.

✓ Vérification des hypothèses du modèle de régression retenu

1- La variance résiduelle doit être constante :

Donc les mêmes conditions de validité du modèle, il faut que quand le rendement prédit standardisé augmente, la variance des résiduelles standardisées doit rester constante.

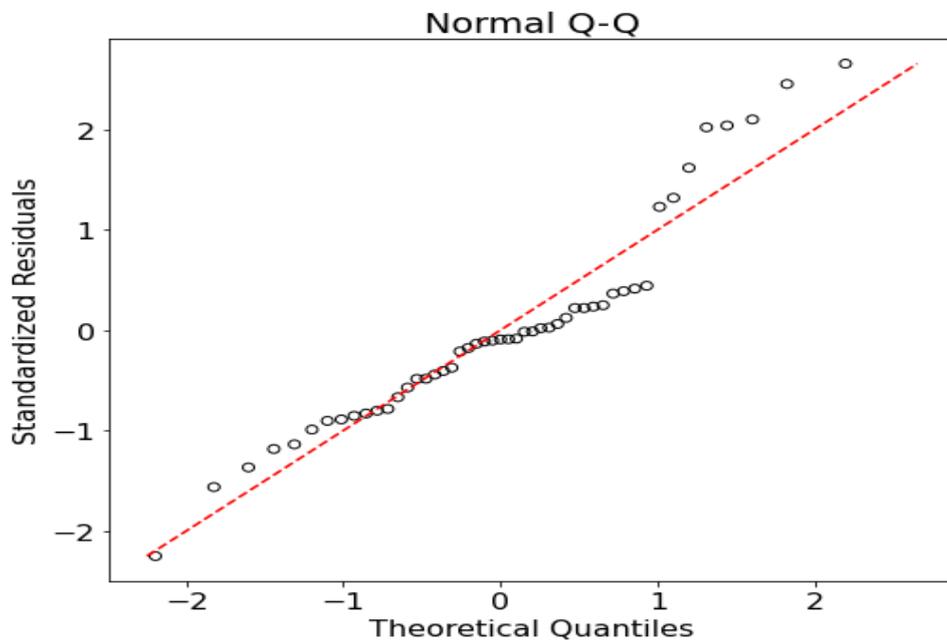


Figure 19 : Diagramme de dispersion des résiduelles standardisées en fonction du rendement prédit standardisé

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

La figure 20 nous montre que les valeurs résiduelles standardisées suivent une distribution normale.

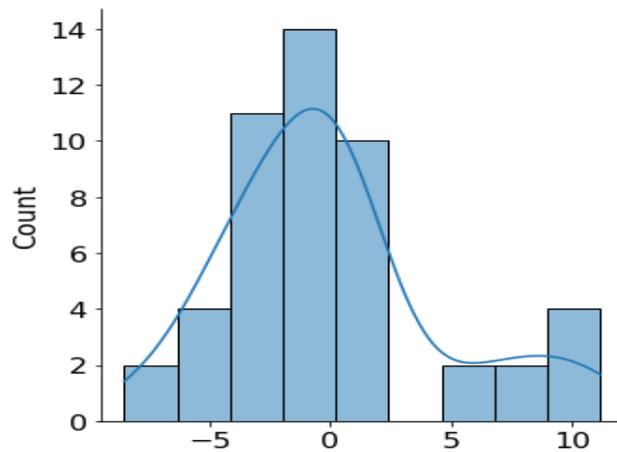


Figure 20 : Distribution de fréquence des valeurs résiduelles standardisées

Donc, ces deux conditions étant satisfaites pour dire que le modèle retenu est validé.

II. PATH ANALYSIS

❖ Modèle postulé

Dans notre étude, le module postulé pour les trois traitements (témoin, I₁ et I₂) est réalisé sous la forme d'un diagramme de cheminement (Figure 21), fondé sur les données statistiques effectuées durant la période 2021-2022. Selon ce modèle théoriquement plausible, le rendement par plante est prédit par les variables indiquées dans la figure 21.

Deux types de variables sont incorporés dans notre modèle, à savoir les variables exogènes et les variables endogènes.

- ✓ **Les variables exogènes** : sont des variables indépendantes, sans variable causale. De ce fait, elles ne peuvent pas être affectées par aucune variable dans le modèle, mais peuvent affecter certaines. Dans notre cas, ces variables sont :
 - Hauteur TP ;
 - Diamètre TP ;
 - Nombre de tiges totales.
 - Rang du premier nœud fructifère TP ;
- ✓ **Les variables endogènes** : conditionnées entre autres par les variables exogènes, à savoir :

- Nombre de gousses par TP ;
- Nombre de gousses par TS ;
- Nombre de graines par TP ;
- Nombre de graines par TS ;
- Poids moyen graine TP ;
- Poids moyen graine TS ;
- Rendement par plante.

Le modèle a également pris en compte l'impact des facteurs incontrôlables sur la formation des variables endogènes. Cet effet est inclus sur le diagramme sous forme de résidus, marqués par ϵ_1 à ϵ_7 (Figure 21).

Ainsi, les flux de causalité entre les différentes variables sont représentés par des flèches allant de gauche à droite, et leurs coefficients standardisés sont représentés par la lettre « a ».

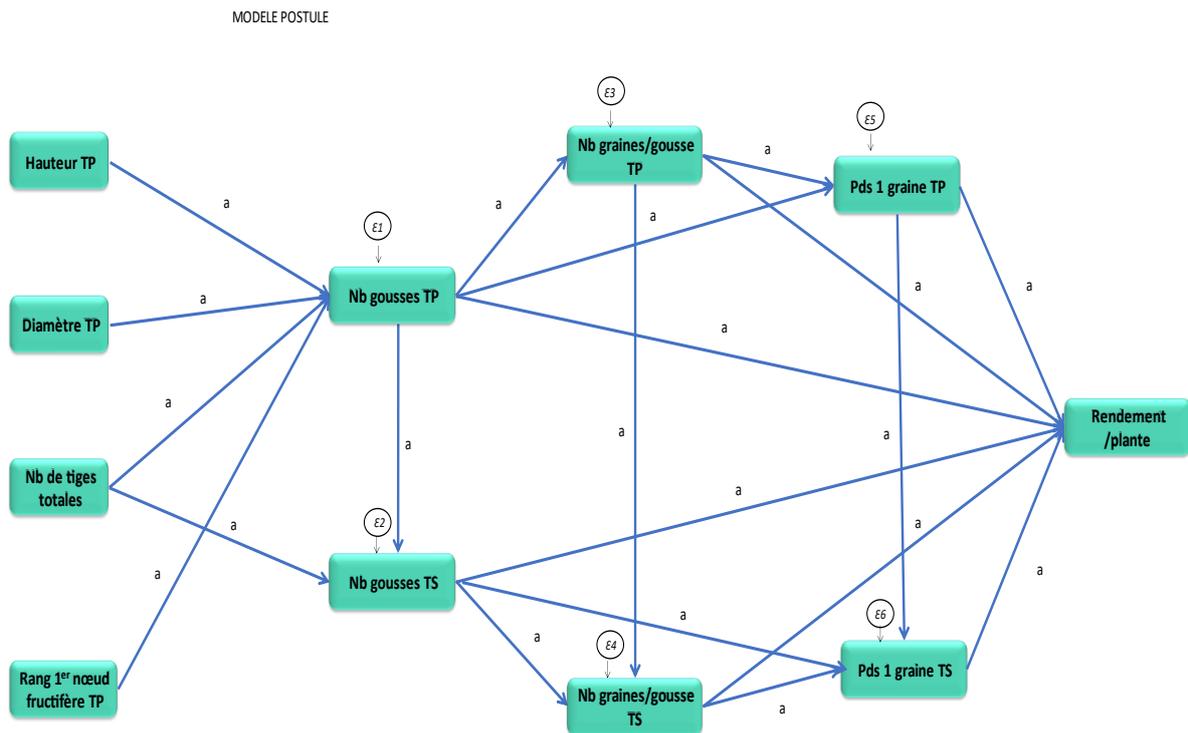


Figure 21 : Modèle initial postulé pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez *Vicia faba* L.

—> : Flux de causalité entre les variables ; a : coefficient standardisé avant le calcul

- *** : Flux de causalité très hautement significatif ; ** : Flux de causalité hautement significatif ; * : Flux de causalité significatif ; NS : Flux de causalité non significatif).

Le diagramme Path Analysis (Figure 22), établi après le calcul des coefficients standardisés (a), et des coefficients de détermination R^2 , nous permet d'estimer la significativité des flux de causalité entre les différentes variables :

⇒ Effet direct très hautement significatif

- Le poids d'une graine par tige principale
 - Le poids d'une graine par tige secondaire
 - Le nombre de graines/gousse par tige principale
 - Le nombre de gousses par tige principale
 - Le nombre de gousse par tige secondaire
- Ont un effet direct positif très hautement significatif sur le rendement par plante, respectivement de 0,324*** ; 0,415*** ; 0,306*** ; 0,431*** ; 0,254***.
- Le nombre de graines/gousse par tige secondaire a un effet direct positif très hautement significatif (a = 0,694***) sur le poids d'une graine par tige secondaire.
 - Le nombre de tiges totales à un effet direct positif très hautement significatif (a= 0,519***) sur le nombre de gousses par tige secondaire.

⇒ Effet direct hautement significatif

- Le nombre de gousses par tige secondaire a un effet direct positif hautement significatif (a= 0,378**) sur le nombre de graines/gousse par tige secondaire.

⇒ Effet direct significatif

- Le poids d'une graine par tige principale a un effet significatif (a = 0,202*) sur le poids d'une graine par tige secondaire.
- Le nombre de graines/gousse par tige principale a un effet significatif (0,307*) sur le poids d'une graine par tige principale.
- Le nombre de gousses par tige principale a un effet significatif (-0,286*) sur le nombre de graines/gousse par tige principale.

⇒ Effet direct non significatif

Notre étude nous a permis de mettre en évidence des effets de causalité non significatifs entre :

- Le nombre de graines/gousse par tige secondaire et le rendement par plante (a= 0,018 NS).
- Le nombre de graines/gousse par tige principale et le nombre de graines/gousse par tige secondaire (a= 0,065 NS).

- Le nombre de gousses par tige principale et le nombre de gousses par tige secondaire (a=0,163 NS).
- Le nombre de gousses par tige principale et le poids d'une graine par tige principale (a= 0,015 NS).
- Le nombre de gousses par tige secondaire et le poids d'une graine par tige secondaire (a= 0,032 NS).
- La hauteur et le nombre de gousses par tige principale (a= 0,246 NS).
- Le diamètre et le nombre de gousses par tige principale (a= 0,135 NS).
- Le nombre de tiges totales et le nombre de gousses par tige principale (a= 0,075 NS).
- Le rang du 1er nœud fructifère tige principale et le nombre de gousses par tige principale (a= -0,084 NS).

Ainsi, le coefficient de détermination R^2 est le rapport de la variance expliquée par le modèle, sur la variance totale, il 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 **$R^2=0,801$** nous permet d'affirmer que la causalité entre, d'une part le poids d'une graine par tige principale, le poids d'une graine par tige secondaire, le nombre de graines/gousse par tige principale, le nombre de gousses par tige principale, le nombre de gousse par tige secondaire et le rendement par plante d'autre part, explique 80 % de la variabilité totale dans notre expérimentation.

Le nombre de graines/gousse par tige principale permet d'expliquer 9 % de la variabilité total du poids d'une graine par tige principale. Alors que le nombre de graines/gousse par tige secondaire explique 54% du poids d'une graine par tige secondaire.

Malgré la signification des effets de causalité entre les autres variables ils n'ont pas expliqué une part importante de la variabilité.

c. Analyse et interprétation de la médiation

En plus du flux de causalité direct entre les variables, nous avons aussi observé l'influence indirecte de certains paramètres mesurés entre eux et sur le rendement. Donc 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 la médiation, quand elle existe, est totale ou partielle ou bien non significatif. Cette analyse nous permettra une caractérisation détaillée des relations de notre modèle. A cet effet, et à partir du diagramme de cheminement adopté (Figure 23), nous allons tester le type de médiation par l'intermédiaire du module R.

➤ Hypothèse 1 :

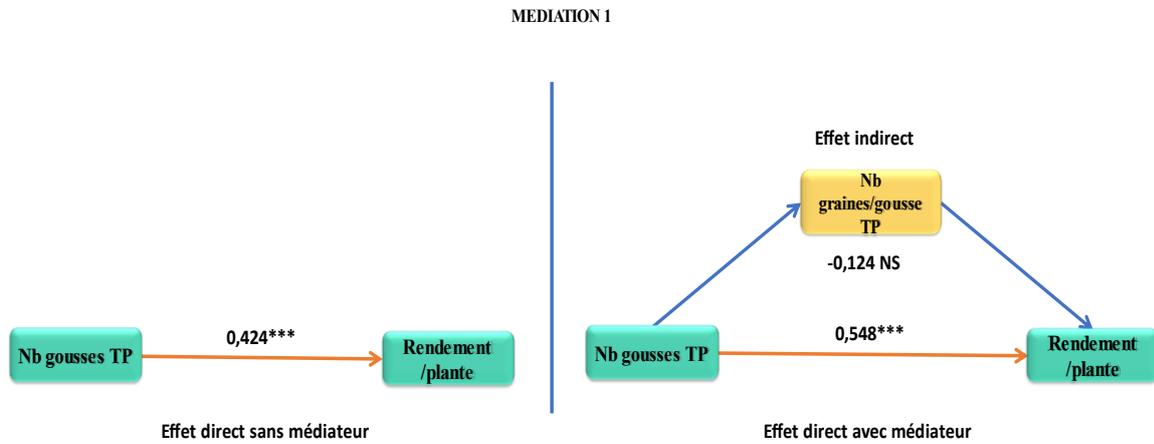


Figure 23 : Analyse du cheminement du nombre de gousses par TP sur le Rendement par plante via le médiateur nombre de graines/gousse par TP.

➤ Hypothèse 2 :

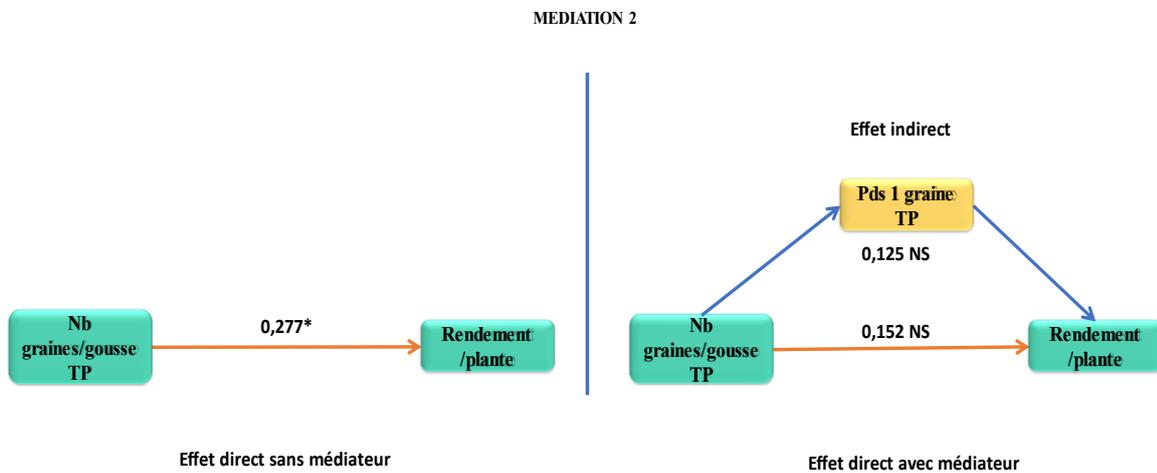


Figure 24 : Analyse du cheminement du nombre de graines/gousses par TP sur le Rendement par plante via le médiateur poids d'une graine par TP.

➤ **Hypothèse 3 :**

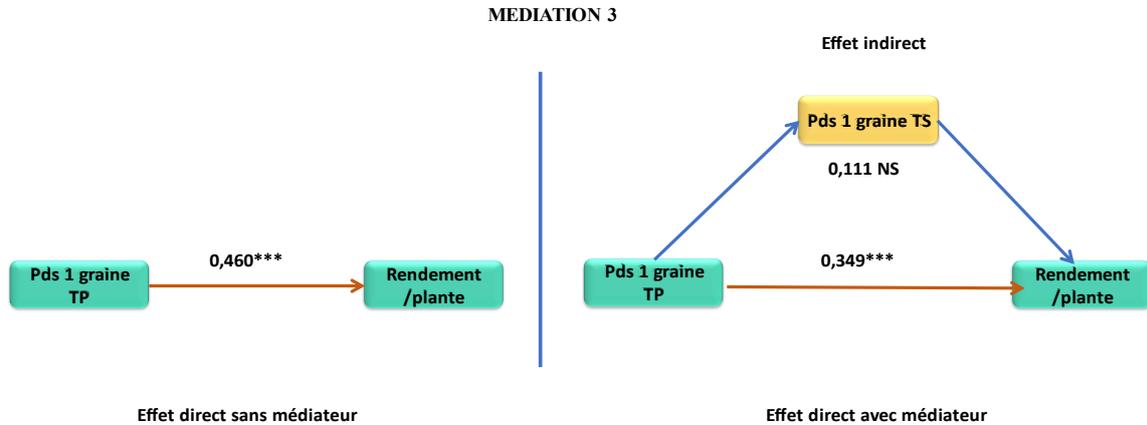


Figure 25 : Analyse du cheminement du poids d’une graine par TP sur le Rendement par plante via le médiateur poids d’une graine par TS.

Donc pour le modèle postulé témoin nous avons trois hypothèses possibles de médiation et on va constater à quel type appartient chacun de ces médiations dans le tableau ci-dessus (tableau 10).

Tableau 10 : Effets directs ou indirects et type de médiation du Path Analysis pour le rendement de la fève et ses composantes « Témoin »

Hypothèse		Effet direct sans médiateur	Effet direct avec médiateur	Effet Indirect	Type de médiation
1	Nombre de graines/gousse par TP est le médiateur entre le nombre de gousses par TP et le rendement par plante	0,424***	0,548***	-0,124 NS	Pas de médiation
2	Le poids d’une graine par TP est le médiateur entre le nombre de graines/gousses par TP et le rendement par plante.	0,277*	0,152 NS	0,125 NS	Pas de médiation
3	Le poids d’une graine par TS est le médiateur entre le poids d’une graine par TP et le rendement par plante.	0,460***	0,349***	0,111 NS	Pas de médiation

Donc d'après ces résultats nous constatons que les trois médiations prises séparément une à une se sont révélées non significatives.

d. Modèle final témoin de la médiation Path Analysis du rendement

Le modèle final de la médiation Path Analysis retenu (Figure 26) est obtenu après élimination des chemins non significatifs.

Ce modèle final est considéré aussi comme valide, suite à une vérification du CFI qui est dans les normes : **CFI = 0,954**.

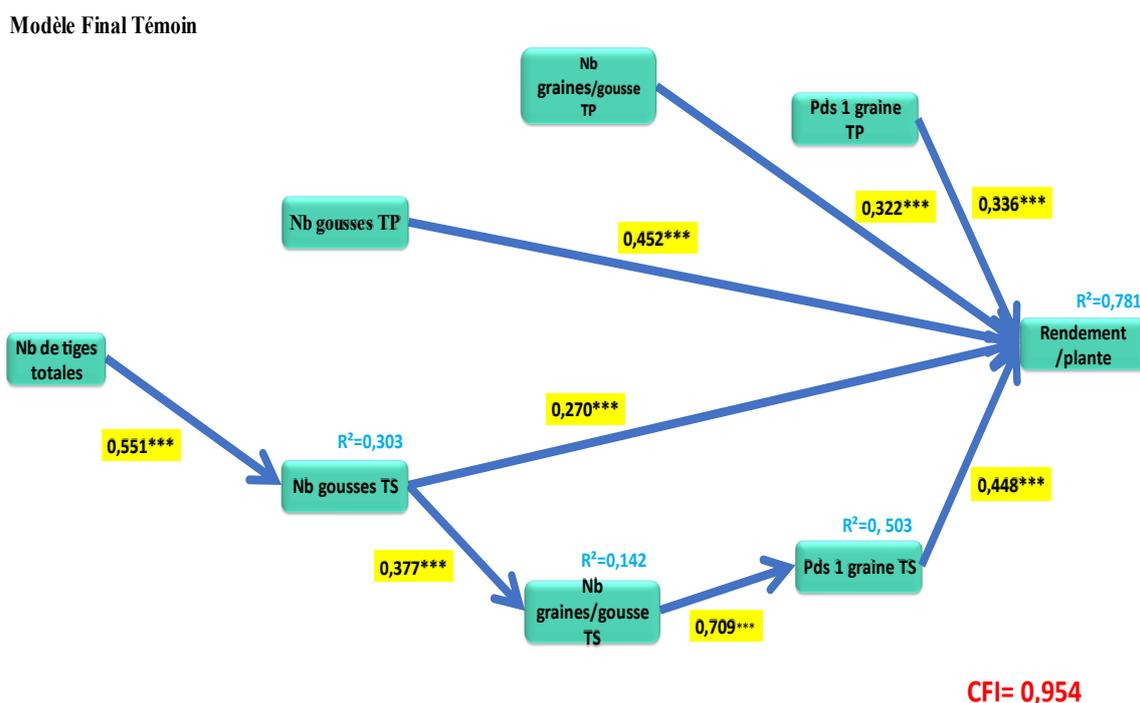


Figure 26 : Modèle final témoin du Path Analysis du rendement et ses composantes chez *Vicia faba L.*

Donc à partir de ce modèle final, nous pouvons constater :

- un flux de causalité direct très hautement significatif du poids d'une graine TP, du poids d'une graine TS, du nombre de grains/gousse TP, du nombre de gousses TP et du nombre de gousses TS sur le rendement par plante.
- un flux de causalité direct hautement significatif du nombre de grains/gousse TS sur le poids d'une graine TS.
- Un flux de causalité direct hautement significatif du nombre de gousses TS sur nombre de grains/gousse TS.
- Un flux de causalité direct hautement significatif du nombre de tiges totales sur le nombre de gousses TS.

Enfin et sur la base de l'analyse du modèle de cheminement illustré à la figure X, nous avons constaté, que les facteurs directs les plus importants déterminant le rendement par plante de *Vicia faba L.*, expliquent 78% de la variabilité totale, et sont :

- ❖ Poids d'une graine TP ;
- ❖ Poids d'une graine TS ;
- ❖ Nombre de graines/gousse TP ;
- ❖ Nombre de gousses TP ;
- ❖ Nombre de gousses TS ;

2. Path Analysis appliqué sur le traitement irrigation 1

a. Test de validité du modèle

Le modèle postulé pour le traitement d'irrigation I1 est bien accepté CFI=0,848. Après vérification de la validité du modèle, nous avons calculé les coefficients standardisés (a), ainsi que les coefficients de détermination R^2 . Le nouveau diagramme obtenu correspond à la figure 28.

b. Flux de causalité entre les différentes variables

Après vérification de la validité du modèle, nous avons calculé les coefficients standardisés (a), ainsi que les coefficients de détermination R^2 . Le nouveau diagramme obtenu correspond à la figure 27.

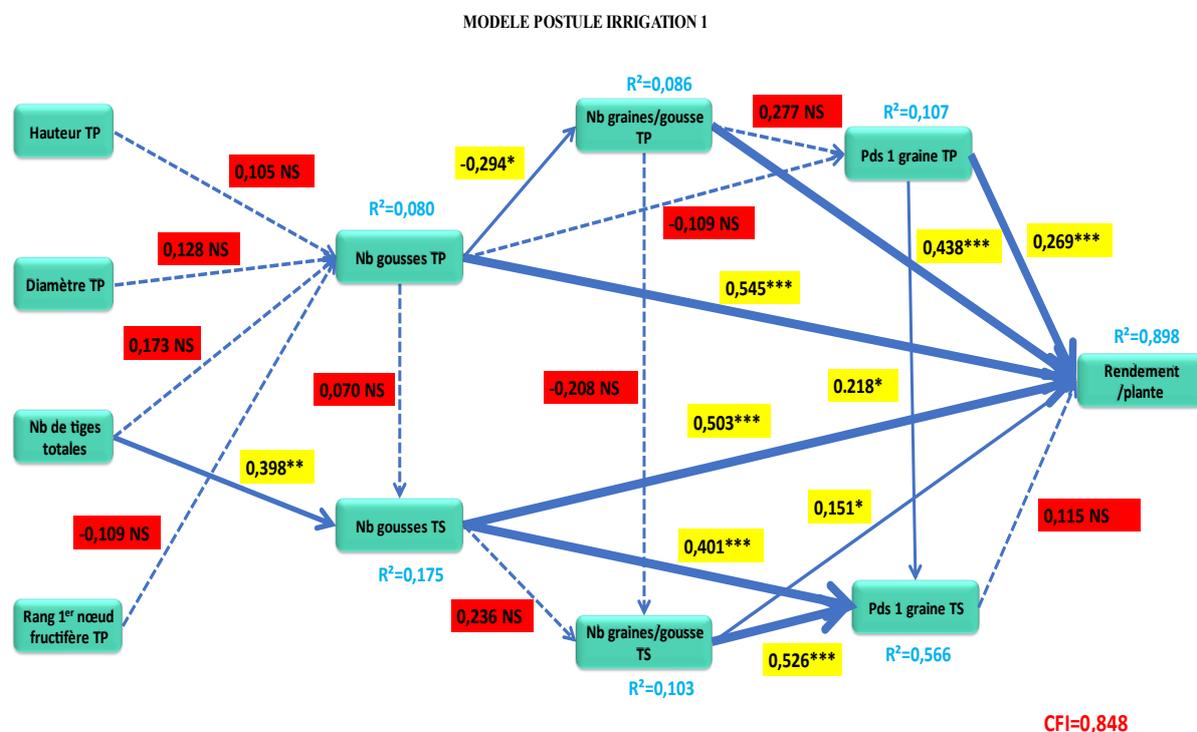


Figure 27 : Modèle postulé irrigation 1 pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez *Vicia faba L.*

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

Le flux de causalité entre les différentes variables est comme suit :

⇒ **Effet direct très hautement significatif**

- | | | |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Le poids d'une graine par tige principale ▪ Le nombre de graines/gousse par tige principale ▪ Le nombre de gousses par tige principale ▪ Le nombre de gousse par tige secondaire | } | <p>Ont un effet direct positif très hautement significatif sur le rendement par plante, respectivement de 0,269***; 0,438***; 0,545***; 0,503***.</p> |
|---|---|---|

- Le nombre de gousse par tige secondaire et le nombre de graines/gousse par tige secondaire ont un effet très hautement significatif sur le poids d'une graine par tige secondaire, respectivement de 0,401*** et 0,526***.

⇒ **Effet direct hautement significatif**

- Le nombre de tiges totales à un effet direct positif hautement significatif ($a = 0,398^{**}$) sur le nombre de gousses par tige secondaire.

⇒ **Effet direct significatif**

- Le poids d'une graine par tige principale a un effet significatif ($a = 0,218^*$) sur le poids d'une graine par tige secondaire.
- Le nombre de graines/gousse par tige secondaire a un effet significatif ($0,151^*$) sur le rendement par plante.
- Le nombre de gousses par tige principale a un effet significatif ($-0,294^*$) sur le nombre de graines/gousse par tige principale.

⇒ **Effet direct non significatif**

Cette étude nous a permis de mettre en évidence des effets de causalité non significatifs entre :

- Le poids d'une graine par tige secondaire et le rendement par plante ($a = 0,115$ NS).
- Le nombre de graines/gousse par tige principale et le poids d'une graine par tige principale ($a = 0,277$ NS).
- Le nombre de graines/gousse par tige principale et le nombre de graines/gousse par tige secondaire ($-0,208$ NS).

- Le nombre de gousses par tige principale et le poids d'une graine par tige principale (a= -0,109 NS).
- Le nombre de gousses par tige secondaire et le nombre de graines/gousse par tige secondaire (a= 0,236 NS)
- Le nombre de gousses par tige principale et le nombre de gousses par tige secondaire (a= 0,070 NS).
- La hauteur et le nombre de gousses par tige principale (a= 0,105 NS).
- Le diamètre et le nombre de gousses par tige principale (a= 0,128 NS).
- Le nombre de tiges totales et le nombre de gousses par tige principale (a= 0,173 NS).
- Le rang du 1er nœud fructifère tige principale et le nombre de gousses par tige principale (a= -0,109 NS).

Ainsi, le coefficient de détermination de la variable rendement par plante $R^2=0,898$ nous permet d'affirmer que la causalité entre, d'une part le poids d'une graine par tige principale, le nombre de graines/gousse par tige principale, le nombre de gousses par tige principale, le nombre de gousse par tige secondaire et le rendement par plante d'autre part, explique un peu près 90 % de la variabilité totale dans notre expérimentation.

Le nombre de graines/gousse par tige secondaire et le nombre de gousses par tige secondaire ont permis d'expliquer 56% du poids d'une graine par tige secondaire.

Pour les autres variables ils n'ont pas expliqué une part importante de la variabilité ($R^2=0,107$ $R^2=0,086$ $R^2=0,103$ $R^2=0,175$).

c. Analyse et interprétation de la médiation

Concernant l'irrigation 1 nous avons une seule hypothèse de médiation (Figure 28).

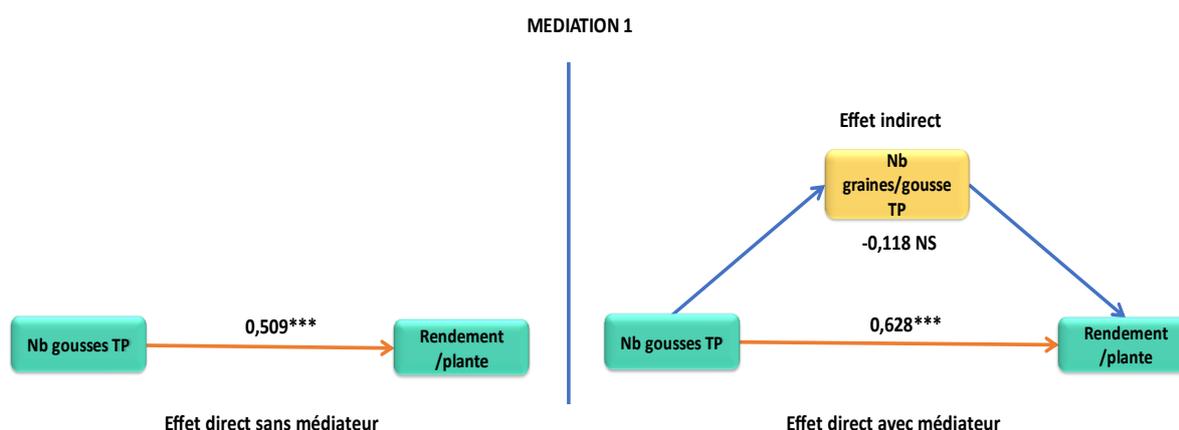


Figure 28 : Analyse du cheminement du nombre de gousses par TP sur le Rendement par plante via le médiateur nombre de graines/gousse par TP.

Le nombre de gousses TP a un effet direct significatif sur le rendement par plante dans les deux cas sans médiateur (0,509***) et avec médiateur (0,628***). Par contre le nombre de gousses TP a un effet indirect non significatif (-0,118 NS) sur le rendement par plante. A cet effet, on n'a pas de médiation.

d. Modèle final irrigation 1 de la médiation Path Analysis du rendement

Ce modèle final est valide, suite à une vérification du CFI qui respecte les normes : CFI =1.

MODELE POSTULE IRRIGATION 1

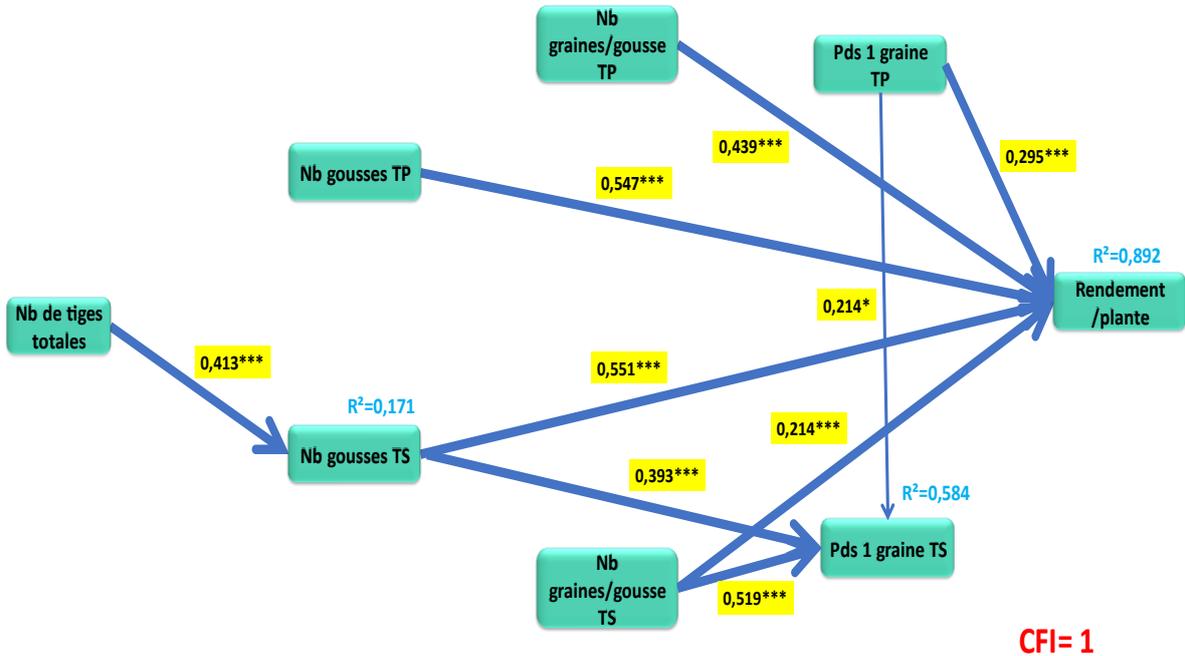


Figure 29 : Modèle final irrigation 1 du Path Analysis du rendement et ses composantes chez *Vicia faba L.*

D'après ce modèle final, nous pouvons constater :

- un flux de causalité direct très hautement significatif du poids d'une graine TP, du nombre de graines/gousse TP, du nombre de graines/gousse TS, du nombre de gousses TP et du nombre de gousses TS sur le rendement par plante.
- un flux de causalité direct hautement significatif du nombre de graines/gousse TS sur le poids d'une graine TS.
- Un flux de causalité direct hautement significatif du nombre de gousses TS sur le poids d'une graine TS.
- Un flux de causalité direct hautement significatif du nombre de tiges totales sur le nombre de gousses TS.
- Un flux de causalité direct significatif du poids d'une graine par tige principale sur le poids d'une graine par tige secondaire.

Sur la base de l'analyse du modèle de cheminement illustré à la figure X, nous avons constaté, que les facteurs directs les plus importants déterminant le rendement par plante de *Vicia faba* L., expliquent 89% de la variabilité totale, et sont :

- ❖ Poids d'une graine TP ;
- ❖ Nombre de graines/gousse TP ;
- ❖ Nombre de graines/gousse TS ;
- ❖ Nombre de gousses TP ;
- ❖ Nombre de gousses TS ;

3. Path Analysis appliqué sur le traitement irrigation 2 :

a. Test de validité du modèle

Le modèle postulé pour le traitement d'irrigation I2 est bien accepté CFI=0,933.

b. Flux de causalité entre les différentes variables

Après vérification de la validité du modèle, nous avons calculé les coefficients standardisés (a), ainsi que les coefficients de détermination R². Le nouveau diagramme obtenu correspond à la figure 30.

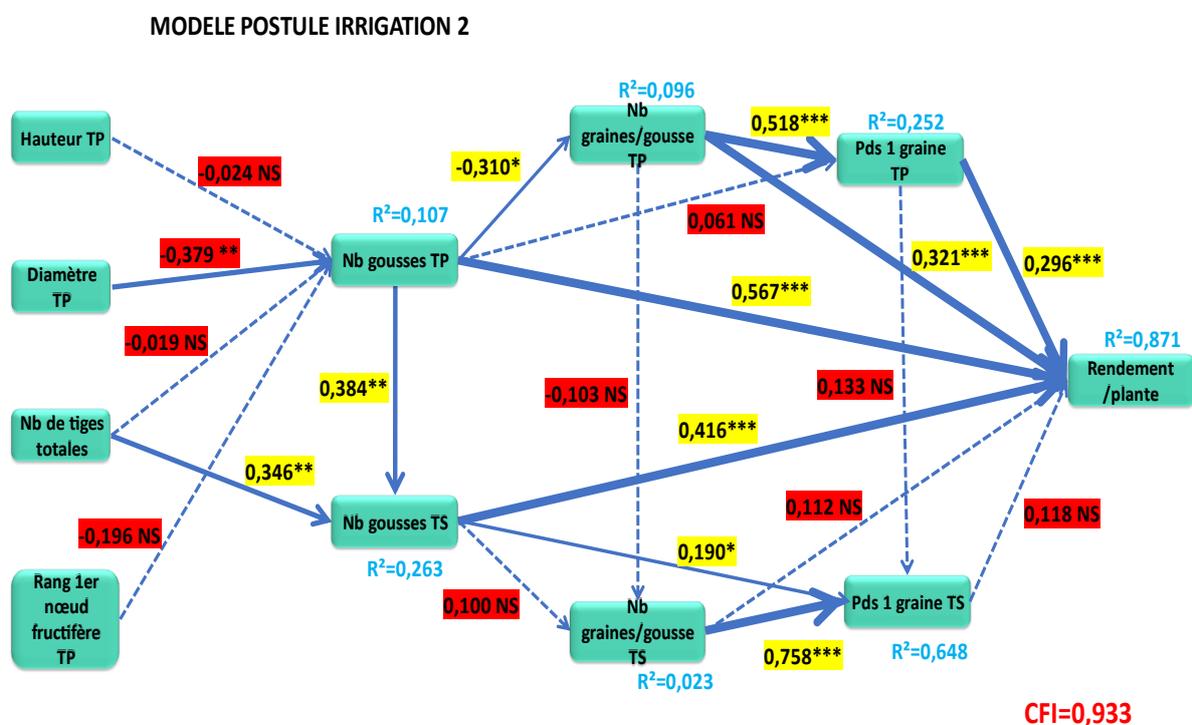


Figure 30 : Modèle postulé irrigation 2 pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez *Vicia faba* L.

⊕ CFI : Indice d'ajustement comparatif ;

- ✚ **R²** : coefficients de détermination ;
- ✚ ******* : Flux de causalité très hautement significatif ; ****** : Flux de causalité hautement significatif ; ***** : Flux de causalité significatif ; **NS** : Flux de causalité non significatifs).

La significativité des flux de causalité entre les différentes variables est comme suite

⇒ **Effet direct très hautement significatif**

- Le poids d'une graine par tige principale
 - Le nombre de graines/gousse par tige principale
 - Le nombre de gousses par tige principale
 - Le nombre de gousse par tige secondaire
- Ont un effet direct positif très hautement significatif sur le rendement par plante, respectivement de 0,296***; 0,321*** ; 0,567***; 0,416***.
- Le nombre de graines/gousse par tige principal a un effet très hautement significatif sur le poids d'une graine par tige secondaire.
 - Le nombre de graines/gousse par tige secondaire a un effet très hautement significatif sur le poids d'une graine par tige secondaire.

⇒ **Effet direct hautement significatif**

- Le nombre de gousses par tige principale a un effet hautement significatif (0,384**) sur le nombre de gousses par tige secondaire.
- Le nombre de tiges totales à un effet direct hautement significatif (0,346**) sur le nombre de gousses par tige secondaire.

⇒ **Effet direct significatif**

- Le nombre de gousses par tige principale a un effet significatif (-0,310*) sur le nombre de graines/gousse par tige principale.
- Le nombre de gousses par tige secondaire a un effet très significatif sur le poids d'une graine par tige secondaire.

⇒ **Effet non significatif**

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

- Le poids d'une graine par tige secondaire et le rendement par plante (a= 0,118 NS).
- Le nombre de graines/gousse par tige secondaire et le rendement par plante (a= 0,112 NS).
- Le poids d'une graine par tige principale et le poids d'une graine par tige secondaire (a= 0,133 NS).
- Le nombre de graines/gousse par tige principale et le nombre de graines/gousse par tige secondaire (-0,103 NS).

- Le nombre de gousses par tige principale et le poids d'une graine par tige principale (a= 0,061 NS).
- Le nombre de gousses par tige secondaire et le nombre de graines/gousse par tige secondaire (a= 0,100 NS).
-
- Le nombre de gousses par tige principale et le poids d'une graine par tige principale (a= 0,061 NS).
- La hauteur et le nombre de gousses par tige principale (a= -0,024 NS).
- Le diamètre et le nombre de gousses par tige principale (a= -0,379 **).
- Le nombre de tiges totales et le nombre de gousses par tige principale (a= -0,019 NS).
- Le rang du 1er nœud fructifère tige principale et le nombre de gousses par tige principale (a= -0,196 NS).

Le coefficient de détermination de la variable rendement par plante $R^2=0,871$ nous permet d'affirmer que la causalité entre, d'une part le poids d'une graine par tige principale, le nombre de graines/gousse par tige principale, le nombre de gousses par tige principale, le nombre de gousse par tige secondaire et le rendement par plante d'autre part, explique 87 % de la variabilité totale dans notre expérimentation.

Le nombre de graines/gousse par tige secondaire et le nombre de gousses par tige secondaire ont permis d'expliquer 64% du poids d'une graine par tige secondaire.

Le nombre de graines/gousse par tige principale permet d'expliquer 25% du poids d'une graine par tige principale.

Les autres variables n'ont pas expliqué une part importante de la variabilité.

c. Analyse et interprétation de la médiation

➤ Hypothèse 1 :

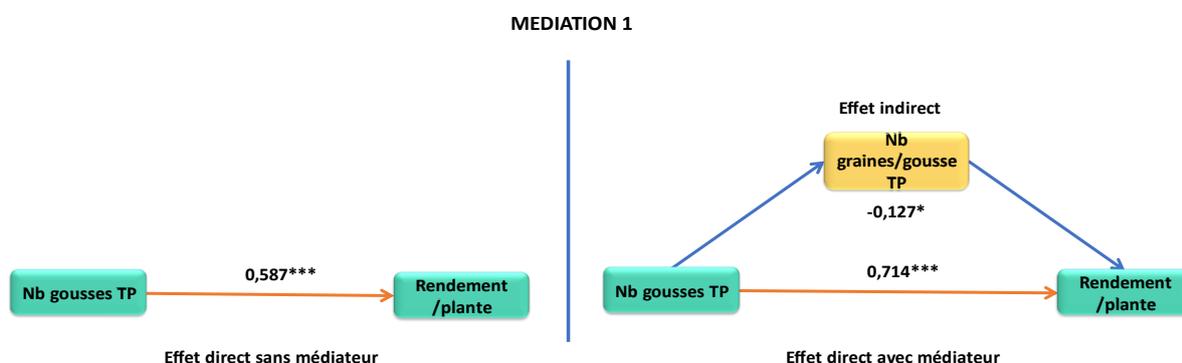


Figure 31 : Analyse du cheminement du nombre de gousses par TP sur le Rendement par plante via le médiateur nombre de graines/gousse par TP.

➤ **Hypothèse 2 :**

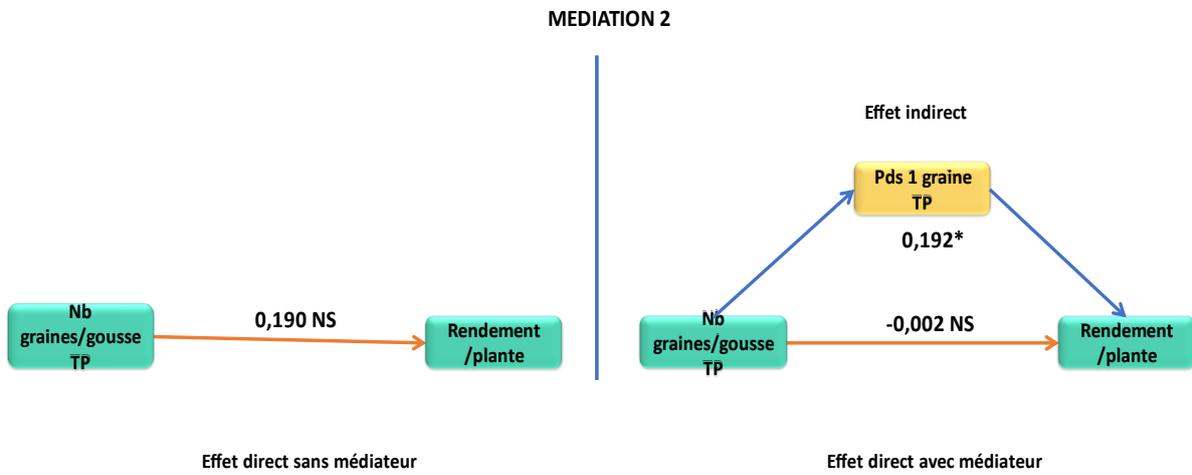


Figure 32 : Analyse du cheminement du nombre de graines/gousses par TP sur le Rendement par plante via le médiateur poids d'une graine par TP.

➤ **Hypothèse 3 :**

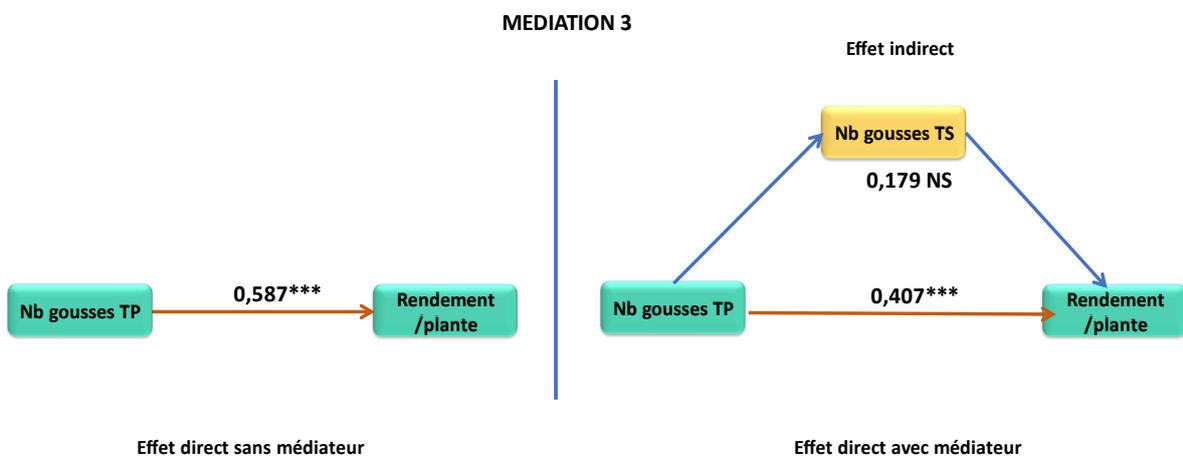


Figure 33 : Analyse du cheminement du nombre de gousses par TP sur le Rendement par plante via le médiateur nombre de gousses par TS.

Pour le traitement irrigation 2, nous avons donc trois médiations possibles (Tableau 11).

Tableau 11 : Effets directs ou indirects et type de médiation du Path Analysis pour le rendement de la fève et ses composantes « I2 »

	Hypothèse	Effet direct sans médiateur	Effet direct avec médiateur	Effet Indirect	Type de médiation
1	Nombre de graines/gousse par TP est le médiateur entre le nombre de gousses par TP et le rendement par plante	0,587***	0,714***	-0,127*	Médiation partielle
2	Le poids d'une graine par TP est le médiateur entre le nombre de graines/gousses par TP et le rendement par plante.	0,190 NS	-0,002 NS	0,192*	Effet indirect
3	Le nombre de gousses par TS est le médiateur entre le nombre de gousses par TP et le rendement par plante.	0,587***	0,407***	0,179 NS	Pas de médiation

d. Modèle final du Path Analysis du rendement et de ses composantes

Ce modèle final est considéré aussi comme valide, suite à une vérification du CFI qui est dans les normes : **CFI = 0,811**.

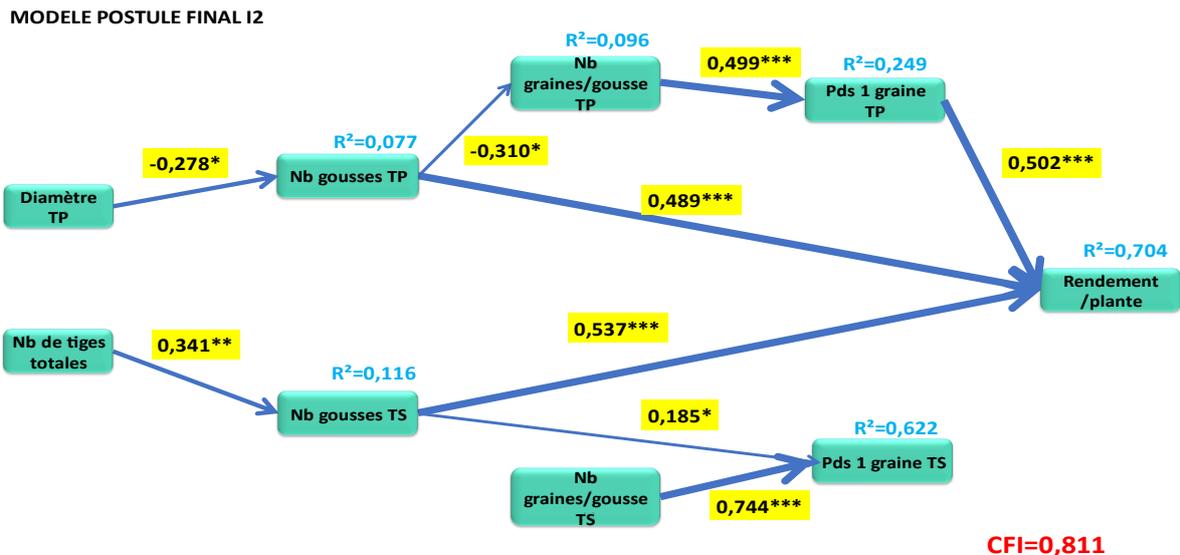


Figure 34 : Modèle final du Path Analysis du rendement et ses composantes chez *Vicia faba L.*

A partir du modèle final I₂, nous pouvons constater :

- un flux de causalité direct très hautement significatif du poids d'une graine TP, du nombre de gousses TP et du nombre de gousses TS sur le rendement par plante.
- un flux de causalité direct très hautement significatif du nombre de graines/gousse TP sur le poids d'une graine TP.
- un flux de causalité direct très hautement significatif du nombre de graines/gousse TS sur le poids d'une graine TS.
- Un flux de causalité direct hautement significatif du nombre de tiges totales sur le nombre de gousses TS
- Un flux de causalité direct significatif du nombre de gousses TP sur nombre de graines/gousse TP.
- Un flux de causalité direct significatif du nombre de gousses TS sur le poids d'une graine TS.
- Un flux de causalité direct significatif du diamètre sur le nombre de gousses TP.

Sur la base de l'analyse du modèle de cheminement illustré à la figure X, nous avons constaté, que les facteurs directs les plus importants déterminant le rendement par plante de *Vicia faba* L., expliquent 70% de la variabilité totale, et sont :

- ❖ Poids d'une graine TP ;
- ❖ Nombre de gousses TP ;
- ❖ Nombre de gousses TS ;

D'après ces différents résultats, nous pouvons donc montrer l'existence des flux de causalités différentes entre les variables endogènes et le rendement par plante pour chaque traitement.

❖ **Témoin**

Un flux de causalité direct très hautement significatif du poids d'une graine TP, du poids d'une graine TS, du nombre de graines/gousse TP, du nombre de gousses TP et du nombre de gousses TS sur le rendement par plante.

❖ **Traitement I1**

• un flux de causalité direct très hautement significatif du poids d'une graine TP, du nombre de graines/gousse TP, du nombre de graines/gousse TS, du nombre de gousses TP et du nombre de gousses TS sur le rendement par plante.

❖ **Traitement I2**

• un flux de causalité direct très hautement significatif du poids d'une graine TP, du nombre de gousses TP et du nombre de gousses TS sur le rendement par plante.

Ainsi, si nous apportons une irrigation d'appoint à la floraison de 53 mm (I1), elle va privilégier et favoriser dans les mêmes conditions de précipitation les variétés produisant beaucoup de :

- Graines TP et graines TS
- Gousses TP et gousses TS

Dans l'autre cas avec un apport de 106 mm (I2), va privilégier les variétés qui produisent beaucoup de :

- Gousses TP
- Gousses TS

Ces résultats confirment ceux obtenus l'année dernière (Equipe d'INRA, 2021) où l'auteur a retenu le modèle incluant les mêmes variables : le nombre de graines/TP, Nb de graines/TS, le Nb de gousses/TP, Nb de gousses/TS.

Nous pouvons donc conclure que ces quatre composantes de rendement constituent les principaux caractères dont le sélectionneur doit tenir compte dans l'objectif d'amélioration le rendement de *Vicia faba L.*

CONCLUSION

La fève est une culture polyvalente de grande valeur qui peut être cultivée pour ses valeurs nutritionnelles. Ses graines, ses gousses et ses feuilles sont riches en protéines et en presque tous les éléments nécessaires à l'alimentation humaine. L'intégration de la fève dans divers systèmes de culture tels que la rotation des cultures et les cultures intercalaires améliore la fertilité naturelle des sols et réduit la consommation d'engrais commerciaux.

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 à l'aide des modèles de régression et du Path Analysis chez 6 variétés de *Vicia faba L.* à condition d'irrigation d'appoint.

Les résultats de ce travail montrent tout d'abord à travers la régression linéaire multiple que le modèle retenu pour les trois traitements est validé. Pour le témoin ($R^2 = 0,799$) le modèle retenu explique un peu près de 80% de la variabilité du rendement par plante, pour I1 ($R^2 = 0,879$) il explique 87% de la variabilité du rendement par plante, et pour I2 ($R^2 = 0,847$) il explique 84% de la variabilité du rendement par plante.

Afin de bien affiner les résultats révélés par la régression, nous avons adopté un nouveau test baptisé Path Analysis qui a révélé que notre modèle final postulé pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez *Vicia faba L.* pour les trois traitements (témoin I1, I2) est bien validé, suite à une vérification du paramètre CFI.

Le calcul des coefficients standardisés dans le modèle final, nous mène à déterminer les variables ayant un effet direct très hautement significatif sur le rendement par plante. A savoir le poids d'une graine TP, le poids d'une graine TS, le nombre de graines/gousse TP, le nombre de gousses TP et le nombre de gousses TS pour le témoin. Le poids d'une graine TP, le nombre de graines/gousse TP, le nombre de graines/gousse TS, le nombre de gousses TP et le nombre de gousses TS pour le traitement I1, et finalement le poids d'une graine TP, le nombre de gousses TP et le nombre de gousses TS pour le traitement I2.

À cet effet, nous pouvons conclure qu'une irrigation d'appoint à la floraison de 53 mm (I₁), favorise le rendement pour les variétés produisant beaucoup de graines TP, graines TS, gousses TP et gousses TS. Et une irrigation d'appoint à la floraison de 106 mm (I₂), favorise le rendement pour les variétés produisant beaucoup de gousses TP et gousses TS dans les mêmes conditions d'irrigation.

Donc, nous pouvons conclure également que le nombre de graines/TP, Nb de graines/TS, le Nb de gousses/TS, Nb de gousses/TP constituent les principaux caractères dont le sélectionneur doit tenir compte dans l'objectif de l'amélioration du rendement de *Vicia faba L.* en condition d'irrigation d'appoint.

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 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 certains paramètres.

Références bibliographiques

- **Anonyme, 2007.** Rapport National Sur l'Etat Des Ressources Phytogénétiques Pour l'Alimentation et l'Agriculture. Deuxième rapport national sur l'état des ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture (RPGAA), p 44.
- **Anonyme, 2012.** L'agriculture marocaine en chiffre. Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime. [En ligne] 2012.
- **Amine, Maria. 1992.** Le secteur des légumineuses alimentaires au Maroc. Rabat : Actes Edition.
- **Ben Mbrarek K. & Boubaker M. & Hannachi C, 2012.** Modélisation du rendement grain du pois chiche (*Cicer arietinum* L.) du type « kabuli » sous les conditions édapho climatiques du semi-aride supérieur Tunisien. Rev. Mar. Sci. Agron. Vét, 13(2) : 37-49.
- **Bond D.A. & Poulsen M.H, 1983.** Pollinisation. The Faba Bean (*Vicia faba* L.). Hebblethwaite P.D. (Eds.), Butterworth. London, 53(3): 77-101.
- **Boote K. & Jones J. & Pickering N, 1996.** Potential uses and limitations of crop models. Agronomy Journal, 88(5): 704-716.
- **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. & Flourey C, 1994.** Légumineuses potagères, légumes, fruits. Production légumière sèche, Tome 3, Technique et documentation Lavoisier, p 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.
- **Cubero J. I, 1974.** On the evolution of *Vicia faba* L. Theoret.app.
- **Dajoz R, 2000.** Élément d'écologie. Ed dunod. Paris ,8ème édition.
- **Daoui K, 2007.** Recherche de stratégies d'amélioration de l'efficacité d'utilisation du phosphore chez la fève (*Vicia faba* L.) dans les conditions d'agriculture pluviale au Maroc.
- **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.
- **El Baghati, 1995.** La production des légumineuses alimentaires au Maroc, p. 77-82.
- **Fatemi Z. & Abbad F. & Sakr B, 2005.** La création variétal à L'INRA méthodologie acquise et perspectives.
- **Gaad Djouher 2010** , Contribution à l'étude morphologique et phénologique de 29 populations Algériennes de *Sulla coronaria* L. Medik. (Syn. *Hedysarum coronarium* L.)

- **Geerts S, Raes, D. 2009.** Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management* 96(9):1275–1284.
- **Gordon M.M, 2004.** Haricots sec: Situation prospective et Agroalimentaire.
- **Hamadache A, 2003.** La féverole. *Inst. Tech. Gr. Cult (I.T.G.C)*, p 13.
- **Huber W, (1963–1964).** Ergebnisse der Sortenprüfung von Ackerbohnen (Pferdebohnen). Station fédérale d’essais agricoles de Zurich-Oerlikon. Cité d’après Epprecht, Brigitte (2011).
- **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 2ème séminaire du réseau remafeve/remala. « le devenir des légumineuses alimentaires dans le Maghreb ».* Hammamet, Tunisie, 100p.
- **Kharrat, 2002.** Etude de la Virulence de l’Ecotype de Beja d’Orobanche foetida sur Différentes Espèces de Légumineuses. *Proceedings du 2 èmeséminaire du réseau REMAFEVE/REMALA, « Le devenir des Légumineuses Alimentaires dans le Maghreb ».* Hammamet, Tunisie, p 100.
- **Kradi C.** Guide pratique pour le conseil agricole Lentille Pois Chiche Fève.
- **Laumonier R, 1979.** Culture légumière et mari chaire. tomr iii. ed.j.b. baillier, p 276.
- **Maatougui M. E. H, 1996.** Situation de la culture des Fèves en Algérie et perspectives de relance In: *Rehabilitation of Faba bean.* Bertenbreiter W. and M. Sadiki (Eds.).
- **Maroc vert; Ministère de l’agriculture et de la pêche maritime. 2012.** Agriculture du Maroc en chiffre. [En ligne] 2012. [Citation : 19 juin 2013.] <http://www.agriculture.gov.ma/sites/default/files/agriculture-en-chiffres-2012.pdf>.
- **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
- **Mélissa GALLERON Aout 2013** Analyse de la place tenue par la fève (*Vicia faba*) et de ses modes de conduite dans les exploitations agricoles du périmètre irrigué du Haouz (Maroc)
- **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.
- **Prost L. 2008.** Modéliser en agronomie et concevoir des outils en interaction avec de futurs utilisateurs: Le cas de la modélisation des interactions génotype environnement et de l’outil DIAGVAR; thèse de Doctorat; Spécialité: Agronomie; l’Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l’Environnement (Agro. Paris Tech.), p 348.
- **Rachef S.A., Oumer F & Ouffroukh A. 2005.** Inventaire des ravageurs de la fève en Algérie (identification), 16.36-41.
- **Rhaim A, 2002.** Studies on the pathogenic variability among isolates of *Botrytis* spp. From Tunisia and resistance of faba bean genotypes to chocolate spot. In: 11 congress

- of the Mediterranean phytopathological union et 3 congress of the sociedade portuguesa de Fitopatologia, Evora, Portugal, 146-148. Andalus Academic publishing, p 209.
- **Sadiki M. & Lazrak A, 1998.** La fève et la féverole : Fiche technique. Institut agronomique et Vétérinaire Hassan II.
 - **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.
 - **Semenov, M. A. (2009).** Impacts of climate change on wheat in England and Wales. *Journal of the Royal Society Interface*, 6(33), 343-350.
 - **SIAM. 2012.** Céréales, fruits, légumes, viandes, lait... Ce que produit le Maroc et où. *La vie éco.* [En ligne] 27 avril 2012. [Citation : 17 juin 2013]
 - **Singh V.P. & Tomer Y.S, 1988.** Influence of flower colour on seed yield and components in faba bean.
 - **Troin, Jean-François. 2002.** Maroc - Régions, Pays, Territoire. page 22. Paris : Maisonneuve et Larose.
 - **Valantin-Morison M. & Meynard J.M, 2008.** Diagnosis of limiting factors of organic oilseed rape yield. A survey of farmers' fields. *Agronomy for Sustainable Development*, 28 : 527-539.
 - **Wright S, 1921.** Correlation and causation. *Journal of Agricultural Research*, 20 : 557–585.
 - **Youssra Fekiyer 2018.** Comparaison de la régression linéaire multiple et des réseaux de neurones artificiels pour l'évaluation de la qualité chimique des eaux d'irrigation dans la région de Skhirat

Webographie

- <https://www.agriculture.gov.ma/fr/actualites/campagne-agricole-20202021-une-bonne-evolution-et-de-bonnes-perspectives-de-production>.
- <https://fnh.ma/article/actualite-economique/cultures-printanieres-les-superficies-dediees-en-nette-baisse-par-rapport-a-lanormale#:~:> .
- <https://www.onicl.org.ma>
- [Les avantages et les inconvénients d'un modèle de régression multiple - Science - 2022 \(lamscience.com\)](#)
- [Légumineuses : Une superficie moyenne de 367.000 hectares | Aujourd'hui le Maroc \(aujourd'hui.ma\)](#)