



PROJET DE FIN D'ÉTUDES
PRESENTE EN VUE D'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES
GESTION ET CONSERVATION DE LA BIODIVERSITE

Evaluation de différents génotypes de *Vicia faba* L. en condition de stress hydrique

Présenté par : ASBAI Zineb

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

Pr. Mr LAZRAQ Abderrahim (FST FES)

Pr. Mr DAOUI Khalid (INRA MEKNES)

Soutenu le : 12/07/2021

Devant le jury composé de :

- Pr. FATEMI Zain EL Abidine (INRA MEKNES)
- Pr. LAZRAQ Abderahim (FST FES)
- Pr. EL GHADRAOUI Lahsen (FST FES)
- Pr. BENJELLOUN Meryem (FST-FES)
- Dr. CHETTO Oumaima (INRA MEKNES)

Année Universitaire : 2021/2022

RESUME

La fève (*Vicia faba* L.) est une composante essentielle dans les systèmes de production agricoles marocains. Elle constitue une légumineuse riche en protéines cultivés et consommés comme aliments pour l'homme et les animaux.

La présente étude a pour objectif d'étudier et d'évaluer les caractéristiques de différents génotypes de *Vicia faba* L. en condition de stress hydrique.

Pour répondre à cet objectif, nous avons testé six variétés de fève et de féverole avec deux traitements d'irrigation, apporté au stade floraison, I₁ (53mm) et I₂ (106mm). Pour ce faire nous avons adopté une analyse multivariées qui nous a donné une idée sur les différents effets des paramètres étudiés et la corrélation entre eux. Par la suite, nous avons eu recours à la modélisation par le modèle de cheminement ou Path Analysis.

Les paramètres étudiés étaient d'une part la conductance stomatique et d'autre part les paramètres agronomiques à savoir la hauteur, Nb tiges/plante, Nb de gousses/TP et par TS, Nb graines/TP et par TS, Nb nœuds fructifères/TP et par TS, Rang du premier nœud fructifère, le diamètre de la tige principale et le poids des graines/TP et par TS.

Nos résultats indiquent d'une part un effet très hautement significatif de l'irrigation sur la conductance stomatique. D'autre part l'analyse de la variance montre qu'il n'y a pas un effet significatif concernant le régime hydrique pour la majorité des composantes de rendement, alors qu'il y a un effet très hautement significatif pour l'effet variétale sur la majorité de ses composantes de rendements.

Nos résultats indiquent également que le Nb de gousses/TS explique 37% de la variabilité totale du rendement par plante pour le traitement d'irrigation I₁. Alors que le Nb de graines/TP, Nb de graines/TS et le Nb de gousses/TP explique 65% de la variabilité totale du rendement par plante pour le traitement d'irrigation I₂.

Par ailleurs, l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez *Vicia faba* L. a permis également de mettre en évidence l'effet direct non négligeable de la hauteur, rang, Nb de nœuds fructifères sur le rendement par le biais du médiateur : Nb de graines et Nb de gousses.

Mots clés : Vicia faba L., fève, féverole, rendement, composantes du rendement, stress hydrique, path analysis, médiation.

REMERCIEMENTS

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

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

*Je remercie Monsieur **LAZRAQ Abderrahim** pour son encadrement, sa disponibilité, et ses éclaircissements qui ont beaucoup contribué à inspirer les aspects exploités dans ce travail.*

*Je voudrais aussi bien exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury, monsieur **EL GHADRAOUI Lahsen** et madame **BENJELLOUN Meryem** qui m'ont honoré en acceptant de juger ce travail et de l'enrichir par ses critiques constructives.*

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

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

A vous tous, un grand merci.

Sommaire :

RESUME	
REMERCIEMENTS	
Liste de figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	1
Partie 1 : Revue Bibliographique	3
A. Généralités sur les légumineuses alimentaires au Maroc.....	3
I. Superficie et production des légumineuses alimentaires et de la fève au Maroc	3
II. Répartition de la culture des légumineuses alimentaires et de la fève au Maroc.....	3
B. Généralité sur la plante <i>Vicia faba</i> L.	5
I. Présentation de l'espèce	5
1. Origine	5
2. Position systématique	5
3. Description botanique	6
a. Appareil végétatif	6
b. Appareil reproducteur.....	6
II. Intérêt de la culture de la fève	7
1. Intérêt agronomique	7
2. Intérêt alimentaire	7
III. Exigences pédoclimatiques de la fève.....	8
1. Exigence pédologique.....	8
2. Exigence climatique.....	8
C. Culture et fertilisation de la fève.....	9
I. Culture de la fève	9
1. Préparation du lit de semence	9
2. Semis de fève.....	9
II. Fertilisation de la fève	9
III. Besoin en eau	10
D. Importance des fèves conduites en intercalaire au Maroc.....	10
E. Compétition de l'arbre vis-à-vis des plantes annuelles : eau et lumière	12
I. Lumière.....	12
II. Eau	12

F.	Stress hydrique	12
I.	Définition	12
II.	L'eau dans la plante.....	13
3.	Rôle de l'eau dans la plante	13
4.	Contenu en eau de la plante	14
III.	Réponse de la plante au stress hydrique	14
IV.	Mécanismes d'adaptation au déficit hydrique.....	16
1.	L'esquive.....	16
2.	L'évitement.....	17
3.	La tolérance	18
Partie 2 :	Matériel et Méthodes	20
I.	But de ce travail.....	20
II.	Site expérimental	20
III.	Matériel végétal	20
IV.	Protocole expérimental.....	21
1.	Itinéraire technique	21
2.	Dispositif expérimental	21
3.	La pluviométrie du Domaine Expérimental de Douyet pour la saison 2020/2021.	22
4.	Mesure de la conductance stomatique (paramètre physiologique) :.....	23
5.	Mesure des paramètres agronomiques :	23
6.	Analyse de données.....	25
Partie 3 :	Résultats et discussions	26
I.	Résultats de la conductance stomatique	26
II.	Variabilité des composantes du rendement:	26
1.	Effet de la variété :	26
2.	Effet de l'irrigation :	27
3.	Effet variété X irrigation :	27
III.	Corrélations partielles entre les composantes du rendement:	28
1.	Caractères très hautement corrélés.....	29
2.	Caractères hautement corrélés :	30
3.	Caractère corrélés significativement.....	30
IV.	Path analysis	30
1.	Path analysis appliqué sur le témoin.....	32
a.	Test de validité du modèle	32

b.	Flux de causalité entre les différentes variables	32
c.	Analyse et interprétation de la médiation	35
d.	Modèle final du path analysis du rendement et de ses composantes.....	36
2.	Path analysis appliqué sur le traitement irrigation 1 I_1	38
a.	Test de validité du modèle	38
b.	Flux de causalité entre les différentes variables	38
c.	Analyse et interprétation de la médiation	41
d.	Modèle final du path analysis du rendement et de ses composantes.....	43
3.	Path analysis appliqué sur le traitement irrigation 2 (I_2) :.....	45
a.	Test de validité du modèle	45
b.	Flux de causalité entre les différentes variables	45
c.	Analyse et interprétation de la médiation	47
d.	Modèle final du path analysis du rendement et de ses composantes.....	48
	Conclusion et perspectives.....	51
	Références bibliographiques	53
	Annexe.....	62

Liste de figures

Figure 1 : Plan de la parcelle d'expérimentation	22
Figure 2 : Variation de précipitation (mm) au niveau du Domaine Expérimental de Douyet, durant la campagne 2020-2021.	23
Figure 3 : Poromètre utilisé	23
Figure 4 : Pied à coulisse utilisé dans nos mesures.	24
Figure 5 : Modèle initial postulé pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba</i> L.....	32
Figure 6: Modèle postulé pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba</i> L.	33
Figure 7 : Analyse du cheminement du Nb gousses/TP sur le Rendement par plante via le médiateur Nb graines/ TP.....	36
Figure 8 : Modèle final du Path analysis du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba</i> L.....	37
Figure 9 : Modèle postulé pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba</i> L.	39
Figure 10 : Analyse du cheminement du Nb de gousses/ TP et rendement via un médiateur du Nb gousses/ TS.....	41
Figure 11 : Analyse du cheminement du Nb de gousses/ TP et rendement via un médiateur du Nb graines/TP.....	42
Figure 12 : Analyse du cheminement du Nb de tiges secondaires et le Nb de gousses par TS via un médiateur du Nb nœuds fructifères/TS.....	43
Figure 13 : Modèle final du Path analysis du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba</i> L.....	44
Figure 14 : Modèle postulé pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba</i> L.	46
Figure 15 : Analyse du cheminement du nombre de gousses/ TP sur le Rendement par plante via le médiateur nombre de graines par TP.....	48
Figure 16 : Modèle final du Path analysis du rendement et ses composantes chez <i>Vicia faba</i> L.....	49

Liste des tableaux

Tableau 1: différentes variétés utilisées.	20
Tableau 2: Itinéraire technique INRA (2021)	21
Tableau 3 : Analyse de la variance (ANOVA) pour la conductance stomatique	26
Tableau 4 : Analyse de la variance (ANOVA) pour les paramètres agronomiques étudiés. . TP : tige principale ; TS : tige secondaire ; (***) : très hautement significatif ; (**) hautement significatif ; (*) significatif ; NS : non significatif.	28

Liste des abréviations

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

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

SAU : Surface Agricole Utile

LAI : indice de surface foliaire (IF)

qx/ha. : Quintaux par hectare

TP : tige principale

TS : Tige secondaire

Nb : nombre

CFI : indice d'ajustement comparatif

R^2 : coefficient de détermination

Rep : répétition

Rg : rang

Introduction générale

Le secteur agricole constitue un pilier de l'économie marocaine. Il contribue de près de 14 % dans le PIB national. Avec une production plus ou moins diversifiée, les céréales figurent en tête de liste, représentant la grande partie de la production agricole, suivis des légumineuses alimentaires (Harbouze et *al.*, 2019).

Les légumineuses alimentaires sont cultivées sur une superficie moyenne de 24 050 ha, une production de 32 270 tonnes/an et un rendement de 13 418 kg/ha (FAOSTAT, 2017). Elles occupent la seconde place dans l'assolement soit 6 à 8 % de la SAU au Maroc. Ainsi, Elles jouent un rôle primordial sur le plan agronomique et nutritionnel. En effet, elles sont utilisées comme engrais vert grâce à leurs propriétés biologiques permettant la fixation symbiotique d'azote atmosphérique.

La fève (*Vicia faba* L.), principale légumineuse alimentaire au Maroc 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 2019/2020 représente près de 44% de la superficie totales occupés par les légumineuses alimentaires au Maroc (ONICL, 2020).

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).

Ces derniers temps, le changement climatique a montré des impacts négatifs sur les ressources en eau et le rendement agricole dans le monde entier (IPCC, 2019). En effet, le Maroc est situé dans l'une des régions les plus arides de la planète où les météorologues notent une réduction des précipitations de l'ordre de 3mm/an. Ainsi, le Maroc se trouve déjà dans une situation de stress hydrique avec 3000 m³ d'eau disponible actuellement par an et par habitant (Aït Houssa A. et *al.*, 2017)

Pour faire face à ce changement climatique, des efforts en matière de conduite technique doivent être développés tels que le système d'agroforesterie considéré comme une technique innovante.

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 tester le potentiel du rendement de quelques variétés de fève et de féverole, ainsi que leurs paramètres agronomiques et physiologiques en conditions de stress hydrique.

Le présent document comporte trois grandes parties :

- D'abord une synthèse bibliographique sur la fève, le stress hydrique et les mécanismes physiologiques et agronomiques de la tolérance des plantes au stress hydrique.
- Ensuite l'ensemble du matériel et des méthodes utilisés pendant notre expérimentation.
- Et enfin l'ensemble des différents résultats et discussions des paramètres étudiés.

Partie 1 : Revue Bibliographique

A. Généralités sur les légumineuses alimentaires au Maroc

I. Superficie et production des légumineuses alimentaires et de la fève au Maroc

Au Maroc, la superficie dédiée à la culture des légumineuses alimentaires reste encore faible : 400 000 ha. Elle ne représente que 6% de la superficie agricole utile (Herradi, 2017). Après les céréales, les légumineuses alimentaires occupent la seconde place dans les assolements et jouent un rôle agronomique essentiel en termes de rotations culturales avec les céréales (Fellah trade. 2016).

Il ressort, des données disponibles à la DSS-MAPM, que la superficie moyenne réservée à la culture de fève a connu des fluctuations d'une campagne à une autre. Ce qui affecte aussi la production globale obtenue. La fève constitue la légumineuse principale et participe pour une large part à la SAU totale des légumineuses alimentaires. Elle reste à ce jour le principal produit de cette culture au Maroc avec une part qui dépasse souvent les 60% de la production totale (Fellah trade. 2016). En termes de consommation moyenne de ces produits, les marocains consomment quatre kg par habitant (Daoui, 2007). Elles

Actuellement durant la campagne agricole 2019/2020, la superficie de la culture des légumineuses alimentaires principales (fèves, lentilles, pois, pois chiches) est de 244 000ha avec une production totale de 1 218 000 qx. (ONICL, 2020).

La superficie dédiée à la culture de la fève, durant la même campagne agricole 2019/2020, est de 107 000 ha, avec une production de 490 000 qx. (ONICL, 2020). Les fluctuations de la superficie dédiée à la culture de la fève se répercutent sur la production qui a une tendance générale vers la baisse. Les agriculteurs se tournent alors vers des cultures plus rentables : plantes oléagineuses, arboriculture, etc. (FAOSTAT, 2019).

II. Répartition de la culture des légumineuses alimentaires et de la fève au Maroc

L'importance de la culture de la fève au Maroc explique sa propagation dans diverses régions avec plusieurs zones géographiquement différentes qui peuvent être distinguées (Sadiki, 1990). Les trois quarts de la production nationale en légumineuses alimentaires sont concentrées dans les régions de Tanger-Tétouan, Taza-El Hoceima, Fès-Boulmane, Chaouia-

Ouardigha et Abda-Doukkala (Figure 1) (SIAM, 2012). Ces régions ont une pluviométrie annuelle supérieure à 300 mm permettant la culture de la fève en pluvial.

- ❖ **Zone de Chaouia-Ouardigha** : Elle bénéficie d'un climat méditerranéen particulièrement agréable et caractérisée par des hivers doux et humides et des étés relativement tempérés. La culture des légumineuses occupe 4% de la surface agricole utile dans la région. La fève occupe 27,8 % de la superficie des légumineuses alimentaires dans cette région (Abdelali, 2015).
- ❖ **Zone d'Abda-Doukkala** : Du point de vue climatologique, la région s'inscrit dans le domaine du climat atlantique. Les températures restent clémentes en hiver, douces en été aussi bien sur les côtes qu'à l'intérieur. La fève occupe une grande part des superficies des légumineuses alimentaires dans cette région avec un pourcentage de 45,78% (Abdelali, 2015).
- ❖ **Zone de Fès-Meknès** : connaît un climat méditerranéen dégradé, subissant les influences continentales pendant les saisons d'été et d'hiver. La fève est la culture qui domine la part des assolements alloués aux légumineuses alimentaires avec un taux de 52,25 %. (Abdelali, 2015).
- ❖ **Zones de Taza-Hoceima** : La région s'inscrit dans le domaine du climat méditerranéen. Dans cette zone la fève est irriguée et occupe 12 % de la superficie réservée à cette culture au Maroc.
- ❖ **Zones de Tanger-Tétouan** : Caractérisée par une pluviométrie moyenne de 700 mm concentrée entre le mois d'octobre et le mois d'avril. La fève est l'espèce dominante sur une superficie de 8 300 ha.

B. Généralité sur la plante *Vicia faba* L.

I. Présentation de l'espèce

Vicia faba L. est une plante partiellement allogame avec un taux d'allogamie variant de 20 à 80%. Elle est diploïde avec un nombre relativement faible de chromosomes ($2n = 2x = 12$) (Al-Barri et Shtaya, 2013 ; Basheer et al., 2013 ; Terzopoulos et al., 2008).

Elle présente un cycle phénologique, à trois phases qui sont : une phase de germination, une phase de développement végétatif et une phase de reproduction.

La croissance de cette plante est naturellement indéterminée. Cela signifie qu'elle n'est pas limitée par une fleur au sommet, qui bloque sa croissance végétative. Toutefois, des types de fèves à croissance déterminée ont été obtenus par mutagenèse provoquée (Sjodin, 1971).

1. Origine

La fève *V. faba* L. est une plante cultivée par l'homme depuis le Néolithique (7000 ans avant J.C). Elle est originaire des régions méditerranéennes du Moyen-Orient (Mathon, 1985).

Selon Duc et al. (2010), la forme ancestrale de *V. faba* L. est inconnue, mais le plus proche parent sauvage de la fève est supposé être l'espèce *Vicia pliniana* d'Algérie.

A partir de son centre d'origine, la fève s'est propagée vers l'Europe, le long du Nil, jusqu'en Ethiopie et de la Mésopotamie vers l'Inde. L'Afghanistan et l'Ethiopie deviennent par la suite, les centres secondaires de dispersion (Cubero, 1974).

2. Position systématique

Selon Sanchez et al. (2008), la fève est classée botaniquement comme suit :

Règne : *Vegeta*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Magnoliopsida*

Ordre : *Fabales*

Famille : *Fabaceae*

Sous-famille : *Faboideae*

Tribu : *Vicieae*

Genre : *Vicia*

Espèce : *Vicia faba* L.

D'après Kolev (1976), selon la taille des graines, cette espèce est subdivisée en trois variétés :

- *Vicia faba minor beck* à petites graines appelée couramment féverole.

- *Vicia faba equina* pers à graines moyennes appelée couramment févrette.
- *Vicia faba major hartz* à grosses graines appelée couramment fève.

Duc (1997) regroupe *V. faba minor*, *V. faba equina* et *V. faba major* dans le sous-groupe des *Eu faba*.

3. Description botanique

a. Appareil végétatif

- Les feuilles : sont alternes, composées-pennées, de couleur vert glauque ou grisâtre, constituées par 2 à 4 paires de folioles amples et ovales. Les stipules bien visibles en forme dentées (Chaux et Foury, 1994).
- La tige : Selon Peron (2006), la tige est simple, dressée, creuse et de section quadrangulaire, sans ramification se dressant à plus d'un mètre de haut.
- Les racines : le système racinaire de *V. faba* L. est formé par une racine principale pivotante et des racines secondaires portant des nodosités contenant des bactéries fixatrices d'azote (*Rhizobium leguminosarum*), (Duc, 1997).

b. Appareil reproducteur

- La fleur : est caractéristique par 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. Les fleurs sont de couleur blanche avec des taches plus ou moins violettes indiquant la présence des tanins dans la graine. Ces fleurs sont disposées en inflorescence de 4 à 6 sur le nœud (Sadiki et Lazrak, 1998).
- Les fruits : sont des gousses contenant, selon le type, de 3 à 12 grains (Gallais et Bannerot, 1992). Selon Fatemi (2005), les gousses sont de couleur verte à l'état jeune puis noircissent à maturité. Les gousses de la fève sont longues (contenant jusqu'à 7 à 13 ovules) généralement aplaties et courbées vers le bas. Les graines sont charnue, vertes et tendres à l'état immature, à 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, Foury, 1994).

II. Intérêt de la culture de la fève

La fève est une espèce très ancienne au Maroc. Grâce à ses multiples rôles sur le plan agrobiologique et socio-économique, reste une composante essentielle dans les systèmes de production agricoles marocains. La superficie dédiée à la culture des fèves dans la campagne agricole 2019/2020 représente 43,852% de la superficie totale occupée par les légumineuses alimentaires au Maroc (ONICL, 2020). En plus de ces intérêts agro-économiques, la fève constitue l'une des principales sources de protéines pour la consommation humaine et animale.

1. Intérêt agronomique

L'azote est l'un des facteurs les plus importants qui joue un rôle déterminant à la fois sur le rendement et sur la qualité des productions. Or, ce facteur est limitant dans la plupart des régions du monde. Cela est dû à son coût élevé sous forme d'engrais. *V. faba* comme toutes les légumineuses alimentaires, contribue à l'enrichissement du sol en éléments fertilisants (Khaldi et al., 2002). Les racines de *V. faba* L. vivent en symbiose avec des bactéries du genre *Rhizobium*, leur permettant de fixer l'azote atmosphérique et d'enrichir le sol en azote, ce qui réduit la dépendance des agriculteurs vis-à-vis des engrais chimiques (Sillero et al., 2010). L'association des fèves avec des céréales permet de contrôler les mauvaises herbes par une compétition exercée par les céréales qui sont mieux compétitifs que les fèves avec les mauvaises herbes pour l'eau et les nutriments.

2. Intérêt alimentaire

L'homme cultive la fève (*Vicia faba* L.) pour se nourrir et pour nourrir son bétail. Elle constitue une source importante de protéine, elle est consommée soit comme des légumes verts ou en tant que grains secs (Bissara, soupe, etc.). Après la récolte, la paille est également utilisée pour nourrir le bétail.

Elle contient entre 20 et 40% de protéines, selon la variété et les conditions environnementales dans lesquelles elles sont cultivées (Tewodros et al., 2015). Selon Grodon (2004), la fève est l'une des légumineuses qui a une teneur élevée en protéines. Elle constitue une bonne source de fibres (solubles et insolubles), glucides, vitamines et de minéraux (K, P, Ca, Mg, Cu et Zn).

Elle constitue également un aliment nutritif très important surtout pour les populations à faible revenus, qui ne peuvent pas toujours s'approvisionner en protéine d'origine animale (Daoui, 2007).

Les graines de *V faba minor*, sont utilisées pour l'engraissement des animaux (Maatougui, 1996). D'après Fatemi (1998), l'évolution du niveau de consommation animale suit de près la tendance de la consommation humaine, ainsi la contribution de la fève à l'alimentation animale est en augmentation.

III. Exigences pédoclimatiques de la fève

1. Exigence pédologique

Pour Jensen et *al.* (2010), la fève s'adapte à de nombreux sols, mais craint les sols légers (risque de sécheresse) et les excès de Bore. Elle croit mieux sur des sols à texture plus lourde. *V. faba* aime les sols frais qui se réchauffent facilement. Aussi, elle réussit bien dans des sols à très bon pouvoir de rétention en eau (sols argileux, riches en humus) (Marcel et *al.*, 2002). Elle préfère également les sols bien drainés au pH neutre (6,5-7,5) et à fertilité moyenne. (Brink et Belay, 2006)

2. Exigence climatique

La plante *Vicia faba* L. est bien adapté au climat du type Méditerranéen. Elle est particulièrement sensible à la sécheresse et aux températures élevées durant la période de reproduction.

Sur fève et féverole, Abdalla et Fischbeck (1978) montrent les effets néfastes des températures élevées sur les composantes du rendement, et sur la durée du cycle, qui peut diminuer de moitié. L'effet négatif de températures élevées sur le rendement peut être le résultat de l'effet de la température elle-même sur les composantes (nombre) et du raccourcissement du cycle végétatif (remplissage).

Ainsi, selon Laumonier (1979), la fève peut être cultivée dans les climats les plus divers. Elle tolère les basses températures (jusqu'à -4 °C), mais elle craint les fortes chaleurs, surtout lorsqu'elles sont accompagnées de sécheresse.

Une température moyenne aux alentours de 13°C est optimale pour la croissance de la fève (Jarso et Keneni, 2006).

C. Culture et fertilisation de la fève

I. Culture de la fève

1. Préparation du lit de semence

Le lit de semence doit être assez fin pour permettre une imbibition et une levée homogènes. Ceci est réalisé par un labour moyen (charrue à disques) suivi d'un passage au cover-crop ou à l'araire (Sadiki et Lazrak, 1998).

Afin d'assurer à la plante une bonne autonomie vis-à-vis de ses besoins en eau, et en raison de son enracinement pivotant, un labour profond est conseillé (Chaux et Foury, 1994).

2. Semis de fève

- Date de semis : Selon Marcel et *al* (2002), les semis précoces sont recommandés. La date optimale de semis se situe entre mi-octobre - novembre parfois jusqu'à décembre.
- 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. (Alaoui, 2005).

II. Fertilisation de la fève

Chez la culture de fève, qui est une légumineuse fixatrice de l'azote atmosphérique, aucun apport azoté n'est nécessaire. Cependant, un apport initial ou starter d'environ 20 unités d'azote/ha, soit environ 50 kg/ha d'urée ou 60 kg/ha d'ammonitrate au début du cycle où le démarrage de la culture avant que l'azote atmosphérique ne soit disponible à la plante à travers les nodosités (Alaoui, 2005).

Cependant, Abras et *al*. (2016) ont signalé que la fève ne nécessite pas d'azote sous forme d'engrais minéral ou organique, donc l'apport d'azote serait en effet défavorable à savoir en limitant le développement des nodosités présentes sur le système racinaire de la féverole, en conduisant au développement d'une végétation excessive sensible à la verse, au détriment de la production de graines. Pour la fertilisation azotée, Dahan en 1996 a rapporté que les

légumineuses à graines peuvent satisfaire jusqu'à 80 % de leur besoin en azote grâce à la fixation symbiotique.

Dans leur étude sur l'impact de l'application de phosphore sur la productivité des féveroles, Daoui *et al.* (2009) ont observé un effet positif de la fertilisation au phosphore sur la croissance des cultures (c'est-à-dire la surface foliaire et la croissance des racines). Dans les conditions marocaines où le Potassium est déficient, les recommandations de K (potassium) pour la production de fèves sont d'environ 90 kg de K₂O/ha (Daoui *et al.*, 2009).

III. Besoin en eau

La fève a des besoins en eau relativement élevés et craint les fortes températures pendant la phase fin floraison-remplissage du grain. Le stade critique où il est absolument nécessaire de faire des apports, si nécessaires, est lors de la formation et du développement des gousses (Anonyme, 2002).

La fève est sensible au manque d'eau et exige une alimentation hydrique régulière supérieure à 350 mm/an (Alaoui, 2005). Vu les irrégularités des précipitations mensuelles et la grande fréquence du déficit hydrique caractérisant la période Mars-Avril, il est préconisé d'apporter des irrigations pendant les stades critiques de l'élaboration du rendement : il s'agit du début de la ramification, la floraison et le remplissage des grains. Stolp (1955) a rapporté que les fèves ont donné leur rendement maximal lorsque l'irrigation était appliquée pendant la période de floraison.

D. Importance des fèves conduites en intercalaire au Maroc

La culture intercalaire est une technique avancée qui consiste à cultiver deux ou plusieurs espèces sur la même parcelle de terre en même temps afin d'en tirer le maximum de bénéfices sur une base durable (Lithourgidis *et al.*, 2011 ; Bedoussac, L. *et al.*, 2015). Elle offre une sécurité contre la réduction du rendement des cultures (Zhang *et al.*, 2013). Ces cultures présentent de nombreux avantages en termes de durabilité, notamment l'amélioration du rendement des cultures, de la fertilité des sols (Manna *et al.*, 2003) et de la productivité (Nyoki et Ndakidemi, 2018), ainsi que la lutte contre l'érosion des sols (Weisany *et al.*, 2015). En outre, la culture intercalaire réduit la densité des mauvaises herbes et améliore la santé des plantes en réduisant l'incidence des maladies (Rusinamhodzi *et al.*, 2012).

L'une des pratiques culturales la plus communément rencontrée en milieu méditerranéen associe des légumineuses à des céréales en rotation ou en culture intercalaire (Wahbi, 2016).

La culture intercalaire des céréales avec des légumineuses a été populaire également dans les régions intropicales (Hauggaard-Nielsen et *al.*, 2001 ; Tsubo et *al.*, 2005) et pluviales du monde (Banik et *al.*, 2000 ; Dhima et *al.*, 2007) en raison de ses multiples avantages.

Dans le cas d'un système de culture intercalaire de légumineuses et de non-légumineuses, l'azote atmosphérique peut être fixé par les bactéries *Rhizobium* présentes dans les nodules des légumineuses, tandis que les non légumineuses se contentent de l'azote du sol (Marer et *al.*, 2007 ; Liu et *al.*, 2011; Bedoussac, 2015). C'est une pratique respectueuse de l'environnement car elle réduit l'utilisation d'engrais chimiques et de pesticides (Lithourgidis et *al.*, 2011).

La plupart des fèves dans les pays industrialisés sont cultivées seules, mais dans d'autres pays du monde (ex. la Chine), la culture mixte de la fève avec le maïs ou autres céréales est la pratique courante (Zhang et *al.*, 2004 ; Li et *al.*, 2009)

La culture intercalaire de la fève avec les céréales peut être un outil de gestion efficace pour détruire les mauvaises herbes ; surtout si aucun herbicide approprié n'est disponible, ou lorsque les herbicides ne peuvent pas être utilisés comme dans les systèmes d'agriculture biologique (Hauggaard-Nielsen et *al.*, 2008).

Hauggaard-Nielsen et *al.*,(2008) a signalé que lorsqu'on compare la culture intercalaire de la fève ou du pois avec les cultivars d'orge sur deux types de sols, la fève était un meilleur choix que le pois, en raison d'une meilleure complémentarité spatiale ou temporelle avec l'orge. Généralement le rendement en grains d'une culture mixte de la fève et des céréales sans engrais azotés était semblable au rendement en grains des céréales en culture unique fertilisées avec une quantité optimale de l'azote, mais le taux des protéines totales a été significativement plus élevé, à cause du contenu de la fève dans le grain mélangé (Jensen, 1986 ; Knudsen et *al.*, 2004 ; Hauggaard-Nielsen et *al.*, 2008).

Il y a maintenant des preuves indiquant une réduction de l'incidence et la sévérité de certaines maladies chez la fève et sa composante intercalaire lorsque les plantes sont cultivées ensemble plutôt que séparément (Kinane et Lyngkjær, 2002 ; Hauggaard-Nielsen et *al.*, 2008).

E. Compétition de l'arbre vis-à-vis des plantes annuelles : eau et lumière

I. Lumière

La lumière est une ressource très importante pour la production car elle est la source d'énergie pour la photosynthèse et la transpiration. La croissance et le développement des plantes dépendent largement de la photosynthèse. Dans les systèmes agroforestiers, la disponibilité de la lumière est la limitation la plus importante de la performance des cultures annuelles de sous-étage. Le taux de photosynthèse des cultures de sous-bois diminue avec la réduction de l'intensité lumineuse (Hasanuzzaman, 2017).

Les effets de la disponibilité de la lumière sur la fixation de l'azote atmosphérique sont moins certains. Des études ont suggéré que la compétition pour la lumière peut diminuer la fixation de N_2 en réduisant la croissance. Carlsson et al (2009) ont trouvé que la concurrence des herbes pour la lumière peut avoir diminué la croissance de la plante et par conséquent limité la fixation de N_2 au niveau de la plante. Jensen (1996) a signalé que la concurrence de l'orge avait un effet négatif sur la fixation de l'azote dans les cultures intercalaires de pois, probablement aussi à cause de la concurrence accrue pour la lumière. Comme les espèces annuelles se retrouvent de plus en plus dans les systèmes de cultures intercalaires à base d'arbres, les effets de la dynamique de la lumière sur les processus biogéochimiques apparaissent comme une interaction importante.

II. Eau

Comme les nutriments, les systèmes agroforestiers sont également en concurrence pour l'eau. Les arbres, dans les systèmes agroforestiers, ont tendance à entrer en compétition avec les cultures pour l'humidité, réduisant ainsi la production de ces cultures. Selon certaines études, la concurrence pour l'humidité était la principale cause de la réduction du rendement des cultures à l'interface arbre-culture annuelle (Hasanuzzaman, 2017).

F. Stress hydrique

I. Définition

Les auteurs qui ont travaillé sur le stress hydrique sont nombreux, et les définitions sont multiples également. Passioura (1996) considère que le stress hydrique est une circonstance de manque d'eau qui provoque une baisse de la croissance, du développement et/ou la production de la plante ayant subi le stress.

Pour Girardin (1999), cité par Pindard (2000), il y a un stress chez la plante quand l'état hydrique perturbe le métabolisme.

Ce phénomène est lié à la réduction d'humidité du sol et à l'augmentation de la demande évaporative (Levitt, 1980 ; Acevedo, 1991 ; Blum, 1996). La plante perd une partie de son eau d'imbibition et la majeure partie des processus physiologiques commence à être affectée (Gate, 1995).

Selon Cruziat (1995), il y a stress hydrique pour un végétal lorsque son état hydrique commence à affecter de manière significative son état physiologique par rapport à ce qu'il serait en conditions d'alimentation hydrique optimale. Le même auteur considère que l'excès d'eau est une forme de stress hydrique par excès.

II. L'eau dans la plante

3. Rôle de l'eau dans la plante

L'eau est un élément vital pour la croissance et le développement des plantes. Il est inutile de préciser l'importance de l'eau chez les êtres vivants. Pour les plantes, l'eau assure la turgescence, et donc le port végétal. Elle permet le transport des substances minérales, nutritives, d'éléments issus du métabolisme (Cruziat, 1995).

Outre son rôle dans la photosynthèse, le transport et l'accumulation des éléments nutritifs ainsi que dans la division cellulaire et la régulation thermique, l'eau joue un rôle essentiel dans la croissance et le développement des plantes cultivés (Riou, 1993).

L'équilibre hydrique de la plante passe par une perte de vapeur (transpiration). Si l'absorption de l'eau par la plante est inférieure à la demande évaporatrice de l'atmosphère, on parle alors d'une situation de déficit hydrique (Acevedo, 1991 ; Blum, 1996) et par conséquent, le fonctionnement de la plante commence à être affecté.

Selon Mouhouche (2001), Les principaux rôles de l'eau dans la plante sont de trois types :

- d'abord l'eau assure par son flux important une régulation thermique essentielle dans la plante : la transpiration consomme une énergie qui échaufferait la plante et la conduirait à la mort en l'absence d'eau.
- ce flux important s'accompagne de circulation d'eau dans la plante, qui permet le transport des éléments minéraux (sève brute) et, moins directement, des assimilats (sève élaborée) qui permettent la croissance et le remplissage des organes
- la présence d'eau maintient les cellules en état de turgescence. Il s'agit en particulier

des cellules des organes en croissance, auxquels l'eau est nécessaire, et des stomates, par lesquels se font simultanément les échanges d'eau (transpiration) et de gaz (CO₂ et O₂)

4. Contenu en eau de la plante

Dans le monde végétal, l'eau est l'élément constituant pondéral le plus important, puisqu'il représente 85 à 90% durant la période active de végétation (De Raissac, 1992) et 60 à 80% du poids frais de la plante à la sénescence (Tardieu et *al.* 1995 ; Cruiziat, 1995 ; Monneveux et Belhassen, 1996).

La matière fraîche de la plante est composée d'environ 70 à 80 % d'eau (Helleret *al.*, 1998). La grande quantité d'hydrogène et d'oxygène des constituants de matière sèche provient de l'eau, il reste donc une source alimentaire directe (Gate, 1995). Les différents organes de la plante renferment entre 80 à 90 % d'eau, c'est l'eau d'imbibition (Bethenod, 1980).

Tardieu et *al.* (1995) considèrent que l'activité physiologique d'une plante vasculaire est affectée dès que la teneur en eau de ses organes diminue de 15 à 25% de sa valeur maximale selon les espèces.

III. Réponse de la plante au stress hydrique

La réponse de la plante au stress est complexe car elle dépend à la fois de la sévérité du stress, de sa durée, de la phase de développement et de l'état dans lequel se trouve la plante quand le stress est déclaré (Aidaoui, 1994).

La sécheresse, l'un des stress environnementaux, est le facteur le plus important qui limite la production végétale dans la majorité des champs agricoles du monde (Hasan et Tacettin, 2010). Elle affecte gravement la croissance des plantes, le rendement et la qualité des grains, et provoque des changements morphologiques, physiologiques, biochimiques et moléculaires chez les plantes (Zarafshar et *al.*, 2014). Cependant, les différentes espèces végétales peuvent varier dans leur sensibilité et leur réponse au manque d'eau. Selon Amede et Schubert (2003), la féverole est plus sensible aux déficits hydriques que la fève commune, le pois et le pois chiche.

La sécheresse affecte sévèrement la production de biomasse végétale (Shao et *al.*, 2008) et modifie leurs composants morphologiques par une diminution de la hauteur, de la surface foliaire, du nombre de feuilles et par conséquent de la production de biomasse végétale.

De plus, les constituants du rendement tels que le nombre et la taille des grains sont diminués (Jaleel *et al.*, 2009).

Les fèves cultivées dans des conditions de déficit hydrique ont des teneurs en protéines (Alghamdi, 2009) et en soufre (Schumacher *et al.*, 2011) plus élevées que celles cultivées dans des conditions d'eau adéquate. Dans les environnements sujets à la sécheresse, la réduction de la biosynthèse des protéines est due à la réduction de la fixation et le transfert de l'azote (Singh, 2007). D'autre part, Smith (2018) a rapporté que les sécheresses ont causé des réductions de rendement mais n'ont pas altéré la nutrition minérale.

Le déficit hydrique chez la fève entraîne une réduction significative de la longueur des entrenœuds, du nombre et de la taille des feuilles, de la matière sèche des pousses, du nombre de gousses par plante et de la production de graines (Mwanamwenge *et al.*, 1999 ; Mohamad Zabawi et Dennett, 2010). La réduction du poids frais et sec des organes de la plante, ainsi que de la surface foliaire et de la maturité précoce, sont des réponses clés pour atténuer l'effet de la sécheresse sur les plantes (Farooq *et al.*, 2009).

La sécheresse affecte de nombreux aspects de la physiologie végétale, notamment la photosynthèse nette, la teneur en eau relative, la teneur en chlorophylle et l'activité du photosystème II (PSII) (Pandey et Shukla, 2015). Les valeurs de tous ces paramètres sont réduites en cas de stress hydrique chez la fève (Ammar *et al.*, 2014 ; Siddiqui *et al.*, 2015).

Selon Ghassen Abid *et al.* (2017), le déficit hydrique a réduit la croissance des plantes et a provoqué un déséquilibre physiologique. Il a également diminué l'activité des enzymes antioxydantes. Ce déficit hydrique a augmenté la teneur de la proline, des sucres solubles et des protéines.

Par rapport à l'échange gazeux foliaire, la fixation symbiotique d'azote des légumineuses à grains peut être particulièrement sensible à l'assèchement du sol. Une fixation élevée de l'azote est généralement observée chez la fève dans des conditions optimales, alors que les sécheresses peuvent considérablement altérer la fixation de l'azote (Kabbadj *et al.*, 2017 ; Neugschwandtner *et al.*, 2015). En cas de déficit hydrique, les modifications de l'environnement bactérien entraînent un déclin de la fixation de l'azote (Guerin *et al.*, 1990) et une réduction du nombre de nodules chez la féverole (Sangakkara *et al.*, 1996).

L'assèchement du sol peut avoir également une grande influence sur l'utilisation de l'eau par les plantes. Ritchie (1981) a proposé un modèle de réponse, pour les processus végétaux, basé sur la fraction d'eau extractible. La réponse des plantes à l'assèchement du sol peut généralement être représentée par deux segments linéaires avec un plateau initial ne montrant

aucune sensibilité à l'assèchement du sol, suivi d'une diminution linéaire. Le seuil de la diminution du taux de transpiration varie selon les génotypes (Sadras et Milroy 1996).

Un seuil élevé permet à la culture d'être conservatrice dans l'utilisation de l'eau du sol afin qu'il y ait plus d'eau disponible dans le sol pour soutenir l'activité physiologique de la culture pendant les sécheresses de fin de saison. Cependant, aucune information n'existe sur la réponse de la transpiration à l'assèchement du sol de la fève. L'ensemble de ces observations illustre l'importance des réponses physiologiques aux sécheresses chez la fève et l'influence que cela a sur le rendement, ses composantes et la qualité de la récolte.

IV. Mécanismes d'adaptation au déficit hydrique

Afin de lutter contre le risque de dessèchement, les plantes ont recours à des comportements qui leur permettent de survivre à des situations de déficit hydrique par des méthodes d'adaptation (Robelin, 1983 ; De Raissac, 1992).

L'adaptation à la sécheresse d'une plante cultivée, se définit comme la capacité de cette dernière à survivre et croître du point de vue physiologique et du point de vue agronomique par l'obtention d'un rendement plus élevé que celui des plantes sensibles (Turner, 1979).

La résistance globale d'une plante à la sécheresse apparaît comme le résultat de nombreuses modifications phénologiques, anatomiques, morphologiques et biochimiques interagissant pour permettre le maintien de la croissance, le développement et de la production (Araus *et al.*, 1993 ; Hsissou, 1994).

1. L'esquive

La première façon d'éviter le déficit hydrique est l'esquive (Grieu *et al.*, 2008). Dans ce cas, la plante agit sur la durée de son cycle végétatif pour échapper à la contrainte hydrique en réalisant son cycle végétatif en dehors de la période de sécheresse (Robelin, 1983 ; De Raissac, 1992 ; Winkel et Do, 1992)

La stratégie la plus utilisée par les sélectionneurs pour identifier les variétés plus tolérantes aux stress est l'esquive par raccourcissement de la durée du cycle (Acevedo *et al.*, 1995).

La précocité est la plus souvent associée à une amélioration du rendement et de l'adaptation aux stress conduisant à la régularité de la production (Pfeiffer, 1993).

Grâce à la précocité, le rendement de nombreuses variétés a été amélioré et ceci chez pratiquement toutes les espèces cultivées annuelles (Turner, 2001), les légumineuses (Subbarao, 1995), et les céréales (Fukai, 1995,1999).

Cependant, les sélections de variétés à cycle court ne permettent pas toujours d'améliorer les

rendements dans le cas où le déficit hydrique a lieu aussi au cours de cycle (Khalifaoui, 1985 et 1991).

Par ailleurs, la réduction de la variabilité entraînant une réduction de la plasticité phénologique, est considérée comme une stratégie risquée dans le cas des légumineuses à floraison et à croissance déterminée (Turner et *al.*, 2001 ; Clavel et *al.*, 2005).

2. L'évitement

Définie comme étant la capacité de la plante à maintenir un état hydrique satisfaisant. Donc le maintien du potentiel hydrique interne satisfaisant en présence de contrainte hydrique (Levitt, 1985 ; Turner, 1986). Trois grands types de réponses permettent à la plante d'éviter ou, plus exactement, de retarder la déshydratation de ses tissus (Turner, 2001).

La première réponse est l'aptitude des racines à exploiter les réserves en eau du sol sous stress (Passiourra, 1988; Adda et *al.*, 2005).

La seconde réponse est constituée par la régulation de l'ouverture-fermeture des stomates. Elle conditionne les échanges entre CO₂ et H₂O et par conséquent la croissance et la productivité des cultures (Ludlow et Muchow, 1990 ; Turner, 1997).

La troisième correspond à l'ajustement osmotique que les plantes réalisent en réponse au déficit hydrique (Turner, 1986).

- **Capacité d'extraction de l'eau par le système racinaire :**

L'un des mécanismes les plus importants pour éviter la sécheresse est l'extension du système racinaire (Passioura 1983 ; Clarke et *al.* 1984 ; Jones et *al.* 1984 ; Muchow et *al.* 1986).

La morphologie des systèmes racinaires joue un rôle essentiel dans l'alimentation hydrique de la plante. La dynamique de croissance des racines apparaît, de ce fait, comme un facteur important de variabilité inter et intraspécifique de la tolérance au déficit hydrique (Hurd, 1974 ; O'Brien, 1979 ; Richards et Passioura, 1981 ; Benlaribi et *al.*, 1990 ; Khaldoun, 1990 ; Adda et *al.*, 2005 ; Sahnoune, 2005).

Hurd (1968) a constaté qu'une augmentation de la profondeur de l'axe principal, du front racinaire et la répartition uniforme du système racinaire sur l'ensemble du profil permettent une meilleure utilisation des réserves en eau des couches profondes du sol (Brown et *al.*, 1987 ; Ali Dib et *al.*, 1990 ; Adda et *al.*, 2005).

- **Régulation stomatique**

Selon Levitt, (1972), la régulation stomatique constitue le principal mécanisme de contrôle instantané des pertes en eau. La régulation de l'ouverture-fermeture des stomates dépend du

potentiel hydrique foliaire et de l'humidité de l'air au champ (Turner, 1997).

Une faible conductance conduit à une fermeture rapide des stomates en conditions de déficit hydrique (Rejeb et *al.*, 1991 ; Merah, 2001). Les génotypes à faible conductance sont plus sensibles à la baisse du potentiel hydrique foliaire que les génotypes à forte conductance.

Une faible conductance est généralement proposée comme un trait favorable à l'adaptation à la sécheresse (Jones et *al.*, 1980, 1993 ; 1998, ; Turner, 1986 ; Ludlow et Muchow, 1990).

La limitation de la transpiration est en grande partie obtenue par une fermeture des stomates.

Quand la plante est en manque d'eau pendant la journée, un mécanisme régulateur intervient naturellement, en ralentissant l'évaporation, les stomates se ferment partiellement, avec comme conséquence, une baisse de l'activité chlorophyllienne (Gauthier et *al.*, 1993).

La fermeture des stomates est contrôlée par un signal hormonal, l'acide abscissique ou ABA en réponse à l'assèchement du sol (Tardieu, 1996). Chez les légumineuses, les travaux sur l'intervention de l'ABA ne concernent que le lupin (Turner ; Gallardo, 1994).

- **Ajustement osmotique**

Ce mécanisme permet de maintenir la conductance stomatique et la photosynthèse à des potentiels hydriques bas. Il intervient aussi en retardant la sénescence foliaire et en améliorant l'extraction de l'eau par les racines (Turner et *al.*, 2001, Turner, 1997, Turner et Jones, 1980). Le niveau d'ajustement osmotique réalisé par les légumineuses est modeste comparé à celui des céréales (Subbarao, 1995).

Il améliore l'efficacité d'utilisation d'eau, retarde la sénescence, et maintient le transfert des assimilés vers le grain, augmentant par conséquent l'indice de récolte (Araus et *al.*, 1999). Il constitue également le processus majeur permettant à la cellule de maintenir sa turgescence sous contrainte hydrique (Turner, 1986 ; Lew, 2004)

Parmi les composés organiques et minéraux qui interviennent dans l'ajustement osmotique, on évoque fréquemment les nitrates, le potassium, les acides organiques, les sucres solubles et la proline (Monneveux, 1991).

Ces ions n'interviennent pas significativement dans le changement du potentiel osmotique induit par le stress (Kameli et Losel, 1996). Sous stress hydrique, ce sont les sucres solubles, et plus particulièrement le glucose, qui contribuent le plus à l'ajustement osmotique (Kameli et Losel, 1996).

3. La tolérance

La tolérance est la stratégie qui permet à la plante d'assurer ses fonctions physiologiques

malgré une dégradation de son état hydrique. Le maintien de la turgescence lors d'un déficit hydrique permet de retarder la fermeture des stomates, de maintenir le volume chloroplastique et de réduire le flétrissement foliaire (Passioura, 2006). Le même auteur en 1996, montre que la tolérance à la sécheresse est souvent confondue avec la notion de survie en condition de manque d'eau, d'où la confusion entre la tolérance et le xérophytisme qui est une accommodation à un développement presque normal en condition de manque d'eau quasi permanente (Passioura, 1996). Il a montré également que la tolérance n'implique pas un potentiel de production élevé, mais le maintien d'un minimum de production suite à un stress temporaire.

Cette tolérance peut se faire par une adaptation morphologique à long terme par un renforcement du système racinaire en profondeur et en densité (Birand, 1961 ; Zohary, 1961 ; Vieira Da Silva, 1967, 1973 ; Daunay, 1985). Elle peut aussi se faire par réduction du LAI par chute et/ou réduction de la surface de chaque feuille (Oppenheimer, 1961 ; Zohary, 1961 ; Tardieu et al. 1995), ou à court terme enroulement ou orientation des limbes qui captent moins de rayonnement (Robelin, 1983).

Partie 2 : Matériel et Méthodes

I. But de ce travail

La finalité de ce travail est de tester le potentiel de rendement de quelques variétés de fève et de féverole, ainsi que leurs paramètres agronomiques et physiologiques en conditions de stress hydrique dans un essai en split plot.

II. Site expérimental

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

III. Matériel végétal

Notre étude est menée sur quatre variétés de fève et deux de féverole. Les variétés utilisées sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 1: différentes variétés utilisées.

	variété	type
V1	Aguadulce	Fève
V2	Extra Hative	Fève
V3	Hiba	Fève
V4	Defes	Fève
V5	Alfia17	féverole
V6	Zina	féverole

IV. Protocole expérimental

1. Itinéraire technique

L'itinéraire technique utilisé dans notre essai expérimental est comme suit :

Tableau 2: Itinéraire technique INRA (2021)

Opération	Date
Labour profonds 3 disque	28-09-2020
Cover-crop	13-10-2020
Epandage d'engrais	25-10-2020
Enfouissement d'engrais (cover-crop)	03-11-2020
Semis manuel	21-12-2020
Désherbage	15-02-2021
Traitement insecticide	19-02-2021
Traitement Orobanche	02-03-2021
Désherbage	15-03-2021
Installation irrigation	26-03-2021
Traitement insecticide	27-03-2021
Découpage des allées	27-03-2021
Pose des goutteurs	30-03-2021
Traitement insecticide	05-04-2021
Traitement insecticide	20-04-2021

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. (figure2).

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.

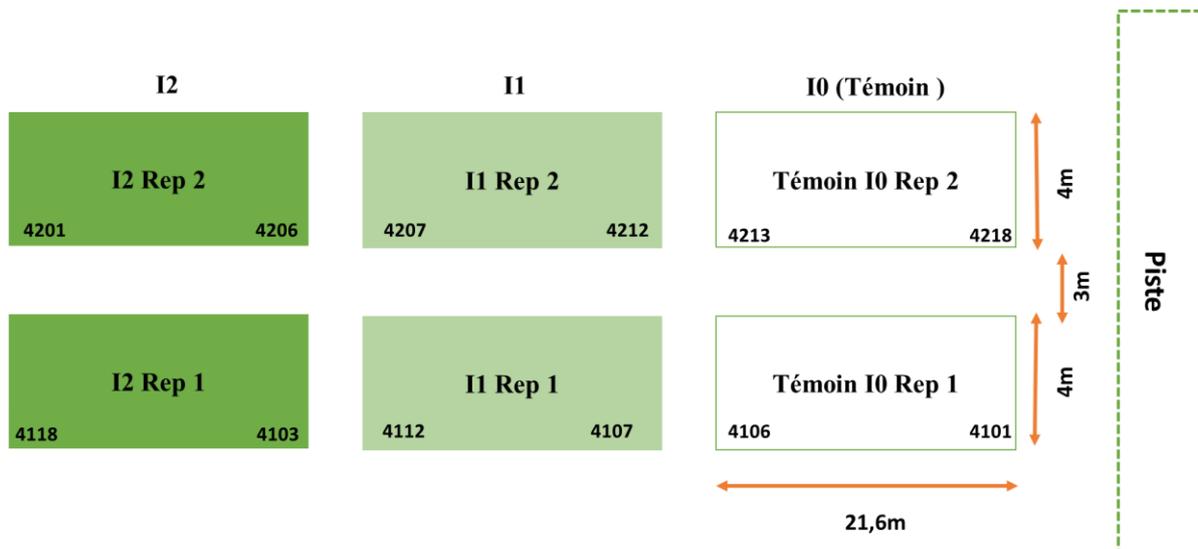


Figure 1 : Plan de la parcelle d'expérimentation

3. La pluviométrie du Domaine Expérimental de Douyet pour la saison 2020/2021.

Avec la température, les précipitations représentent les facteurs les plus importants du climat. La quantité de précipitations est exprimée en millimètres, elle représente l'épaisseur de la couche d'eau qui resterait sur une surface horizontale s'il n'y avait ni écoulement ni évaporation (Faurie et *al.*, 2003).

Les moyennes mensuelles des pluviométries (en mm) durant la campagne agricole 2020-2021 enregistrées au niveau de la station d'étude sont présentées dans la figure 3.

Il ressort de ces données que les mois les plus arrosés, enregistrant des moyennes qui dépassent 100 mm, étaient janvier et avril avec respectivement 109 mm et 113,8 mm. Par contre, la pluviométrie est nulle pendant les mois de septembre 2020 et octobre 2020.

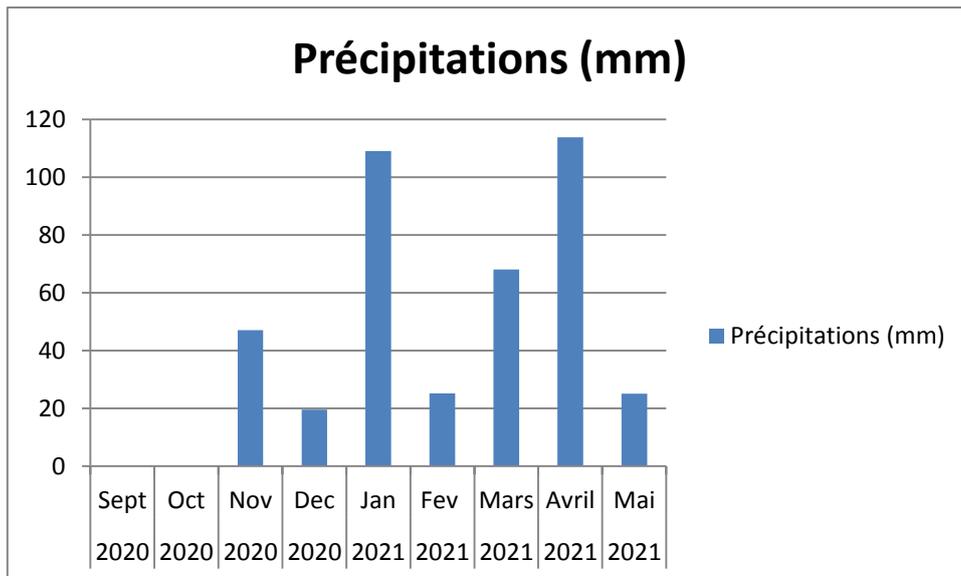


Figure 2 : Variation de précipitation (mm) au niveau du Domaine Expérimental de Douyet, durant la campagne 2020-2021.

4. Mesure de la conductance stomatique (paramètre physiologique) :

La mesure des paramètres physiologiques (conductance stomatique, ...) est réalisée deux fois à partir de 12h00 sur deux feuilles saines de chaque variété à l'aide d'un Poromètre (Leaf porometer, model SC1, DECAGON DEVIS, version, 2012).



Figure 3 : Poromètre utilisé

5. Mesure des paramètres agronomiques :

➤ Hauteur de la plante :

Au stade maturité physiologique, la hauteur (en cm) de la plante est mesurée de la base au sommet de la plante.

➤ **Epaisseur de la tige :**

Le diamètre de la tige principale (en mm) est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse au niveau du 4^{ème} nœud pour chaque plante.



Figure 4 : Pied à coulisse utilisé dans nos mesures.

➤ **Composantes du rendement :**

Les composantes du rendement suivantes ont été mesurées :

- Nombre de tiges par plante.
- Nombre de gousses par tige principale.
- Nombre de gousses pour chaque tige secondaire.
- L'étage du premier nœud fructifère (Rang).
- Nombre de nœuds fructifères par tige principale.
- Nombre de nœuds fructifères pour chaque tige secondaire.
- Nombre de graines par tige principale.
- Nombre de graines par tige secondaire
- Poids de graines par tige principale mesuré à l'aide d'une balance (Sartorius Excellence E 12000 S Lab Laboratory Balance Scale).
- Poids de graines par tige secondaire.

Ces composantes de rendements sont mesurées après maturité complète sur cinq plantes par variété prélevées au hasard au niveau des deux répétitions.

6. Analyse de données

Les données recueillies ont été soumises à une analyse de variance ANOVA à l'aide du logiciel SPSS.

On utilise l'analyse de la variance pour comparer plusieurs moyennes. Nous avons réalisé une analyse en `split_plot` dans le but de savoir s'il y'a une différence significative entre les composantes de rendements en fonction des variétés, de l'irrigation et de l'interaction variété X irrigation.

La modélisation par le modèle de cheminement ou Path Analysis a été réalisée par le module Lavaan sous le logiciel R (Rosseel, 2012).

Partie 3 : Résultats et discussions

I. Résultats de la conductance stomatique

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) de la conductance stomatique sont résumés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Analyse de la variance (ANOVA) pour la conductance stomatique

Variable	Variété		Irrigation		Variété X Irrigation	
	<i>P_{value}</i>	Signification	<i>P_{value}</i>	Signification	<i>P_{value}</i>	Signification
Conductance stomatique	0,361	NS	0,000	***	0,233	NS

L'analyse de la variance de la conductance stomatique a montré que :

Le traitement hydrique présente un effet très hautement significatif sur la conductance stomatique de la plante. Par contre, l'effet variétal et l'interaction entre les deux facteurs (effet hydrique et variétal) présente un effet non significatif pour l'élaboration de ce paramètre physiologique. Ce qui signifie que la conductance stomatique est affectée par le déficit hydrique.

La réduction de la conductance stomatique serait accompagnée par une diminution de la densité stomatique (Escalona *et al.* 2013). L'augmentation de la résistance stomatique est souvent prise comme un repère de l'apparition d'un stress hydrique. Choat et ses coll. (2016) confirment que les variétés à forte résistance stomatique sont plus sensibles au déficit hydrique.

II. Variabilité des composantes du rendement:

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) sont résumés dans le tableau 4.

1. Effet de la variété :

Les résultats de l'analyse de la variance ont indiqué d'une part que la variété a un effet très hautement significatif sur la majorité des composantes du rendement à savoir la hauteur de la plante, Nb de gousses/TP, Nb de gousses/TS, Nb de nœuds fructifères/TP, Nb de nœuds fructifères/TS, Rang TP, Diamètre, Nb de graines/TP, Nb de graines/TS, Poids des graines/TP.

D'autre part, la variété présente un effet significatif sur le reste des composantes de rendements dont le Poids des graines/TS et le Nb de tiges/plante.

Ces résultats corroborent ceux de Matkovic Stojšin et *al.*, (2018). En effet, ces auteurs annoncent, dans leur étude sur le blé qu'il existe des différences très significatives ($p < 0,01$) entre les géotypes du blé pour toutes les composantes du rendement. A cet effet, la variation génétique était présente.

2. Effet de l'irrigation :

L'analyse de la variance (ANOVA) a montré l'existence d'un effet non significatif (NS) du traitement hydrique sur toutes les composantes de rendements à l'exception du Nb de gousses/TP et le Nb de nœuds fructifères/TP, qui ont affiché un effet significatif. Cependant, le nombre de graines/TP a prouvé un effet très hautement significatif. Ceci pourrait être expliqué par la bonne précipitation coïncidente avec la période critique.

Cependant en cas d'installation d'un déficit hydrique on doit s'attendre à une chute logique des différents composantes de rendements comme a été reporté par Mwanamwenge et *al* (1999) ; Mohamad Zabawi et Dennett(2010). Ces auteurs ont indiqué dans leur ouvrage que le déficit hydrique chez la fève entraîne une réduction significative du nombre de gousses par plante et de la production de graines. De même, Jaleel et *al.* (2009) ont montré que les constituants du rendement tels que le nombre et la taille des grains ont été diminués.

De même pour Shao et *al.* (2008), ces auteurs ont souligné, dans leur étude, que la sécheresse affecte sévèrement la production de la biomasse végétale et modifie leurs composantes morphologiques par une diminution de la hauteur. De même pour les résultats trouvés par Mwanamwenge et *al.* (1999), confirmées par Zabawi et Dennett (2010) expliquant que le déficit hydrique chez la fève entraîne une réduction significative de la longueur des entrenœuds, du nombre et de la taille des feuilles, et de la matière sèche des pousses.

3. Effet variété X irrigation :

L'effet de l'interaction variété X irrigation a indiqué l'existence de différences significatives concernant les traits étudiés. En effet, le nombre de tiges, le nombre de gousses/TS, le nombre de nœuds fructifères/TS, le rang, le nombre de graines/TS et le poids des graines/TS ont montré un effet non significatif (NS). Pourtant, la hauteur a montré un effet très hautement significatif, suivi du diamètre de la tige et du nombre de graines/TP exprimant un effet hautement significatif.

Tableau 4 : Analyse de la variance (ANOVA) pour les paramètres agronomiques étudiés. . TP : tige principale ; TS : tige secondaire ; (***) : très hautement significatif ; (**) hautement significatif ; (*) significatif ; NS : non significatif.

Variables dépendante	Variété		Irrigation		Variété x Irrigation	
	<i>P_{value}</i>	Signification	<i>P_{value}</i>	Signification	<i>P_{value}</i>	Signification
Hauteur	0,000	***	0,208	NS	0,000	***
Nb de tiges/plante	0,030	*	0,236	NS	0,502	NS
Nb de gousses/TP	0,000	***	0,015	*	0,012	*
Nb de gousses/TS	0,000	***	0,880	NS	0,946	NS
Nb de nœuds fructifères/ TP	0,000	***	0,032	*	0,016	*
Nb de nœuds fructifères/ TS	0,000	***	0,881	NS	0,830	NS
Rang TP	0,000	***	0,340	NS	0,770	NS
Diamètre	0,000	***	0,522	NS	0,009	**
Nb de graines/TP	0,000	***	0,000	***	0,006	**
Nb de graines/TS	0,000	***	0,417	NS	0,961	NS
Poids des graines/TP	0,000	***	0,078	NS	0,052	NS
Poids des graines/TS	0,031	*	0,052	NS	0,926	NS

III. Corrélations partielles entre les composantes du rendement:

L'étude de la matrice de corrélation a permis de mettre en évidence les plus importantes corrélations du rendement en graines avec ses composantes (annexe 1).

Les valeurs proches de 1 indiquent que deux variables se comportent de manière presque identique. Inversement, une valeur proche de -1 indique que deux traits se comportent de manière opposée, c'est-à-dire que lorsqu'un élément augmente, l'autre diminue. Une valeur proche de 0 indique que les deux éléments sont indépendants l'un de l'autre.

1. Caractères très hautement corrélés.

Les résultats de la corrélation entre les paramètres agronomiques étudiés ont révélé d'un côté, l'existence d'une corrélation positive très hautement significative de la **hauteur** avec le Nb de nœuds fructifères/TP (**0,243*****), Rang/TP (**0,263*****), et diamètre (**0,408*****). A part ces corrélations avec la hauteur, les autres composantes n'étaient pas corrélées significativement avec la hauteur.

A l'opposé, les résultats, trouvés par Ben Mbarek et *al.* (2012) dans leur étude sur le pois chiche *Kabuli*, ont montré que la hauteur moyenne des plantes est en corrélation positive, hautement significative, avec le nombre de gousses/m², nombre de graines/m², nombre de graines par gousse, poids des gousses/m². Dans le même sens, d'autres travaux ont montré que la hauteur moyenne des plantes est en corrélation significative élevée, positive, avec le nombre de gousses par plante (Arshad *et al.*, 2004)

D'un autre côté, une corrélation positive a été observée entre le **Nb de tiges** avec le Nb/de gousses/TS (**0,388*****), Nb/nœuds fructifères/TS (**0,465*****), Nb de graines/TS (**0,353*****) et Poids de graines/TS (**0,424*****).

De plus, le même type de corrélations a été trouvé entre le **Nb de gousses/TP** et le Nb de gousses/TS (**0,347*****), le Nb nœuds fructifères/TP (**0,835*****), le Nb nœuds fructifères/TS (**0,250*****), le Nb de graines/ TP (**0,828*****), et le poids de graines/TP (**0,362*****).

En outre, les résultats ont montré une corrélation positive très hautement significative entre **Nb de gousses /TS** avec Nb nœuds fructifères /TP (**0,265*****), Nb nœuds fructifères/ TS (**0,919*****), Nb de graines/ TS (**0,854*****), et Poids de graines /TS (**0,634*****).

De même, **Nb nœuds fructifères /TP** est en corrélation positive hautement significative avec le Nb de graines /TP (**0,724*****), et le Poids de graines /TP (**0,259*****).

Tel est aussi le cas pour le **Nb nœuds fructifères /TS** avec le Nb de graines /TS (**0,846*****), et le Poids de graines /TS (**0,669*****).

Enfin, **Nb de graines /TP** est en corrélation positive avec le poids de graines /TP (**0,610*****), tout aussi bien pour le **Nb de graines /TS** avec Poids de graines /TS (**0,822*****).

Les résultats de la corrélation ont montré non seulement une corrélation positive, mais également négative. Tel est le cas pour le **Rang du 1^{er} nœud fructifère sur la tige principale** avec le poids des graines/TP (**- 0,263*****).

2. Caractères hautement corrélés :

Dans un premier temps, les résultats ont montré une corrélation positive hautement significative du **Nb de gousses/TP** avec Nb de graines/TS (**0,218****).

Ensuite, une corrélation positive hautement significative du **Nb de gousses/TS** avec Nb de graines/TP (**0,229****).

Puis, le même type de corrélation a été observée pour le **Nb nœuds fructifères/TP** avec Nb nœuds fructifères/TS (**0,212****). Tel est le cas pour le **Nb de graines/TP** avec Nb de graines/TS (**0,223****). Et aussi le **poids de graines/TP** avec le poids de graines/TS (**0,207****).

Dans un deuxième temps, les résultats ont prouvé une corrélation positive pour le **rang/TP** avec le diamètre (**0,218****). Cependant, nous notons une corrélation négative de ce trait avec le Nb de graines/TP (**-0,198****)

3. Caractère corrélés significativement

Les résultats de la corrélation ont montré que la **hauteur** est en corrélation positive à effet significatif avec le Nb nœuds fructifères/TS (**0,166***). Aussi bien, le **Nb nœuds fructifères/TP** avec Nb de graines/TS (**0,163***), le **Nb de graines/TS** avec Poids de graines/TP (**0,156***) et le **Nb nœuds fructifères/TS** avec Nb de graines/TP (**0,182***).

Les caractères restants ont été non significativement corrélés.

IV. Path analysis

Modèle postulé

Le modèle postulé dans notre étude pour les trois traitements (témoin, I₁ et I₂) est réalisé sous la forme d'un diagramme de cheminement (Figure 5), fondé sur les données statistiques effectuées durant la période 2020-2021. Selon ce modèle théoriquement plausible, le rendement par plante est prédit par les variables indiquées dans la figure 7.

Ainsi, 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 :

- Diamètre TP ;

- Rang du premier nœud fructifère TP ;
- Hauteur TP ;
- Nombre de tiges secondaires.

Les variables endogènes, conditionnées entre autres par les variables exogènes, à savoir :

- Nombre de nœuds fructifères par TP ;
- Nombre de nœuds fructifères TS ;
- Nombre de gousses par TP ;
- Nombre de gousses par TS ;
- Nombre de graines par TP ;
- Nombre de graines par TS ; et
- La variable prédite : 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 $\mathcal{E}1$ à $\mathcal{E}7$ (Figure 5). 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 les lettres \mathbf{H}_1 à \mathbf{H}_{19} .

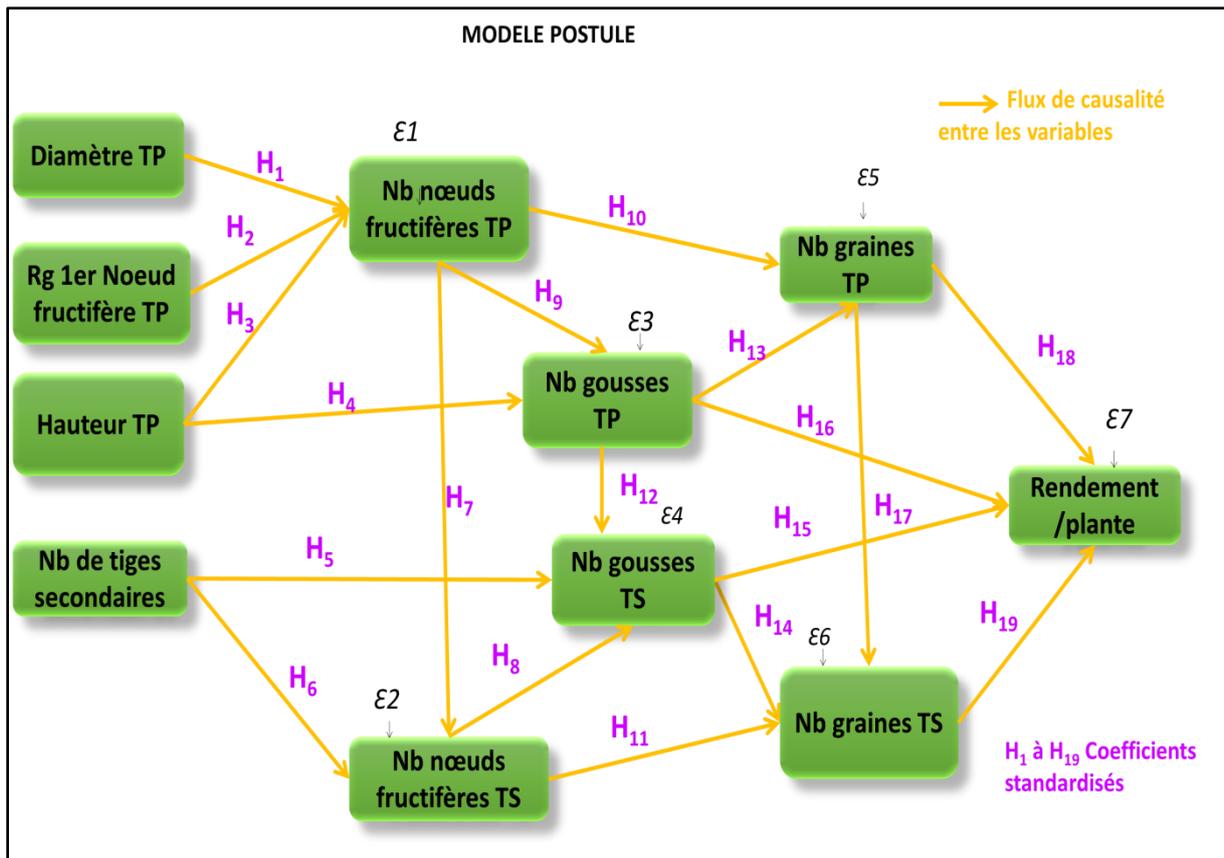


Figure 5 : Modèle initial postulé pour l’analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez *Vicia faba* L.

1. Path analysis appliqué sur le témoin

a. Test de validité du modèle

La première phase de l’analyse statistique du modèle de cheminement est le test de validité du modèle postulé.

Un ajustement acceptable du modèle est indiqué par une valeur de CFI (Comparative Fit Index ou Indice d’ajustement comparatif) supérieure ou égale à 0,90.

Suite à la vérification de ce paramètre : **CFI = 0,912**, le modèle postulé dans la présente étude est bien accepté.

b. Flux de causalité entre les différentes variables

Après vérification de la validité du modèle, nous avons calculé les coefficients standardisés (H₁ à H₁₉), ainsi que les coefficients de détermination R². Le nouveau diagramme obtenu correspond à la figure 6.

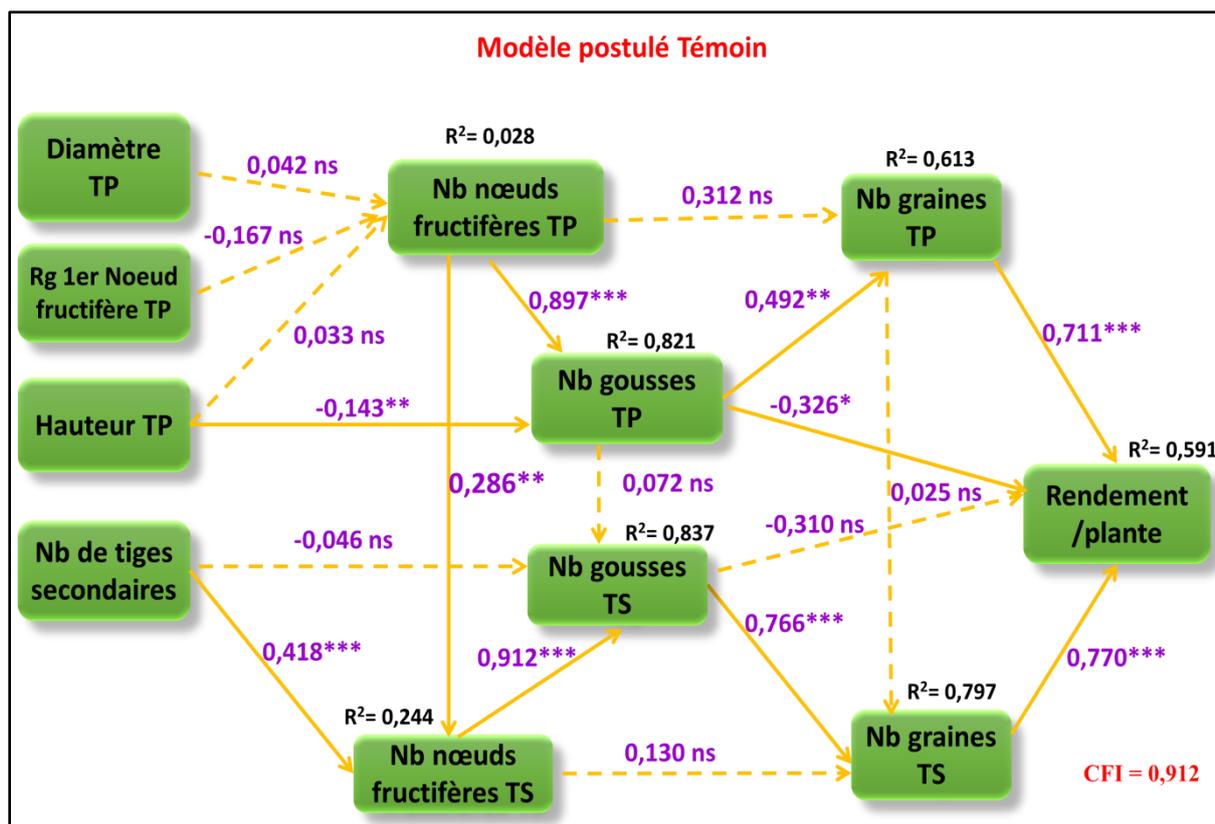


Figure 6: Modèle postulé pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez *Vicia faba* L.

(CFI : Indice d'ajustement comparatif ;

R^2 : Coefficient de détermination ;

*** : Flux de causalité très hautement significatif ; ** : Flux de causalité hautement significatif ; ns : Flux de causalité non significatifs).

Le diagramme path analysis (Figure 8), établi après le calcul des coefficients standardisés (H_1 à H_{19}), et des coefficients de détermination R^2 , nous permet d'estimer la significativité des flux de causalité entre différentes variables.

Effet direct très hautement significatif

Le nombre de graines par tige principale et par tiges secondaires ont un effet direct positif très hautement significatif sur le rendement par plante respectivement de ($H_{18}=0,711***$) et ($H_{19}=0,770***$).

Le nombre de nœuds fructifères par tige principale a un effet direct positif très hautement significatif sur le nombre de gousses par tige principale ($H_9=0,897***$).

Le nombre de tiges secondaires a un effet direct positif très hautement significatif sur nombre nœuds fructifères par tige secondaire ($H_6=0,418***$).

Nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires a un effet direct positif très hautement significatif sur le nombre de gousse par tige secondaire ($H_8=0,912^{***}$).

Le nombre de gousse par tiges secondaires a un effet direct positif très hautement significatif sur le nombre de graines par tige secondaire ($H_{14}=0,766^{***}$).

✚ Effet direct hautement significatif

La hauteur de la tige principale a un effet direct négatif hautement significatif sur le nombre de gousses par tige principale ($H_4= -0,143^{**}$).

Le nombre de nœuds fructifères par tige principale a un effet direct positif hautement significatif sur le nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires ($H_7=0,286^{**}$)

Le nombre de gousse par tige principale a un effet direct positif hautement significatif sur nombre de graines par tige principale ($H_{13}=0,492^{**}$).

✚ Effet direct significatif

Seul le nombre de gousse par tige principale présente un effet direct négatif significatif sur le rendement par plante ($H_{16}= -0,326^*$)

✚ Effet direct non significatif

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

- Le nombre de gousses par tiges secondaires et le rendement par plante ($H_{15}= -0,310$ ns)
- Nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires et le nombre de graines par tige principale sur le nombre de graines par tiges secondaires respectivement de ($H_{11}=0,130$ ns) et ($H_{17}=0,025$ ns).
- Le nombre de gousse par tige principale et le nombre de gousse par tiges secondaires, ($H_{12}=0,072$ ns)
- Le nombre de tiges secondaires et le nombre de gousse par tiges secondaires ($H_5= -0,046$).
- Le nombre de nœuds fructifères par tige principale et le nombre de graine par tige principale ($H_{10}=0,312$ ns)
- Le diamètre, le rang du premier nœud fructifère et la hauteur par tige principale, ont un effet non significatif sur le nombre de nœuds fructifères par tige principale respectivement de ($H_1=0,042$ ns), ($H_2= -0,167$) et ($H_3=0,072$).

Le coefficient de détermination R^2 est le rapport de la variance expliquée par le modèle, sur la variance totale. Ce coefficient nous permet de déterminer à quel point le modèle est adapté pour décrire la distribution.

Le coefficient de détermination de la variable rendement par plante $R^2=0,591$ nous permet d'affirmer que la causalité entre, d'une part, le nombre de graines par tige principale et par tige secondaire, le nombre de gousses par tige principal et le rendement par plante d'autre part, explique 59 % de la variabilité totale dans notre expérimentation.

Le nombre de gousse par tige secondaire permet d'expliqué 80 % de la variabilité total du nombre de graines par tige secondaires. Alors que le nombre de gousse par tige principale permet d'expliqué 61% de la variabilité total du nombre de graines par tige principale.

Le nombre de nœuds fructifères par tige secondaires ($R^2=0,837$) permet d'expliquer 84% de la variabilité de nombre de gousse par tige secondaires. Alors que la Hauteur et le nombre de nœuds fructifères $R^2=0,821$ explique 82% de la variabilité de nombre de gousse par tige principale.

Malgré la très haute signification des effets de causalité entre le nombre de tige secondaires et le nombre de nœud fructifères par tige secondaire d'une part et l'effet hautement significatif entre le nombre de nœud fructifères par tige principale et par tige secondaires d'une autre part, les deux facteurs n'ont pas expliqué une part importante de la variabilité ($R^2= 0,244$).

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.

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.

Effet total = Effets directs + Effets indirects

Afin de bien caractériser ces médiateurs, nous allons tester si la médiation, quand elle existe, est totale ou partielle. Cette analyse nous permettra une caractérisation détaillée des relations de notre modèle. A cet effet, et à partir du diagramme de cheminement adopté (Figure 6), nous allons tester le type de médiation par l'intermédiaire du module Lavaan sous R.

Le Nb graines/ TP est un médiateur entre le Nb de gousses TP et rendement (Figure 7).

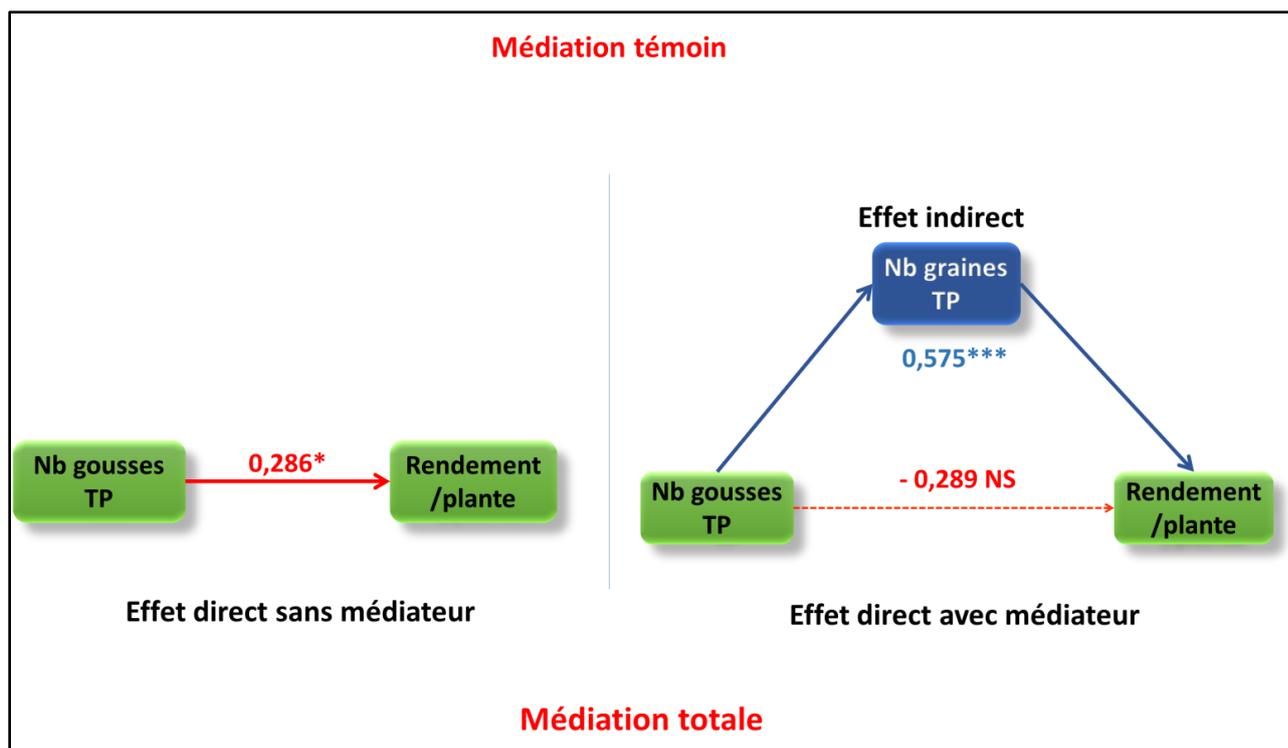


Figure 7 : Analyse du cheminement du Nb gousses/TP sur le Rendement par plante via le médiateur Nb graines/ TP.

Nous constatons, que le Nb gousses/TP n'a pas un effet direct significatif sur le rendement/plante à travers le médiateur nombre de graines/TP (-0,289 ns). En revanche, elle a un effet direct significatif sans ce médiateur (0,286*). Plus encore, elle a un effet indirect très hautement significatif sur le rendement par plante (0,575***). A cet effet, la médiation est une médiation totale.

d. Modèle final du path analysis du rendement et de ses composantes

Le modèle final de la médiation Path analysis retenu (Figure 8) 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 = 0,947**.

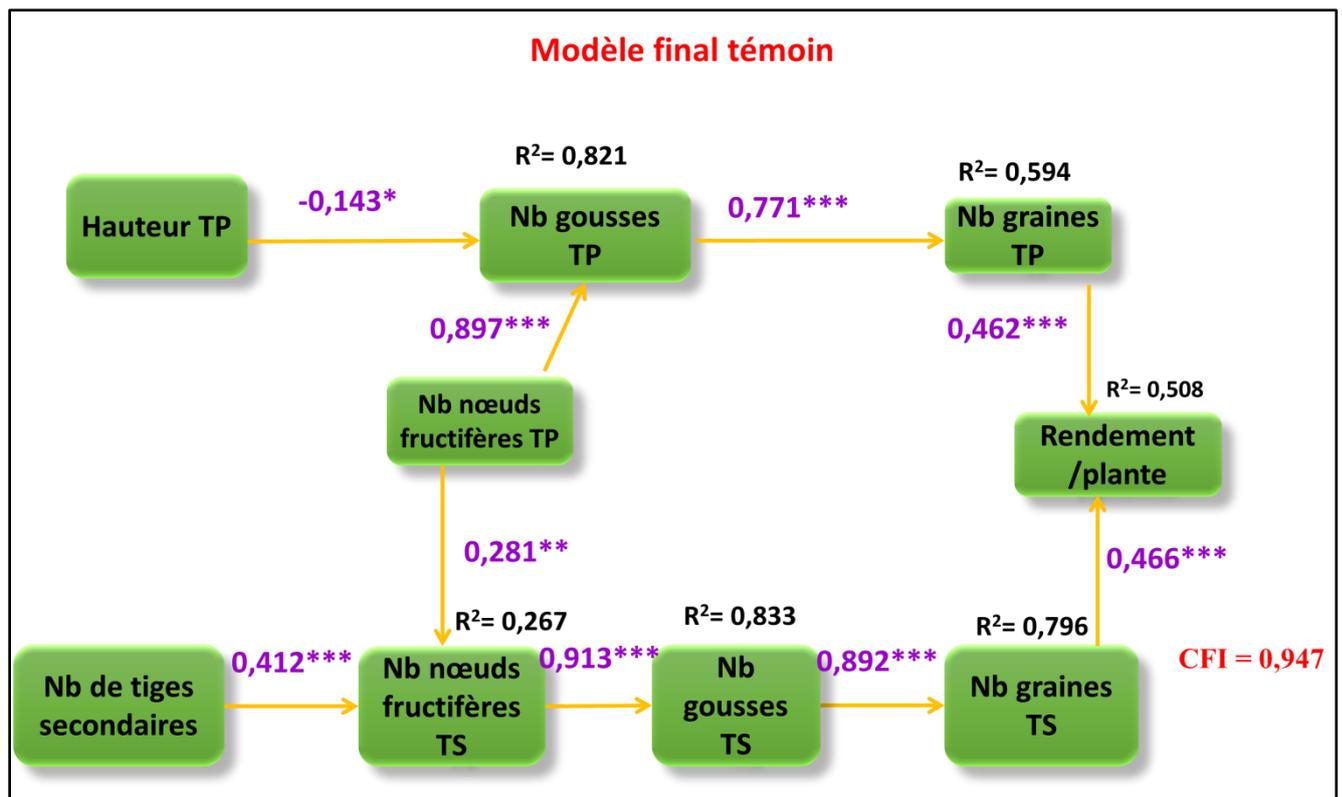


Figure 8 : Modèle final du Path analysis du rendement et ses composantes chez *Vicia faba* L.

A partir du modèle final (Figure 8), nous pouvons constater :

- Un flux de causalité direct très hautement significatif du Nb graines/TP et du Nb graines/TS sur le rendement par plante.
- Un flux de causalité indirect du Nb de tiges secondaires sur le rendement/plante via les médiateurs Nb nœuds fructifères/TS, Nb gousses/TS, et le Nb graines/TS.
- Un flux de causalité indirect de la hauteur TP sur le rendement/plante via les médiateurs Nb gousses/TP et le Nb graines/TP.
- Un flux de causalité indirect sur le rendement/plante du Nb nœuds fructifères/TP via les médiateurs Nb gousses/TP et le Nb graines/TP d'une part, et via le Nb nœuds fructifères/TS, Nb gousses/TS, et le Nb graines/TS d'une autre part.
- Un flux de causalité indirect sur le rendement/plante du Nb gousses/TP via le Nb graines/TP.
- Un flux de causalité indirect sur le rendement par plante du Nb nœuds fructifères/TS via les médiateurs Nb gousses/TS, et le Nb graines/TS.
- En fin, Un flux de causalité indirect sur le rendement/ plante du Nb gousses/TS via le médiateur Nb graines/TS.

Enfin et sur la base de l'analyse du modèle de cheminement illustré à la figure 8, nous avons constaté, que les facteurs directs les plus importants déterminant le rendement par plante de *Vicia faba* L., expliquent 51% de la variabilité totale, et sont :

- Nb graines/TP
- Nb graines/TS

2. Path analysis appliqué sur le traitement irrigation 1 I₁

a. Test de validité du modèle

Le modèle postulé pour le traitement d'irrigation I₁ est bien accepté **CFI=0,924**.

Après vérification de la validité du modèle, nous avons calculé les coefficients standardisés (H₁ à H₁₉), ainsi que les coefficients de détermination R². Le nouveau diagramme obtenu correspond à la figure 9.

b. Flux de causalité entre les différentes variables

Après vérification de la validité du modèle, nous avons calculé les coefficients standardisés (H₁ à H₁₉), ainsi que les coefficients de détermination R². Le nouveau diagramme obtenu correspond à la figure 9.

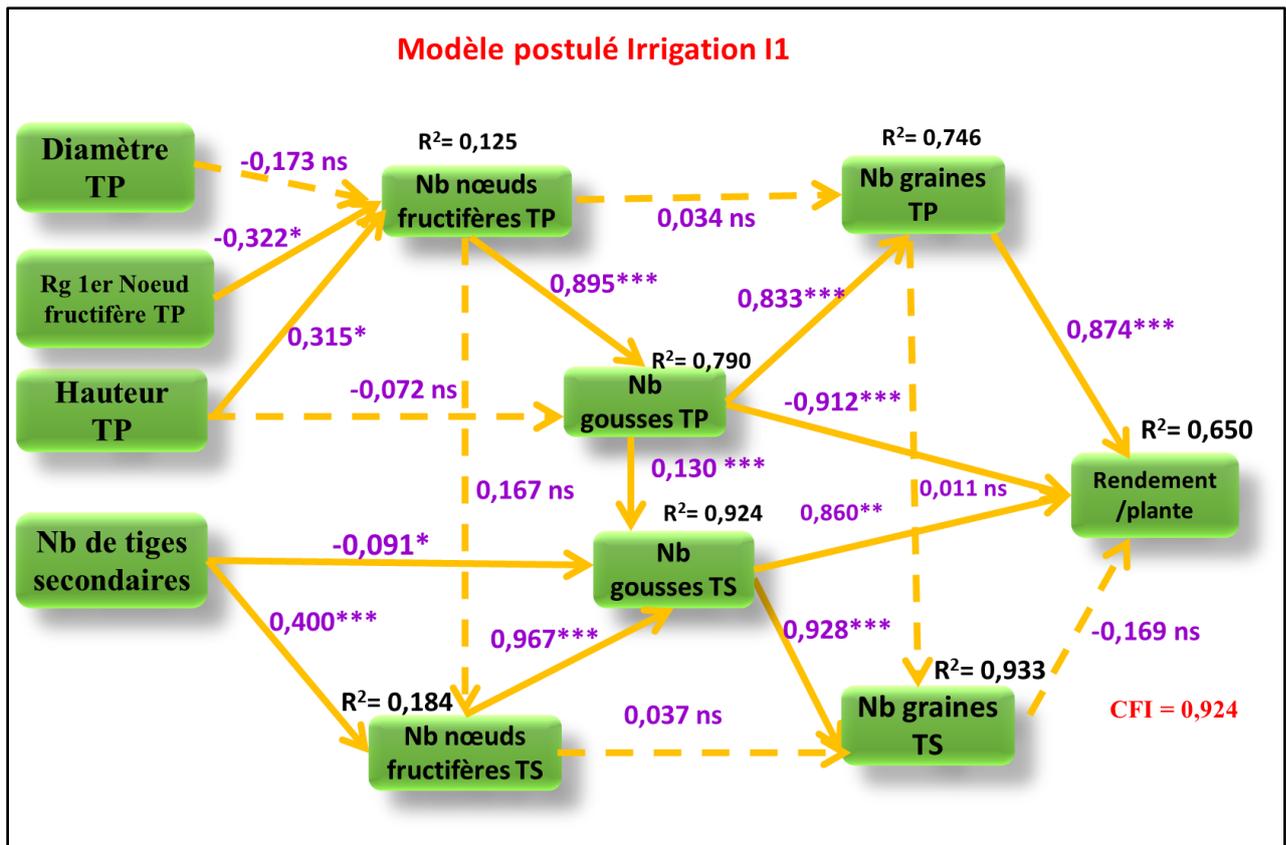


Figure 9 : Modèle postulé pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez *Vicia faba* L.

(CFI : Indice d'ajustement comparatif ;

R^2 : coefficients de détermination ;

*** : Flux de causalité très hautement significatif; ** : Flux de causalité hautement significatif ; ns :

Flux de causalité non significatifs).

Le flux de causalité entre différentes variables est comme suit :

✚ Effet direct très hautement significatif

Le nombre de graines par tige principale a un effet direct positif très hautement significatif ($H_{18} = 0,874***$) sur le rendement par plante.

Le nombre de gousse par tige principale a un effet direct négatif très hautement significatif ($H_{15} = -0,912***$) sur le rendement par plante. Et un effet direct positif très hautement significatif sur le nombre de graines par tige principale ($H_{13}=0,833***$), et sur le nombre de gousses par tiges secondaires ($H_{12}=0,130***$).

Le nombre de gousses par tiges secondaires a un effet direct positif très hautement significatif ($H_{14}= 0,928***$) sur le nombre de graines par tiges secondaires.

Le nombre de nœuds fructifères par tiges secondaires présente un effet direct positif très hautement significatif sur le nombre de gousse par tiges secondaires $H_8=0,967^{***}$.

Le nombre de tiges secondaires a également un effet direct positif très hautement significatif sur le nombre de nœuds fructifères par tige secondaires ($H_6=0,400^{***}$).

Le nombre de nœuds fructifères par tige principale un effet direct positif très hautement significatif sur le nombre de gousses par tige principale ($H_9=0,895^{***}$).

Effet direct hautement significatif

Seul le nombre de gousses par tiges secondaires qui présente un effet positif hautement significatif sur le rendement par plante ($H_{15}=0,860^{**}$).

Effet direct significatif

Le rang du premier nœud fructifère TP et la hauteur ont un effet direct significatif sur le nombre de nœuds fructifères TP respectivement de ($H_2= -0,322^*$) et ($H_3=0,315^*$).

Le nombre de tiges secondaires a un effet direct négatif significatif sur le nombre de gousses par tige secondaire ($H_5= -0,091^*$).

Effet direct non significatif

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

- Le nombre de graines TS et le rendement par plante ($H_{19}= -0,169$ ns).
- Le nombre de graines TP et le nombre de nœuds fructifères TS sur le nombre de graines TS respectivement ($H_{17}=0,011$ ns) et ($H_{11}=0,037$ ns).
- Le nombre de nœuds fructifères TP et le nombre de nœuds fructifères TS ($H_7=0,167$ ns) d'un côté. D'un autre coté Le nombre de nœuds fructifères TP et le nombre de graines TP ($H_{10}=0,034$ ns).
- La hauteur TP et le nombre de gousses TP ($H_4= -0,072$ ns).
- Le diamètre TP et le nombre de nœuds fructifères TP ($H_1= -0,173$ ns).

Le coefficient de détermination de la variable rendement par plante $R^2= 0,650$ nous permet d'affirmer que la causalité entre, d'une part le Nb graines TP, le nombre de gousses par tiges principale et secondaires et le rendement par plante d'autre part, explique 65 % de la variabilité totale dans notre expérimentation.

Le nombre de gousses par tige principale permet d'expliquer 75% la variabilité du nombre de graines par tige principale. Alors que, le nombre de nœuds fructifères par tige principale permet d'expliquer 79% la variabilité totale du nombre de gousses TP.

Les flux de causalité entre le Nb de tiges secondaires, Nb de nœuds fructifères TS, et le Nb de gousses TP vis-à-vis le Nb de gousses TS ont expliqué une part importante de la variabilité ($R^2=0,924$)

c. Analyse et interprétation de la médiation

➤ Médiation 1

Le Nb gousses/TS est un médiateur entre le Nb de gousses/TP et rendement

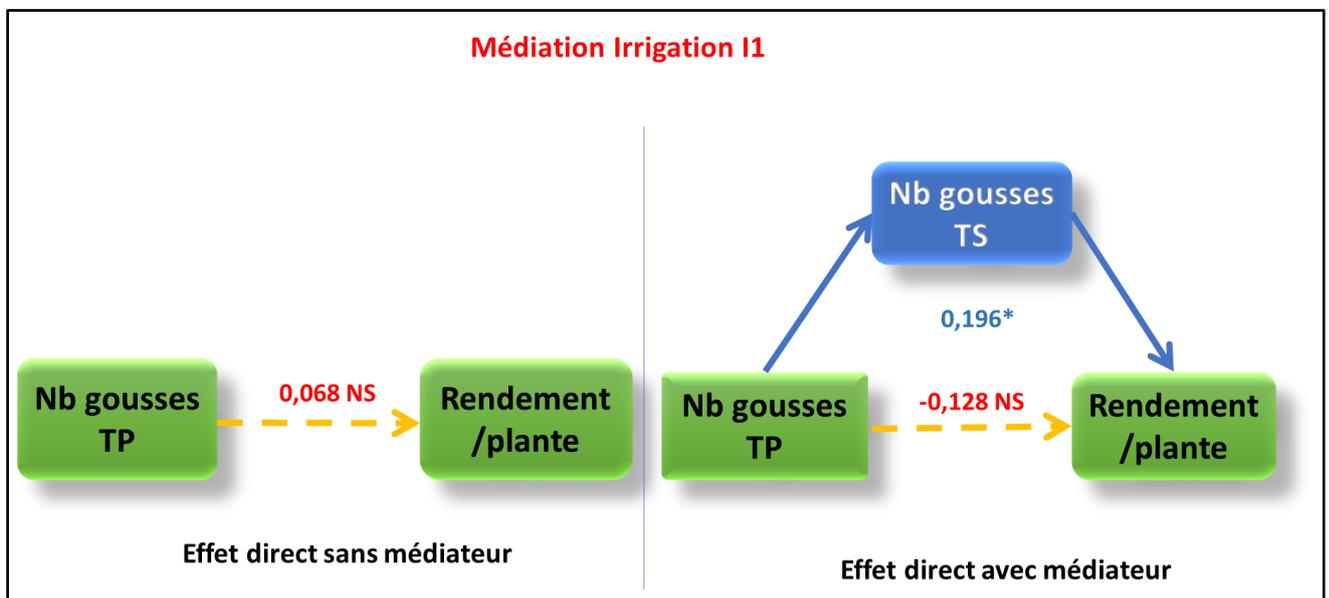


Figure 10 : Analyse du cheminement du Nb de gousses/ TP et rendement via un médiateur du Nb gousses/ TS

Le nombre de gousses TP a un effet direct non significatif sur le rendement par plante dans les deux cas avec médiateur (-0,128 ns) et sans médiateur (0,068 ns). Par contre le nombre de gousses TP a un effet indirect significatif (0,196*) sur le rendement par plante. A cet effet, la médiation est une médiation totale.

➤ Médiation 2

Le Nb graines/TP est un médiateur entre le Nb de gousses/TP et rendement

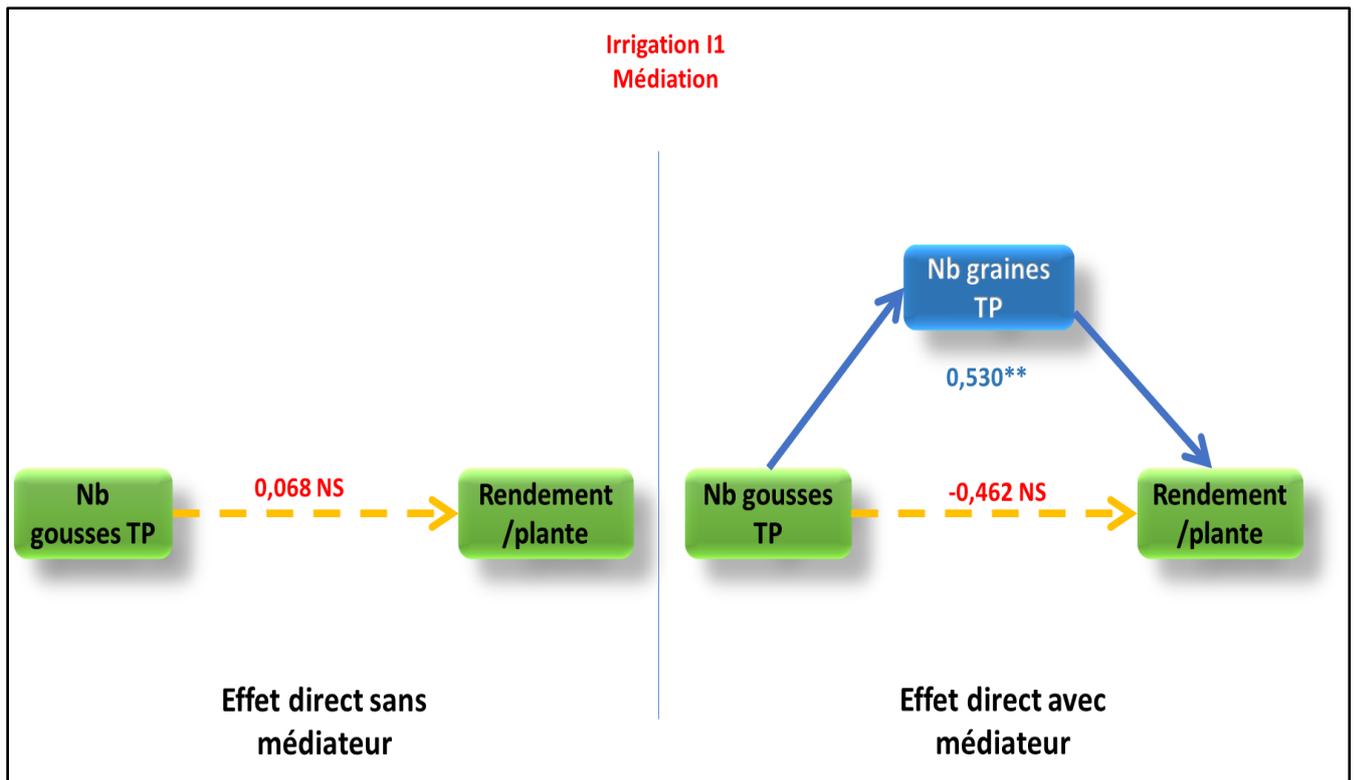


Figure 11 : Analyse du cheminement du Nb de gousses/ TP et rendement via un médiateur du Nb graines/TP

On constate que le nombre de gousse/TP n'a pas un effet direct significatif sur le rendement par plante avec médiateur (-0,462 ns) et sans médiateur (0,068 ns). Par contre il a un effet indirect hautement significatif (0,530**) sur le rendement par plante. A cet effet, la médiation est une médiation totale.

➤ Médiation 3 :

Le Nb nœuds fructifères/TS est un médiateur entre le Nb de gousses/TP et rendement

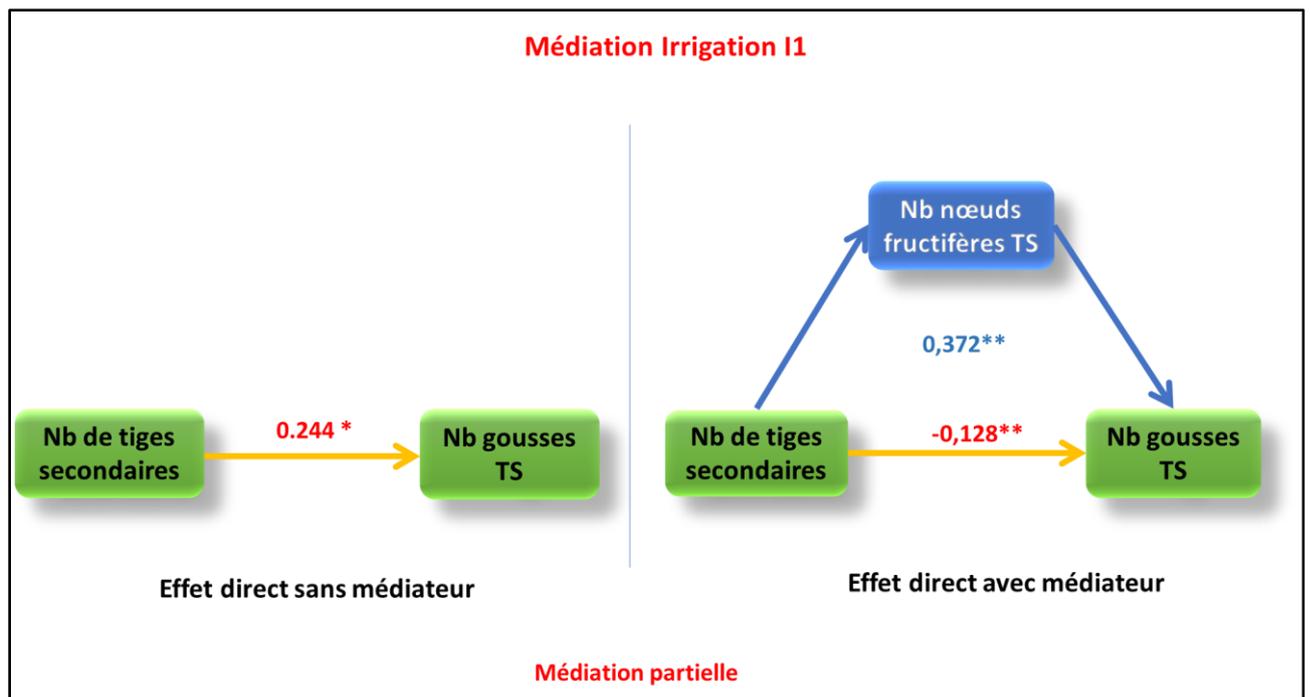


Figure 12 : Analyse du cheminement du Nb de tiges secondaires et le Nb de gousses par TS via un médiateur du Nb nœuds fructifères/TS

Nous constatons, d'une part, que, le nombre de tiges secondaires a un effet direct hautement significatif sur le Nb de gousses TS à travers le médiateur nombre de gousses par TS (-0,128**), aussi sans ce médiateur il présente un effet direct significatif (0,244*). D'autre part le Nb de tiges secondaires a un effet indirect hautement significatif (0,372**) sur le Nb de gousses par TS. A cet effet, la médiation est une médiation partielle.

d. Modèle final du path analysis du rendement et de ses composantes

Ce modèle final est considéré comme valide, suite à une vérification du CFI qui respecte les normes : **CFI = 0,908**.

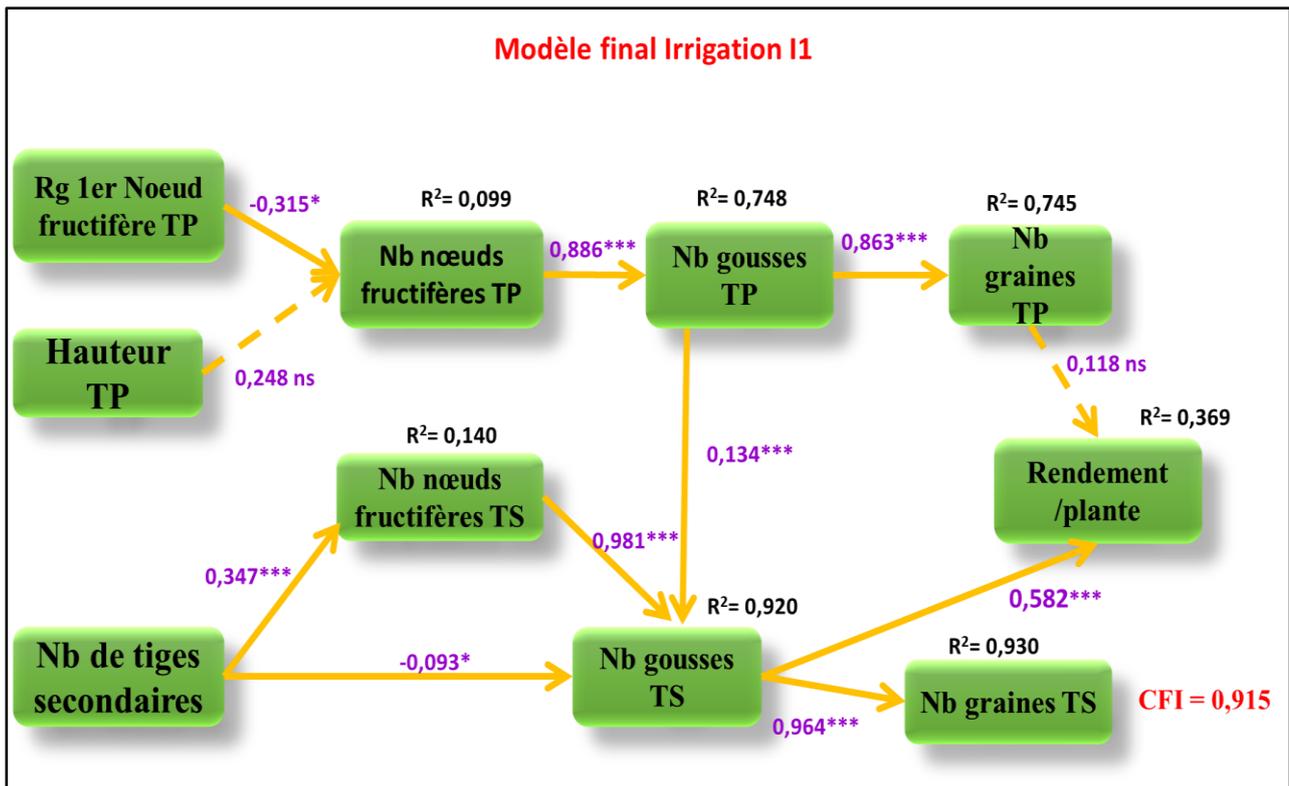


Figure 13 : Modèle final du Path analysis du rendement et ses composantes chez *Vicia faba* L.

A partir du modèle final (Figure 13), nous pouvons constater :

- un flux de causalité direct très hautement significatif du Nb de gousses par TS sur le rendement par plante.
- Un flux de causalité indirect du Nb de gousses/TP via le médiateur Nb de gousses/TS sur le rendement par plante.
- Un flux de causalité indirect du Nb de nœuds fructifères/TP sur le rendement par plante via les médiateurs Nb de gousses/TP et Nb de gousses/TS.
- Un flux de causalité indirect du rang de premier nœud fructifère/TP sur le rendement par plante par le biais des médiateurs Nb de nœuds fructifères/TP, Nb de gousses/TP et Nb de gousses/TS.
- Un flux de causalité indirect du Nb de nœuds fructifères/TS sur le rendement/plante via le médiateur Nb de gousses/TS.
- Un flux de causalité indirect du Nb de tiges secondaires sur le rendement par plante via le médiateur Nb de gousses/TS d'un côté ; d'un autre coté via les médiateurs Nb de nœuds fructifères/TS et Nb de gousses/TS.

Sur la base de l'analyse du modèle de cheminement illustré à la figure 15, nous avons constaté, que le facteur direct le plus important déterminant le rendement par plante de *Vicia faba* L., explique 37% de la variabilité totale, est :

- Nombre de gousses/TS.

3. Path analysis appliqué sur le traitement irrigation 2 (I₂) :

a. Test de validité du modèle

Le modèle postulé pour le traitement d'irrigation I₂ est bien accepté. **CFI=0,942**

Après vérification de la validité du modèle, nous avons calculé les coefficients standardisés (H₁ à H₁₉), ainsi que les coefficients de détermination R². Le nouveau diagramme obtenu correspond à la figure 14.

b. Flux de causalité entre les différentes variables

Après vérification de la validité du modèle, nous avons calculé les coefficients standardisés (H₁ à H₁₉), ainsi que les coefficients de détermination R². Le nouveau diagramme obtenu correspond à la figure 14.

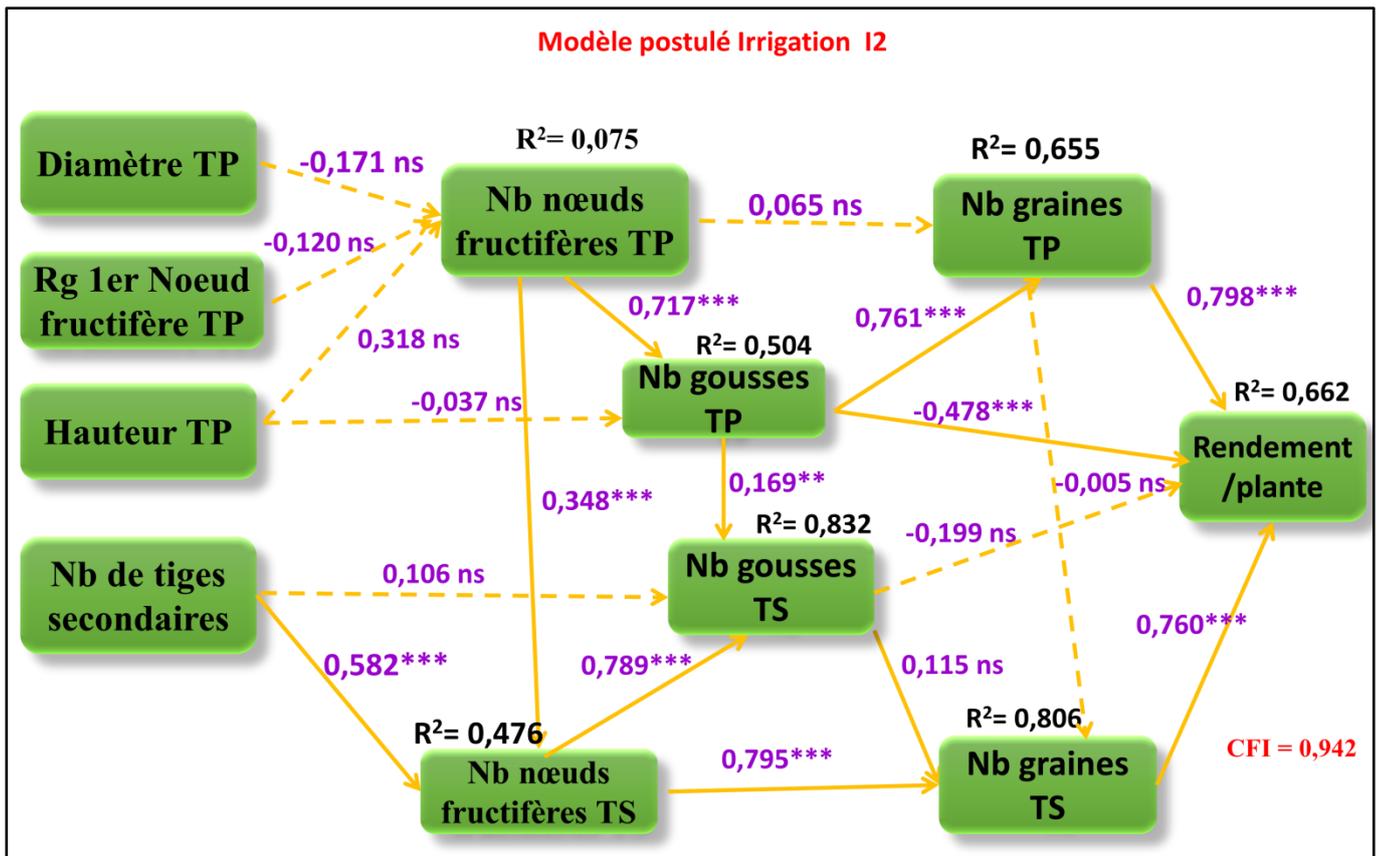


Figure 14 : Modèle postulé pour l'analyse du cheminement du rendement et ses composantes chez *Vicia faba* L.

(CFI : Indice d'ajustement comparatif ;

R^2 : coefficients de détermination ;

*** : Flux de causalité très hautement significatif; ** : Flux de causalité hautement significatif ; ns : Flux de causalité non significatifs).

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

✚ Effet direct très hautement significatif

Le Nb de graines/TP et le Nb de graines/TS ont un effet direct positif très hautement significatif sur le rendement par plante respectivement de ($H_{18}=0,798***$) et ($H_{19}=0,760***$). Alors que le Nb de gousses/TP a un effet direct très hautement significatif d'une part négatif sur le rendement par plante ($H_{16}= -0,478***$). Et d'autre part positif sur Le Nb de graines/TP ($H_{13}=0,761***$).

Le Nb de nœuds fructifères/TP a un effet direct positif très hautement significatif sur le Nb de gousses/TP d'une part, et d'autre part sur le Nb de nœuds fructifères/TS, respectivement de ($H_9=0,717***$) et ($H_7=0,348***$).

Le Nb de tiges secondaires a un effet direct positif très hautement significatif sur le Nb de nœuds fructifères/TS ($H_6=0,582^{***}$)

Le Nb de nœuds fructifères/TS a un effet direct positif très hautement significatif sur le Nb de gousses/TS ($H_8=0,789^{***}$), et sur le Nb de graines/TS ($H_{11}=0,795^{***}$).

Effet direct hautement significatif

Le Nb de gousses/TP a un effet direct positif hautement significatif sur le Nb de gousses/TS ($H_{12}=0,169^{**}$).

Effet direct non significatif

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

- Le Nb de gousses/TS et le rendement par plante ;
- Le Nb de graines/TP et Nb de gousses/TS avec Le Nb de graines/TS ;
- Le Nb de nœuds fructifères/TP et le Nb de graines/TP ;
- Le Nb de tiges secondaires et le Nb de gousses/TS ;
- Le diamètre de la TP et le rang du premier nœud fructifère/TP sur le Nb de nœuds fructifères/TP ; et
- La hauteur TP sur le Nb de nœuds fructifères/TP et sur le Nb de gousses/TP.

Le coefficient de détermination de la variable rendement par plante $R^2=0,662$, nous permet d'affirmer que la causalité entre, d'une part, le Nb de graines/TP, le Nb de graines/TS, le Nb de gousses/TP et le rendement par plante d'autre part, explique 66 % de la variabilité totale dans notre expérimentation.

Le Nb de gousses/TP explique 66% de la variabilité totale du Nb de graines/TP.

Le Nb de gousses/TP et Nb de nœuds fructifères/TS expliquent 83% de la variabilité totale du Nb de gousses/TS.

Le Nb de nœuds fructifères/TS permet d'expliquer 81% de la variabilité totale du Nb de graines/TS.

Le Nb de tiges secondaires et le Nb de nœuds fructifères/TP expliquent 48% de la variabilité totale du Nb de nœuds fructifères/TS.

Le Nb de nœuds fructifères/TP explique 50% de la variabilité totale du Nb de gousses/TP.

c. Analyse et interprétation de la médiation

Le nombre de graines par tige principale est un médiateur entre le nombre de gousses par tige principale et le rendement par plante (Figure 15).

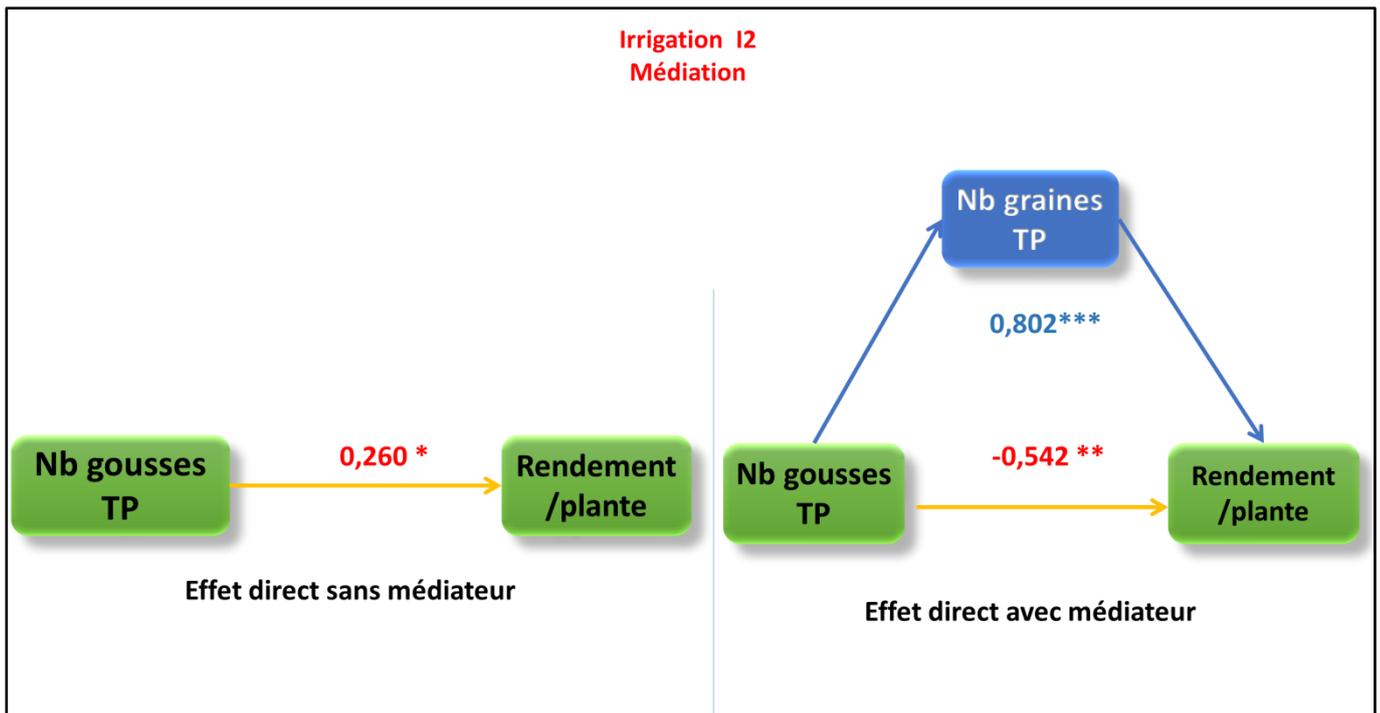


Figure 15 : Analyse du cheminement du nombre de gousses/ TP sur le Rendement par plante via le médiateur nombre de graines par TP.

Nous constatons, d'une part, que, le nombre de gousses/TP a un effet direct hautement significatif sur le rendement par plante à travers le médiateur nombre de graines par TP (-0,542**), aussi il présente un effet direct significatif sans médiateur (0,260*). D'autre part le nombre de gousses/TP a un effet indirect très hautement significatif (0,802***) sur le rendement par plante. A cet effet, la médiation est une médiation partielle.

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 = 0,950**.

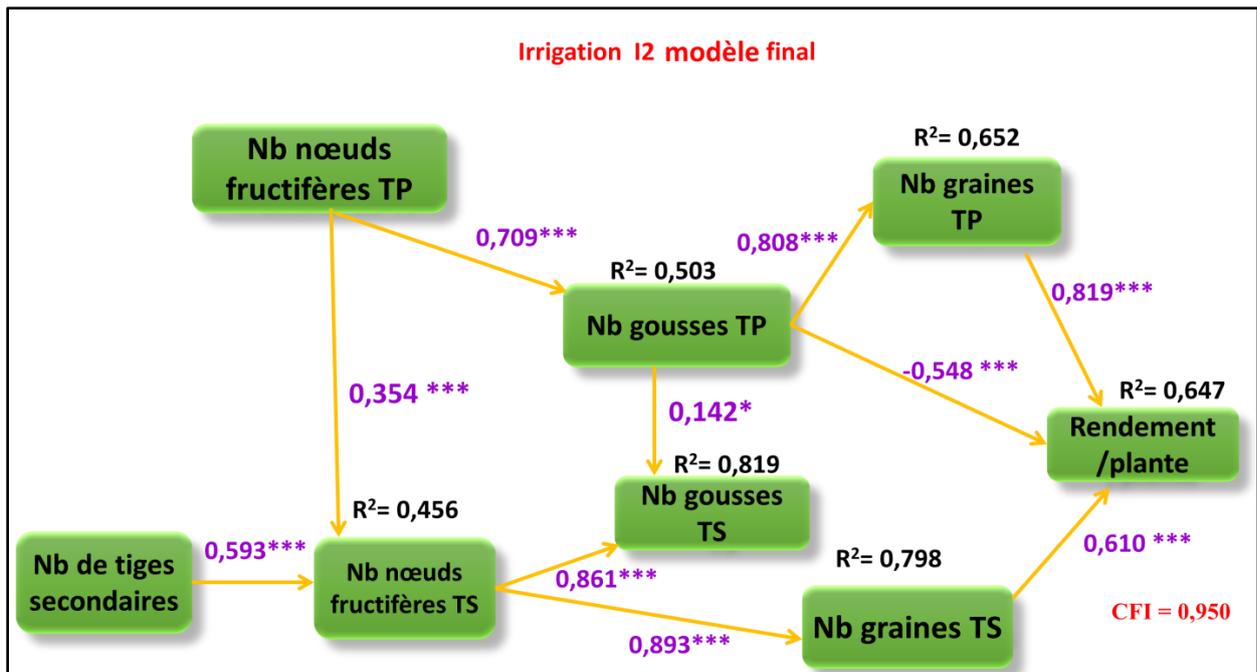


Figure 16 : Modèle final du Path analysis du rendement et ses composantes chez *Vicia faba* L.

A partir du modèle final (Figure 16), nous pouvons constater :

- un flux de causalité direct très hautement significatif du nombre de graines par TP, du nombre de graines par TS et du Nb de gousses par TP sur le rendement par plante.
- Flux de causalité indirect du Nb de gousses/TP sur le rendement par plante via le Nb de graines/TP.
- Flux de causalité indirect très hautement significatif du Nb de nœuds fructifères/TS via le médiateur Nb de graines/TS sur le rendement par plante.
- Flux de causalité indirect du Nb de nœuds fructifères/TP sur le rendement par plante via le médiateur Nb de gousses/TP d'une coté, et via le Nb de nœuds fructifères/TS et Nb de graines/TS d'une autre coté.
- Flux de causalité indirect du Nb de tiges secondaires sur le rendement par plante via les médiateurs du Nb de nœuds fructifères/TS et Nb de graines/TS.

Enfin et sur la base de l'analyse du modèle de cheminement illustré à la figure 18, nous avons constaté, que les facteurs directs les plus importants déterminant le rendement par plante de *Vicia faba* L., expliquent 65% de la variabilité totale, et sont :

- Nombre de graines/TP ;
- Nombre de graines/TS ;
- et Nombre de gousses/TP.

Nous pouvons donc tirer l'existence des flux de causalités différentes entre les variables endogènes et le rendement par plante pour chaque traitement.

➤ **témoïn**

Un flux de causalité direct très hautement significatif du Nb de graines/TP et Nb de graines/TS sur le rendement par plante.

Un flux de causalité indirect très hautement significatif du nombre de gousses/TP via le médiateur Nb de graines/TP d'une part. D'autre part le Nb de gousses/TS via le médiateur Nb de graines/TS.

➤ **Traitement I₁**

Un flux de causalité direct très hautement significatif du Nb de gousses/TS sur le rendement par plante. Par contre le Nb de gousses/TP a un flux de causalité indirect sur le rendement par plante via le médiateurs Nb de gousses/TS.

➤ **Traitement I₂**

Flux de causalité direct du nb gousses/TP, Nb graines/TP et Nb graines/TS sur rendement par plante.

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

- tiges secondaires
- nœuds fructifères
- **gousses TS**

Dans l'autre cas avec un apport de 106 mm (I2): va privilégier dans la même condition de précipitation les variétés qui produisent beaucoup de:

- gousses TP
- graines TP
- **graines TS**

Conclusion et perspectives

La fève reste à ce jour l'une des principaux produits de la culture des légumineuses au Maroc. Au niveau national, elle occupe à peu près la moitié de la superficie emblavée en légumineuses alimentaires. Cependant cette culture pourrait être particulièrement vulnérable au changement climatique et à la sécheresse car il s'agit d'une légumineuse de saison fraîche.

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), a été réalisée en vue de tester le potentiel de rendement de quelques variétés de fève et de féverole, ainsi que leurs paramètres agronomiques et physiologiques en conditions de stress hydrique. Les résultats de ce travail montrent tout d'abord à travers l'analyse de la variance de la conductance stomatique un effet très hautement significatif du régime hydrique et un effet non significatif de la variété sur la conductance stomatique. L'analyse de la variance montre également qu'il n'y a pas un effet significatif concernant le régime hydrique avec la majorité des composantes de rendement, alors qu'il y a un effet très hautement significatif pour l'effet variétale sur la majorité de ses composantes de rendements. Pour l'analyse de la corrélation partielle a montré l'existence des caractères très hautement corrélés comme le Nb graines/TP avec le poids des graines/TP, des caractères hautement corrélés tel est le cas pour le Nb graines/TP et le poids graines/TS, finalement des caractères corrélés significativement comme le Nb graines/TS et le poids graines/TP. Afin de bien affiner les résultats révélés par les statistiques multivariées 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 Nb de graines/TP et Nb de graines/TS pour le témoin. Nb de gousses/TS pour le traitement I₁ et finalement nb gousses/TP, Nb graines/TP et Nb graines/TS pour le dernier traitement I₂.

L'analyse du modèle postulé pour les trois traitements indique en premier lieu pour le témoin, un flux de causalité direct très hautement significatif du Nb de graines/TP et du Nb de graines/TS sur le rendement par plante d'une part. D'autre part un flux de causalité direct significatif du Nb de gousses/TP sur le rendement par plante. Les caractères restants avaient des flux de causalités indirects sur le rendement/plante.

En deuxième lieu pour le traitement I₁, indique un flux de causalité direct très hautement significatif du Nb de graines/TP et Nb de gousses/TS sur le rendement par plante d'une part. Et d'autre part, un flux de causalité s'est avéré direct hautement significatif du Nb de gousses/TS. Les caractères restants avaient des flux de causalités indirects sur le rendement/plante.

Finalement l'analyse du modèle postulé pour le traitement I₂, indique un flux de causalité direct très hautement significatif du Nb de graines/TP et par TS, et le Nb de gousses/TP. Les caractères restants avaient des flux de causalités indirects sur le rendement/plante.

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 gousses/TS.

Et une irrigation d'appoint à la floraison de 106 mm (I₂), favorise le rendement pour les variétés produisant beaucoup de graines/TS. Dans les mêmes conditions d'irrigation.

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 de stress hydrique. Notons également que la hauteur, le Nb de tiges secondaire, le rang, le Nb de nœuds fructifères/TP et par TS ont une empreinte non négligeable sur le rendement par plante de la fève. Par conséquent, ces composantes peuvent également être adoptées pour l'amélioration du rendement chez la fève, même si le gain de rendement escompté n'est pas aussi important que celui qui pourrait être réalisé par les quatre précédentes composantes du rendement.

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 tel que le stress hydrique.

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.

Il faudrait Travailler sur une seule variété de fève et une seule variété de féverole et les traiter à part.

Il faudrait également appliquer un régime d'irrigation tout au long du cycle et spécialement au semis et début tallage puis floraison et aussi au stade formation des gousses.

Elargir les tests physiologiques à savoir la surface foliaire, TRE... pour avoir une bonne explication du stress hydrique sur les variétés de fèves et de féveroles.

Références bibliographiques

- **Abdalla M. M. F. et Fischbeck, 1978.** Growth and fertility of five stocks of field beans grown under three temperatures regimes, and the effect of natural water stress on seed index of a collection of *Vicia faba* L. *J. Agronomy and Crop Science*, 147, 81-91.
- **Abdelali Laamari, 2015.** Etude Données de Base des Légumineuses Alimentaires Au Maroc: Analyse de l'offre Coûts de Production et Indicateurs de Performances, Document Provisoire, INRA-Settat.
- **Abras M. & Cartryse C. & Froidmont E. & Jamar D. & Rondia P. & Wavreille J, 2016.** La Fèverole une légumineuse à graines riches en protéines et en énergie. Les protéagineux de la production à la valorisation, p 20.
- **Acevedo E., 1991.** Improvement of winter cereals in Mediterranean environments. Use of yield, morphological and physiological traits. In Physiology-breeding of winter .Cereals for stressed Mediterranean environments (Acevedo E., Conesa A.P., Monneveux P., Srivastava J.P. eds.).Les colloques INRA, vol.55, pp 211-224.
- **Acevedo E., 1991.** Morph physiological traits of adaptation of cereals to Mediterranean environments. In Improvement and management of winter cereals under temperature, drought and salinity stress (Acevedo E., Fereres E., Gimenez C. And Srivastava J.P. eds). Edit. Proceedings of the ICARDA-INIA symposium, Cordoba Spain, pp 85-96.
- **Adda A., Sahnoune M., Kaid-Harche M., Merah O., 2005.** Impact of water deficit intensity on durum wheat seminal roots. C.R. Biologies III. Edit. *Plant biol. Path.* Vol. 328, pp 918-927.
- **Aidoui A., 1994.** Etude du déficit hydrique séquentiel sur les rendements, application au cas du sorgho-grain. *Sorghum tricolor* (1) Moench. These de doctorat en science de l'eau. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts ; Montpellier, France.
- **Aït Houssa A., Drissi S., Asehrou A., Asfers A., Oubaki L., Chraïbi H. 2017.** Changements climatiques au Maroc: Quels systèmes de culture pour s'y adapter ?, *Rev. Mar. Sci. Agron.* 5 (3):210-221.
- **Alaoui S.B., 2005.** Référentiel pour la Conduite Technique de la fève fève (*Vicia faba*). p92
- **Al-Barri T., Shtaya M.J.Y., (2013).** Phenotypic characterization of faba bean (*Vicia faba* L.) landraces grown in Palestine. *Journal of Agricultural Science*; 5: 110-117.
- **Alghamdi, S.S., 2009.** Chemical composition of faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes under various water regimes. *Pak. J. Nutr.*, 8, 477-482.
- **Ali Dib T., Monneveux P., Araus, J.L., 1990.** Breeding durum wheat for drought tolerance : Analytical, Synthetical Approaches, and their connections. In Panayotov I. And Pavlova S. (eds) Proceedings of International Symposium Wheat Breeding: Prospects and Future Approaches, Edit. Agricultural Academy. pp224-240.
- **Amede T. & Schubert S., 2003.** Mechanisms of drought resistance in seed legumes. I. Osmotic adjustment. *Ethiop. J. Sci.*, 26, 37-46.
- **Ammar M.H. et al., 2014.** Physiological and yield responses of faba bean (*Vicia faba* L.) to drought stress in managed and open field environments. *J. Agron. Crop Sci.*, 201, 280-287.
- **Anonyme., 2002.** La fèverole dans le Châtillonnais : une alternative en tête de rotation. Institut National Agronomique Paris-Grignon. Paris. 43 p.

- **Araus JL., Amado T., Casadesus J., Asbati A. et Nachit MM., 1999.** Relationships between ash content, carbon isotope discrimination and yield in durum wheat. *Aust. J. Plant Physiol.* 25: pp. 835-842.
- **Araus J L.,Febrero A., 1993.** Leaf posture, grain yield, leaf structure and carbon isotop discrimination in wheat.*Crop.Sci.*33. 1273 -1279.
- **Arshad, M., A. Bakhsh et A. Ghafour 2004.** Path coefficient analysis in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under rainfed conditions. *Pak. J. Bot.*, 36(1): 75-81
- **Banik, P., Sasmal, T., Ghosal, P. & Bagchi, D., 2000.** Evaluation of mustard (*Brassica campestris* Var. Toria) and legume intercropping under 1: 1 and 2: 1 row-replacement series systems. *J. Agron. Crop Sci.* 185, 9–14.
- **Basheer-Salimia R., Shtaya M., Awad M., Abdallah J., Hamdan Y. (2013).** Genetic diversity of Palestine landraces of faba bean (*Vicia faba*) based on RAPD markers. *Genetics and Molecular Research* 12 (3):
- **Bedoussac, L. et al., 2015.** Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agron. Sustain. Devel.* 35, 911–935.
- **Benlaribi M., Monneveux P. And Grignac P., 1990.** Étude des caractères d'enracinement et de leur rôle dans l'adaptation au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). *Edit. Agron.* Vol. 10, pp 305-322.
- **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.
- **Bethenod T., 1980.** L'eau et les hormones .Edit. INRA, Paris, pp.150-152.
- **Birand, 1961.** Relations entre le développement des racines et des parties aériennes chez certaines plantes xérophytes et leur résistance à la sécheresse. *Proc. Of the Madrid Symposium*, UNESCO, 175-182.
- **Blum A., 1996.** Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. *Edit. Plant Growth Regul.* Vol. 20, pp 135–148.
- **Brink M, Belay G., 2006.** Ressources végétales de l'Afrique tropicale 1 : céréales et légumes secs,Prota, Pays bas, pp. 221-223.
- **Brown S.C., Gregory P.J.,Wahbi A., 1987.** Root characteristics and water use in mediterranean environments. In *Drought tolerance in winter cereals* (SRIVASTAVA J.P., PORCEDDU E., ACEVEDO E. and VARMA S. eds.) Wiley and Sons Chichester UK pp. 387.
- **Carlsson, G.; Palmborg, C.; Jumpponen, A.; Scherer-Lorenzen, M.; Högberg, P.; Huss-Danell, K., 2009.** N2 fixation in three perennial *Trifolium* species in experimental grasslands of varied plant species richness and composition. *Plant Ecol.*, 205, 87–104.
-
- **Chaux C. & Flourey C, 1994.** Légumineuses potagères, légumes, fruits. Production légumière sèche, Tome 3, Technique et documentation Lavoisier, p 3-15.
- **Chahbar S., Belkhodja M., 2016.** Water deficit effects on morpho-physiologicals parameters indurum wheat, *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, ISSN 1112-9867.
- **Choat, B., Badel, E., Burlett, R., Delzon, S., Cochard, H., Jansen, S. (2016).** Noninvasive Measurement of Vulnerability to Drought-Induced Embolism by X-Ray Microtomography. *Plant Physiol* 170: 273–282.

- **Ciarke, J.M., And Townley-Smith, T.F., 1984.** Screening and selection techniques for improving drought resistance. In: Crop Breeding, a Contemporary Basis. Vose, P.B. and Blixt, S.G. (eds). Pergamon Press, Oxford, UK pp 137-162.
- **Clavel D, Drame N., Diop., Zuily-Fodil Y., 2005.** Adaptation à la sécheresse et création variétal : le cas de l'arachide en zone Sahélienne. Première partie : revue bibliographique. Edit. OCL. Vol. 12 n° 3, pp 248 – 260
- **Cruziat, 1995.** La circulation de l'eau dans les plantes. PMH, revue Horticole, page, 17-23.
- **Cubero, J. I., 1974.** On the evolution of *Vicia faba* L. Theoret.app. Genet. 45: 47-51.
- **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. Thèse de doctorat. Science agronomiques et ingénierie biologique. Louvain. 227p.
- **Daoui K. & Karrou M. & Mrabet R. & Fatemi Z. & Draye X. & Ledent J.F., 2009.** Faba bean fertilisation in Morocco. Covaphos III, 5: 193-199.
- **Daunay M.C., 1985.** Exemple d'adaptation au régime hydrique au climat chez l'aubergine In : Les bases de la bioclimatologie. INRA, Méribel, 18-22 mars 1985,133-134.
- **Day W. et Legg B .I, 1983.** Water relations and irrigation response. in The Faba Bean (*Vicia faba* L.), A basis for improvement (P.D. Hebblethwaite, ed.). Butterworths, London. pp 217–232
- **De Raissac M., 1992.** Mécanismes d'adaptation à la sécheresse et maintien de la productivité des plantes cultivées. *L'Agronomie Tropicale* 46, 1, 29-38
- **Dhima, K., Lithourgidis, A., Vasilakoglou, I. & Dordas, C., 2007.** Competition indices of common vetch and cereal intercrops in two seeding ratio. *Field Crops Res.* 100, 249–256.
- **Duc G, Bao S, Baum M, Redden B, Sadiki M, Jose Suso M, Vishniakova M, Zong X 2010.** Diversity maintenance and use of *Vicia faba* L. genetic resources. *Field crops research.* 115: 270–278.
- **Duc G., 1997.** Faba bean (*Vicia faba* L.). *Field Crops Research.* 53: 99-109.
- **Escalona J.M., Fuentes S., Tomás M., Martorell S., Flexas J., Medrano H., 2013.** Responses of leaf night transpiration to drought stress in *Vitis vinifera* L. *Agricultural Water Management* 118, 50-58.
- **Farooq M. et al., 2009.** Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agron. Sustain. Dev.*, 29, 185-212.
- **Fatemi Z. & Aabbad F. & Sakr B., 2005.** La création variétal à L'INRA méthodologie acquise et perspectives, p 139-145.
- **Fatemi Z., 1998 .** Les cultures des légumineuses alimentaires au Maroc. INRA, Domaine expérimental de Douyet. Fès, Morocco. N°148. 38p.
- **Faurie C, Ferra C, Médori P, Dévaux J, Hemptinne J-L., 2003.** *Ecologie : approche scientifique et pratique*, 5^{ème} édition Lavoisier, Paris, pp. 69.
- **Fukai S., Cooper M., 1995.** Development of drought-resistant cultivars using Physio-morphological traits in rice, Edit. *Field Crops Res.* Vol. 40, pp 67-86.
- **Fukai S., Pantuwan G., Jongdee B., Cooper M., 1999.** Screening for drought resistance in rainfed lowland rice. Edit. *Field Crops Res.* Vol.64, pp 61-74.
- **Gallais.A Et Bannerot.H., 1992.** Amélioration des espèces végétales cultivées. INRA. Paris. 765 pp.
- **Gallardo M, Turner Nc, Ludvig C., 1994.** Water relations, gas exchange and abscisic acid content in *Lupinus cosentinii* leaves in response to drying different proportions of the root system. *J Exp Bot*; 45 : 909-18.

- **Gate P., 1995.** Ecophysiologie du blé, Edit. Lavoisier, Paris, Techniques et Documentations, 429 p.
- **Gautier M.F., Labhili M., Joudrier, 1993.** Marqueur de tolérance au stress hydrique de fin de cycle chez le blé dur. In la tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne. Diversité génétique et amélioration variétale. Montpellier. Ed : INRA, Paris, 1993(les colloques n° 64). p 423-427.
- **Ghassen Abid, Kamel Hessini, Marwa Aouida, Ibtissem Aroua, Jean-Pierre Baudoin, Yordan Muhovski, Guy Mergeai, Khaled Sassi, Myriam Machraoui, Fatma Souissi, Moez Jebara., 2017.** Agro-physiological and biochemical responses of faba bean (*Vicia faba* L. var. 'minor') genotypes to water deficit stress. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2017 21(2), 146-159.
- **Gordon M.M., 2004.** Haricots secs: Situation, Prospective et Agroalimentaire. Canada, pp1-7.
- **Guerin, V., Trinchant, J.-C., Rigaud, J., 1990.** Nitrogen fixation (C₂H₂ reduction) by broad bean (*Vicia faba* L.) nodules and bacteroids under water-restricted conditions. *Plant Physiol.*, 92, 595–601.
- **Hasan K., Tacettin Y., 2010.** The effect of drought stress on grain yield, yield components and some quality traits of durum wheat (*Triticum turgidum* sp. *Durum*) cultivars. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 38(1), 164-170.
- **Hasanuzzaman Mirza, 2017.** Tree crop interactions in agroforestry.
- **Hauggaard-Nielsen, H., Jørnsgaard, B., Kinane, J., Jensen, E.S., 2008.** Grain legume–cereal intercropping: the practical application of diversity, competition and facilitation in arable and organic cropping systems. *Renew. Agric. Food Sys.* 23, 3–12.
- **Hauggaard-Nielsen, H. & Jensen, E. S., 2001.** Evaluating pea and barley cultivars for complementarity in intercropping at different levels of soil N availability. *Field Crops Res.* 72, 185–196.
- **Heller R., Esnault R., Et Lance C., 1998.** Physiologie végétale 1- Nutrition, Edit édition. Edit. Dunod. 323 p.
- **Hsissou, D., 1994.** Sélection in vitro et caractérisation de mutants de blé dur tolérants à la sécheresse. Thèse de doctorat. Faculté des sciences, université catholique de Louvain.
- **Hurd E.A., 1968.** Growth of roots of seven varieties of spring wheat at high and low moisture levels. *Edit. Agron. J.* , vol. 60, pp. 201-205.
- **Hurd E.A., 1974.** Growth of roots of seven varieties spring wheat at high and low moisture levels. *Edit. Agro. J.*, vol. 60 pp 201-205.
- **IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2019.** Accessed 25 September 2019. <https://scholar.google.com/scholar>
- **Jaleel C.A. et al., 2009.** Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. *Int. J. Agric. Biol.*, 11, 100-105.
- **Jamal Eddine Herradi, 2017.** Etat d'urgence pour la filière des légumineuses. *Economie journal*, Edition N°:4951.
- **Jarso M, Keneni G., 2006.** *Vicia faba* L. In: Brink M, and Belay G (eds). Plant resources of tropical Africa 1: Cereals and pulses. PROTA Foundation, Wageningen, Netherlands/Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands/ CTA, Wageningen, Netherlands
- **Jensen, E., 1996.** Grain yield, symbiotic N₂-fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant Soil*, 182, 25–38.
- **Jensen ES, Peoples MB, Hauggaard-Nielsen H., 2010.** Faba bean in cropping systems. *Field Crops Research*. 115: 203-216

- **Jensen, E.S., 1986.** Intercropping field bean with spring wheat. *Vortr. Pflanzenzucht.* 11, 67–75. 64
- **Jones M.M., Osmond B., Turner N.C., 1980.** Accumulation of solutes in leaves of sorghum and sunflower in response to water deficits. *Edit. Aus. J. Plant Physiol.* Vol. 7, pp 193-205.
- **Jones H.G., 1993.** Drought tolerance and water-use efficiency. In: J.A.C. Smith and H. Griffiths (eds.) *Water Deficits: Plant Responses from Cell to Community.* Edit. Bios Scientific Publishers.
- **Jones H., 1998.** Stomatal control of photosynthesis and transpiration. *Edit. J. Exp. Bot.* vol. 49, pp 387-398.
- **Jones, J.W. And Zur, B., 1984.** Simulation of possible adaptative mechanisms in crops subjected to water stress. *hfgation Science*, 5: 251-264.
- **Kabbadj, A.; Makoudi, B.; Mouradi, M.; Pauly, N.; Frendo, P.; Ghoulam, C. 2017.** Physiological and biochemical responses involved in water deficit tolerance of nitrogen-fixing *Vicia faba*. *PLoS ONE*, 12, e0190284.
- **Kameli A., Losel DM., 1996.** Growth and sugar accumulation in durum wheat plants under water stress. *New Phytol.*, 132: pp.57-62.
- **Khalfaoui JLB., 1985-** Conduite de l'amélioration génétique de l'adaptation à la sécheresse en fonction des mécanismes physiologiques. *Oléagineux* ; vol. 40, pp 329- 334.
- **Khalfaoui JLB., 1991-** Determination of potential lengths of the crop growing period in semi-arid regions of Senegal. *Edit. Agric For Meteorol.* Vol. 55, pp 351- 363.
- **Khaldoun A., Chery J., Monneveux P., 1990.** Etude des caractères d'enracinement et de leur rôle dans l'adaptation au déficit hydrique chez l'orge (*Hordeum vulgare L.*). *Edit. Agro*, vol. 10, pp 369-379.
- **Khaldi R., Zekri S., Maatougui M.E.H. Et Ben Yassine A., 2002.** L'Economie des Légumineuses Alimentaires au Maghreb et dans le Monde. *Proceedings du 2^{ème} séminaire du réseau REMAFEVE/REMALA, « Le devenir des Légumineuses Alimentaires dans le Maghreb »*, Hammamet, Tunisie, 100p.
- **Kinane, J., Lyngkjær, M., 2002.** Effect of barley–legume intercrop on disease frequency in an organic farming system. *Plant Protec. Sci.* 38, 227–231.
- **Knudsen, M.T., Hauggaard-Nielsen, H., Jensen, E.S., 2004.** Pea, faba bean and lupin intercropped with spring barley–performance and N₂ fixation at two temperate locations. *J. Agric. Sci.* 142, 617–627.
- **KOLEV N., 1976.** Les cultures maraichères en Algérie; légumes, fruits. *Ed. J. Baillièrè.* Paris. Vol I, 207 p.
- **Laumonier R., 1979.** Culture des légumineuses. In *Cultures légumières et maraichères*, tome III, 121-171.
- **Lew R.R., 2004.** Osmotic effects on the electrical properties of *Arabidopsis* root hair Vacuoles in situ. *Edit. Plant Physiology.* Vol.134 pp 352- 360.
- **Levitt J., 1980.** Responses of plants to environmental stresses. Vol. 2, 2nd ed New York: Academic Press.
- **Levitt J., 1985.** Relationship of dehydration rate to drought avoidance, dehydration tolerance and dehydration avoidance of cabbage leaves, and to their acclimation during drought – induced water stress. *Plant Cell Environ.* 8.287-96.

- **Li, Y.Y., Yu, C., Cheng, X., Li, C.J., Sun, J.H., Zhang, F.S., Lambers, H., Li, L., 2009.** Intercropping alleviates the inhibitory effect of N fertilization on nodulation and symbiotic N₂ fixation of faba bean. *Plant and Soil* 323, 295e308.
- **Lithourgidis, A., Dordas, C., Damalas, C. A. & Vlachostergios, D., 2011.** *Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture. Aust. J. crop sci.* 5, 396.
- **Liu, Y., Wu, L., Baddeley, J. A. & Watson, C. A., 2011.** in *Sustainable Agriculture Volume 2* 883–905 (Springer, 2011).
- **Ludlow M.M., And R.C. Muchow., 1990.** A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Edit. Adv. Agron. vol. 43*, pp107–153.
- **Maatougui M.E.H., 1996.** Situation de la culture des fèves en Algérie et perspectives de relance, in réhabilitation of *faba bean*. *Ed. actes, Rabat (Maroc)* 202 p.
- **Manna, M., Ghosh, P. & Acharya, C., 2003.** Sustainable crop production through management of soil organic carbon in semiarid and tropical India. *J. Sustainable Agric.* 21, 85–114.
- **Marcel.M et al., 2002.** Larousse agricole. Ed Larousse. Canada. 768 p.
- **Marer, S., Lingaraju, B. & Shashidhara, G., 2007.** Productivity and economics of maize and pigeonpea intercropping under rainfed condition in northern transitional zone of Karnataka. *Karnataka J Agric Sci* 20, 1–3.
- **Mathon C.C., 1985 :** Liste de plantes utiles avec indication de leur aire probable de primo domestication. *Faculté des sciences de l'université de Poitier.* 17p
- **Merah O., 2001-**Potencial importance of water status traits for durum wheat improvement under Mediterranean conditions, *Edit. J. Agric. Sci.* vol. 137, pp139-145.
- **Mirela Matković Stojšin, Veselinka Zecevic, Slobodan Milenkovic, Jelena Boskovic, 2018.** phenotypic variability of yield components of triticum spelta in organic production.
- **Mohamad Zabawi A.G. & Dennett M.D.D., 2010.** Responses of faba bean (*Vicia faba*) to different levels of plant available water: I. Phenology, growth and biomass partitioning. *J. Trop. Agric. Food Sci.*, 38, 11-19.
- **Monneveux P. et Belhassen E. (1996).** The diversity of drought adaptation in the wide. *Plant Growth Regulation* 20, 85-92
- **Monneveux P., 1991.** Quelles stratégies pour l'amélioration génétique de la tolérance au déficit hydrique des céréales. In *Amélioration des plantes par l'adaptation aux milieux aride.* AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. pp.165-186.
- **Mouhouche B. 2001.** Effets du stress hydrique appliqué à différentes phases phénologiques sur les composantes du rendement de quatre légumineuses alimentaires à grosses graines, *Institut National Agronomique (El Harrach-Alger),* p32.
- **Muchow, R.C. And 'Sinclair, T.R. 1986.** Water and nitrogen limitations in soybean grain production. II. Field and model analyses. *Field Crops Res.*, 15: 143-156.
- **Mwanamwenge J., Loss S.P., Siddique K.H.M. & Cocks P.S., 1999.** Effect of water stress during floral initiation, flowering and podding on the growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.). *Eur. J. Agron.*, 11, 1-11.
- **Neugschwandtner, R., Ziegler, K., Kriegner, S., Wagentristsl, H., Kaul, H., P 2015.** Nitrogen yield and nitrogen fixation of winter faba beans. *Acta Agric. Scand. B*, 65, 658–666.
- **Nyoki, D. & Ndakidemi, P. A 2018.** Yield Response of Intercropped Soybean and Maize Under Rhizobia (*Bradyrhizobium japonicum*) Inoculation and P and K Fertilization. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 49, 1168–1185.

- **O'Brien L. 1979.** Genetic variability of root growth in wheat (*Triticum aestivum* L.) Edit. Aust. J. of Agric. Res.,30, 587-595.
- **Oliveira, H. R., D. Tomás, M. Silva, S. Lopes, W. Viegas and M.M. Veloso ,2016.** Genetic diversity and population structure in *Vicia faba* L. landraces and wild related species assessed by nuclear SSRs. *PLoS ONE* 11(5):e0154801. Doi: 10.1371 / journal. pone.0154801.
- **Onicl, Office national interprofessionnel des céréales et des légumineuses. 2020.** Commercialisation des céréales et des légumineuses au Maroc.
- **Oppenheimer, 1961.** L'adaptation à la sécheresse : le xérophytisme. *Proc. Of the Madrid Symposium*, UNESCO, 115-153.
- **Osakabe Y., Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K., Phan Tran L. S,** “Sensing the environment: key roles of membrane-localized kinases in plant perception
- **Passioura J., 2006.** The drought environment: physical, biological and agricultural perspectives; *Journal of Experimental Botany*, first published; *Oxford Journals* 5p.
- **Passioura, J.P. 1983.** Roots and drought resistance. In: *Plant Production and Management Under Drought Conditions*. Stone, J.F. and Willis, W. (eds). Elsevier, Amsterdam, Netherlands. pp 265-280
- **Passioura J.B. (1996).** Drought and drought tolerance. *Plant Growth Regulation* 20,79-83.
- **Peron J-Y., 2006.** Références. Production légumières.2^{ème} Ed. 613 p.
- **Pindard A., 2000.** La relation stress hydrique-- rendement du maïs en Bresse: quelle perspective de spatialisation? Utilisation d'un simulateur de culture (SnCS). Mémoire d'ingénieur. Etablissement National d'Enseignement Supérieur Agronomique de Dijon (France), 61 p.
- **R. Harbouze, J.-P. Pellissier, J.-P. Rolland, W. Khechimi. 2019.** Rapport de synthèse sur l'agriculture au Maroc. [Rapport de recherche] CIHEAM-IAMM. 2019, pp.104. fihal-02137637v2f.
- **Rejeb M. N., Laffray D., Louguet P., 1991.** Modification de la conductance stomatique de diverses origines tunisiennes de caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) soumises à une contrainte hydrique prolongée. Edit. Aupelf- uref. Edit. John libbey. Eurotex . pp 149-158.
- **Reta Sanchez DG, Santos Serrato Corona J, Viramontes RF, Cueto Wong JA, Padilla SB, César JS., 2008.** Cultivos alternativos con potencial de uso forrajero en la comarca lagunera, Primera, Mexico, pp.41.
- **Richards Ra., Passioura Gb., 1981.** Seminal roots morphology and water use of wheat. I: environmental effects. Edit. *Crop sci*, vol. 21,pp 249-252.
- **Riou C., 1993,** L'eau et la production végétale .Sécheresse.2.75-83.
- **Ritchie, J. T. 1981.** “Water Dynamics in the Soil-plant-atmosphere System.” *Plant and Soil* 58: 81–96. doi:10.1007/BF02180050.
- **Robelin M. 1983.** Fonctionnement hydrique et adaptation à la sécheresse. *In* :Physiologie du Maïs. Royan, 15-17 Mars 1983, 445-476.
- **Rosseel Y., 2012.** “lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling.” *Journal of Statistical Software*, 48(2) 1-36.
<https://www.jstatsoft.org/v48/i02/>

- **Rusinamhodzi, L., Corbeels, M., Nyamangara, J. & Giller, K. E 2012.** Maize–grain legume intercropping is an attractive option for ecological intensification that reduces climatic risk for smallholder farmers in central Mozambique. *Field Crops Res.* 136, 12–22.
- **Sadras, V. O., and S. P. Milroy. 1996.** Soil-water Thresholds for the Responses of Leaf Expansion and Gas Exchange: A Review. *Field Crops Research* 47: 253–266. doi:10.1016/0378-4290(96)00014-7.
- **Sadiki M., and A. Lazrak. 1998.** La fève et la féverole : Fiche technique. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (eds.). 31pp.
- **Sahnoune M., 2005.** Etude des paramètres morphophysiologiques de résistance à la sécheresse chez l'orge (*Hordeum vulgare*.L). Thèse de Doctorat. INA El Harrach, 135 p.
- **Sangakkara, U.R.; Hartwig, U.A.; Nösberger, J., 1996.** Soil moisture and potassium affect the performance of symbiotic nitrogen fixation in faba bean and common bean. *Plant Soil*, 184, 123–130.
- **Sanâa Wahbi, 2016.** Thèse : Influence des cultures associées fève/blé sur le potentiel mycorhizien des sols et la structure de la microflore mycorhizosphérique : conséquences sur la productivité des agrosystèmes au Maroc. Sciences agricoles. Université Montpellier; Université Cadi Ayyad (Marrakech, Maroc).
- **Schumacher, H.; Paulsen, H.; Gau, A.; Link, W.; Jürgens, H.; Sass, O., 2011.** Dieterich, R. Seed, protein amino acid composition of important local grain legumes *Lupinus angustifolius* L., *Lupinus luteus* L., *Pisum sativum* L. and *Vicia faba* L. *Plant Breed.*, 130, 156–164.
- **Shao H.B. et al., 2008.** Higher plant antioxidants and redox signaling under environmental stresses. *C.R. Biol.*, **331**, 433-441.
- **Shao H. B., Chu L. Y., Jaleel C. A., Manivannan P., Panneerselvam R., Shao M. A., 2009.** “Understanding water deficit stress-induced changes in the basic metabolism of higher plants biotechnologically and sustainably improving agriculture and the eco environment in arid regions of the globe.” *Crit. Rev. Biotechnol.* 29 131-151,
- **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.] <http://www.lavieeco.com/news/economie/cereales-fruits-legumes-viandes-lait-ce-que-produit-le-maroc-et-ou-21947.html>
- **Siddiqui M.H. et al., 2015.** Response of different genotypes of faba bean plant to drought stress. *Int. J. Mol. Sci.*, 16, 10214-10227.
- **Sjodin J., 1971.** Induced morphological variation in *Vicia faba* L. *Hereditas*, 67: 11.
- **Sillero JC, Villegas-Fernandez AM, Thomas J, Rojas-Molina MM, Emeran AA, Fernandez-Aparicio M, Rubiales D, 2010.** Faba bean breeding for disease resistance. *Field Crops Research*. 115: 297-307.
- **Sinclair, T. R., and M. A. Nogueira. 2018.** “Selection of Host-plant Genotype: The Next Step to Increase Grain Legume N₂ Fixation Activity.” *Journal of Experimental Botany* 69: 3523–3530. doi:10.1093/jxb/ery115.
- **Singh, S.P., 2007.** Drought resistance in the race durango dry bean landraces and cultivars. *Agron. J.*, 99, 1219–1225.
- **Smith, M.R., 2018.** Novel Techniques to Improve Yield Quantity and Quality in Common Bean. Ph.D. Thesis, University of Sydney, Sydney, Australia.
- **Stolp, D.W., 1955.** Introduction to the discussion on papers in Symposium II . (Artificial water supply in horticulture. 14th Int. Conf. Congr. I, 118-129.

- **Stolf-Moreira R., Lemos E. G. M., Carareto-Alves L., Marcondes J., Pereira S. S., Rolla A. A. P., Et Al. 2011.** Transcriptional profiles of roots of different soybean genotypes subjected to drought stress. *Plant Mol. Biol. Rep.* 29 19-34.
- **Subbarao Gv, Johansen C, Slinkard Ae, Nageswara Rao Rc, Saxena Np, Chauhan Ys., 1995.** Strategies for improving drought resistance in grain legume. *Crit Rev Plant Sci*; 14 : 469-523.
- **Tardieu F., Ameglio T., Bréda N. et Dayau S., 1995.** Régulation des transferts hydriques chez les plantes soumises à la sécheresse. Actes de L'Ecole-Chercheurs, INRA, Bioclimatologie. Le Croisic 3-7 avril 1995, 61-82.
- **Tardieu F. 1996.** Drought perception by plants. Do cells of droughted plants experience water stress? *Plant growth regulation*, 20: pp.93-104.
- **Terzopoulos P. J. and P. J. Bebeli, 2008.** Genetic diversity analysis of Mediterranean Faba bean *Vicia faba* L. with ISSR marker. *Field crops research* 108:39-44; (2-15).
- **Tewodros T.N., Asfaw A., Getachew T., Kibersew M., Samuel S.W., 2015.** Evaluation of Faba bean (*Vicia faba* L.) varieties against chocolate spot (*Botrytis fabae*) in North Gondar, Ethiopia. *Afric. J. of agri. Res.* Vol. 10(30), pp. 2984-2988,.
- **Tsubo, M., Walker, S. & Ogindo, H., 2005.** A simulation model of cereal–legume intercropping systems for semi-arid regions: I. Model development. *Field Crops Res.* 93, 10–22.
- **Turner Nc, Wright Gc, Siddique Khm 2001.** Adaptation of grain legume to water-limited environments. *Adv Agron* 2001 ; 71 : 193-231
- **Turner N C., 1979** – Drought resistance and adaptation to water deficits in crop plants. In *stress physiology in crop plants.* (MUSSEL H.STAPLES R.C .eds.)New York Willey bbbp.343-372.
- **Turner Nc, Wright Gc, Siddique Khm., 2001.** Adaptation of grain legume to water-limited environments. *Adv Agron*; 71 : 193-231.
- **Turner Nc, 1986.** Adaptation to water deficit: a changing perspective. *Aust J Plant Physiol*; 13 : 175-90.
- **Turner Nc., 1997.** Further progress in crop water relations. *Adv Agron*; 58 : 293-338.
- **Turner Nc, Jones Mm.; 1980.** Turgor maintenance by osmotic adjustment : A review and evaluation. In : Turner NC, Kramer PJ, eds. *Adaptation of Plants to Water and High temperatures Stress.* New York, USA : Wiley,,: 87-103.
- **Turner Nc., Wright Gc., Siddique Khm., 2001-** Adaptation of grain legume to water-limited environnements. Edit. *Adv. Agron.* Vol. 71, pp 193-231.
- **Vieira Da Silva j.B., 1967.** Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse dans le genre *Gossypium*. I. Transpiration des feuilles détachées et notion d'un indice de contrôle de la transpiration. *Coton et Fibres Trop.* 22, 2, 197-204.
- **Vieira Da Silva J.B., 1973.** Influence de la sécheresse sur la photosynthèse et la croissance du cotonnier. In : Réponse des plantes aux facteurs climatiques. Actes Coll. Uppsala, 1970, 213.
- **Weria Weisany, Yaegoob Raey, Ilaria Pertot, 2015.** Modifications du rendement et de la composition en huile essentielle de l'aneth (*Anethum graveolens* L.) en réponse à la colonisation des mycorhizes à arbuscules et au système de culture.
- **Zarafshar M. et al., 2014.** Morphological, physiological and biochemical responses to soil water deficit in seedlings of three populations of wild pear tree (*Pyrus boissieriana*). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 18, 353-366.

- **Zhang, X., Huang, G., Bian, X. & Zhao, Q., 2013.** Effects of root interaction and nitrogen fertilization on the chlorophyll content, root activity, photosynthetic characteristics of intercropped soybean and microbial quantity in the rhizosphere. *Plant Soil Environ* 59, 80–88.
- **Zhang, F., Zhang, S., Zhang, J., Zhang, R., Li, F., 2004.** Nitrogen fertilization on uptake of soil inorganic phosphorus fractions in the wheat root zone. *Soil Science Society of America Journal* 68, 1890e1895.
- **Zohary., 1961.** On hydro-ecological relation of the near East desert vegetation. *Proc. Of the Madrid Symposium, UNESCO*, 199-212.

Annexe

Annexel : corrélations entre les composantes de rendement.

Corrélations

		Haut eur	Nb_de _tiges	Nb_de_ gousses _TP	Nb_de _gouss es_TS	Nb_noe uds fruc tifères_ TP	Nb_noe uds fruc tifères_ TS	Rang_ TP	Diamétr e	Nb_de _grain es_TP	Nb_ de_g raine s_TS	Poid s_de _grai nes_ TP	Poids_d e_graine s_TS
Haut Corrélatio n de Pearson		1	,056	,140	,094	,243**	,166*	,263**	,408**	,113	,112	-,065	,058
	Sig. (bilatérale)		,453	,061	,209	,001	,026	,000	,000	,130	,136	,386	,443
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Nb_d e_tig es Corrélatio n de Pearson		,056	1	-,132	,388**	-,124	,465**	,136	,066	-,123	,353*	-,042	,424**
	Sig. (bilatérale)	,453		,078	,000	,098	,000	,070	,381	,100	,000	,576	,000
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Nb_d e_go usses _TP Corrélatio n de Pearson		,140	-,132	1	,347**	,835**	,250**	-,131	-,048	,828**	,218*	,362*	-,006
	Sig. (bilatérale)	,061	,078		,000	,000	,001	,080	,522	,000	,003	,000	,938
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180

Nb_d e_go usses	Corrélatio n de Pearson	,094	,388**	,347**	1	,265**	,919**	-,010	-,072	,229**	,854*	,118	,634**
_TS	Sig. (bilatérale)	,209	,000	,000		,000	,000	,891	,337	,002	,000	,114	,000
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Nb_n oeud s_fru	Corrélatio n de Pearson	,243*	-,124	,835**	,265**	1	,212**	-,104	,009	,724**	,163*	,259*	-,040
ctifér es_T P	Sig. (bilatérale)	,001	,098	,000	,000		,004	,166	,909	,000	,029	,000	,596
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Nb_n oeud s_fru	Corrélatio n de Pearson	,166*	,465**	,250**	,919**	,212**	1	,034	-,089	,182*	,846*	,111	,669**
ctifér es_T S	Sig. (bilatérale)	,026	,000	,001	,000	,004		,651	,234	,015	,000	,137	,000
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Rang _TP	Corrélatio n de Pearson	,263*	,136	-,131	-,010	-,104	,034	1	,218**	-,198**	-,090	-,263*	-,064
	Sig. (bilatérale)	,000	,070	,080	,891	,166	,651		,003	,008	,228	,000	,394
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Diam être	Corrélatio n de Pearson	,408*	,066	-,048	-,072	,009	-,089	,218**	1	-,006	-,068	,003	-,111
	Sig. (bilatérale)	,000	,381	,522	,337	,909	,234	,003		,941	,366	,968	,138
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Nb_d e_gra ines_ TP	Corrélatio n de Pearson	,113	-,123	,828**	,229**	,724**	,182*	-,198**	-,006	1	,223*	,610*	,068
	Sig. (bilatérale)	,130	,100	,000	,002	,000	,015	,008	,941		,003	,000	,365

N	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Nb_d e_gra ines_	Corrélatio n de Pearson	,112	,353**	,218**	,854**	,163*	,846**	-,090	-,068	,223**	1	,156*	,822**
TS	Sig. (bilatérale)	,136	,000	,003	,000	,029	,000	,228	,366	,003		,036	,000
N	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Poids _de_ grain	Corrélatio n de Pearson	-,065	-,042	,362**	,118	,259**	,111	-,263**	,003	,610**	,156*	1	,207**
es_T P	Sig. (bilatérale)	,386	,576	,000	,114	,000	,137	,000	,968	,000	,036		,005
N	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Poids _de_ grain	Corrélatio n de Pearson	,058	,424**	-,006	,634**	-,040	,669**	-,064	-,111	,068	,822**	,207**	1
es_T S	Sig. (bilatérale)	,443	,000	,938	,000	,596	,000	,394	,138	,365	,000	,005	
N	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

* . La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).