



République d'Haïti

UNIVERSITÉ D'ÉTAT D'HAÏTI

(UEH)

FACULTÉ D'AGRONOMIE ET DE MÉDECINE VÉTÉRINAIRE

(FAMV)

DÉPARTEMENT DE PHYTOTECNIE

(DPHY)

Détermination du seuil critique de déficit hydrique sur la symbiose fixatrice d'azote de trois (3) cultivars introduits de haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) résistants à la sécheresse et d'un cultivar communément cultivé en Haïti

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Préparé par : Fritzner PIERRE

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur-Agronome

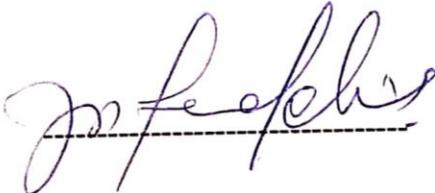
Option : Phytotechnie

Février 2019

Ce mémoire intitulé :

« Détermination du seuil critique de déficit hydrique sur la symbiose fixatrice d'azote de trois (3) cultivars introduits de haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) résistants à la sécheresse et d'un cultivar communément cultivé en Haïti »

a été approuvé par le jury composé de :

Prénom et Nom	Signature	Date
Ophny Nicolas CARVIL Président du Jury		<u>12/03/19</u>
Emmanuel PROPHÈTE Membre du Jury		<u>12 Mars 2019</u>
Sendy ULYSSE RONY Conseillère Scientifique		<u>12-03-19</u>
Jean-Fénel FÉLIX Conseiller Scientifique		<u>12-03-19</u>

DÉDICACES

Ce mémoire fait hommage à mon grand frère Jeanel **PIERRE** qui, dans un certain temps m'a été un modèle. Honneur et mérite à toi qui m'avais accompagné au premier jour scolaire de ma vie. Que ton âme soit pacifiée là où elle est reposée!

Ce travail est aussi dédié à :

- Ma mère Altagrâce **JN JULIEN**, l'inlassable, pour son amour, ses efforts et ses sacrifices dans ma vie.
- Mon père Andressaint **PIERRE**, l'infatigable, pour son courage, son amour et l'investissement de toute sa personne dans ma vie.
- Ma grande sœur Edline **PIERRE** et son mari Fanuel **ST-HILAIRE** pour leurs contributions dans ma formation.
- Mon Oncle Dormélien **JN JULIEN** et sa femme Marie Roselène **DELVA** pour leur amour envers moi et leurs supports dans ma formation.
- Mon Oncle Cidrone **PIERRE** pour ses contributions dans cette formation.
- Mes frères Andréfort **PIERRE**, Laneau **PIERRE** et Andrénet **PIERRE**, ma petite sœur Jastha **PIERRE** et ma cousine Aliana **JN JULIEN** pour leurs contributions dans cette étude.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier le Grand Dieu, l'Architecte de l'Univers, pour le fait qu'il m'a guidé chaque jour dans ma vie.

J'adresse des remerciements sincères à mes conseillers scientifiques, l'Ingénieur-Agronome Sindy **ULYSSE RONY** et le Docteur Jean-Fénel **FÉLIX**, pour leur patience, leur disponibilité et leurs fructueux conseils dans la réalisation de ce travail.

Je remercie sincèrement l'Ingénieur-Agronome Gasner **DEMOSTHÈNE** pour sa contribution dans la réalisation de ce travail.

Mes remerciements distingués sont adressés à mes collègues Ingénieurs-Agronomes Christ Mane **BELIZAIRE**, Fritzner **PIERRE-LOUIS**, Pierre-Louis Ocma **JEAN-BAPTISTE**, Jean Bruno **SAINTEÛS**, Robenson **MÉRISIER** et ma petite cousine Marie Roselaure **JN JULIEN** pour leurs contributions dans la réalisation de certaines activités.

Je remercie chaleureusement ma copine Djanna **CERISIER** pour ses encouragements et son soutien.

Je tiens à remercier également tous mes collègues de la **PHYTOTECHNIE 2012-2017** pour leur support ainsi que la promotion **DIE REFORMERISCH**.

Ce travail est arrivé à terme grâce à l'assistance de mes parents, mes frères et ma sœur et bien d'autres personnes. Que ce travail soit pour eux le fruit de leur patience et de leurs sacrifices.

RÉSUMÉ

Le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) représente l'une des principales sources de protéines alimentaires accessibles en Haïti. Mais, sa production est très faible par rapport aux besoins de la population avec seulement 111 915 tonnes pour un rendement de 660 kg/ha (FAOSTAT, 2017). Ce faible niveau de production est dû surtout à des périodes de sécheresse prolongées, à une baisse de la fertilité des sols et à la pression des agents pathogènes. La recherche de variétés résistantes à la sécheresse et aux maladies et l'utilisation de doses élevées d'engrais chimiques sont préconisées pour essayer d'augmenter le rendement du haricot et bien d'autres cultures d'intérêt.

Mais, tenant compte des effets des engrais chimiques sur l'environnement et la santé humaine et surtout ceux des engrais chimiques azotés sur les nappes phréatiques et aussi le coût élevé des engrais chimiques pour les agriculteurs, beaucoup de chercheurs ont opté pour l'utilisation des rhizobia pour fixer l'azote atmosphérique. Dans cette même optique, cette présente étude est réalisée pour déterminer le seuil de tolérance du haricot au déficit hydrique. Un cultivar de haricot communément cultivé en Haïti (XRAV-40-4) et trois cultivars introduits résistants à la sécheresse (RIL 29, RIL 83 et RIL 147) ont été utilisés dans cette étude. Ils ont été soumis à quatre niveaux de déficit hydrique (100 %, 75 %, 50 % et 25 % de l'humidité correspondant à la capacité au champ (HCC)) et inoculés avec un mélange de trois souches de rhizobia (CIAT 632, CIAT 899 et EAP-1001). L'expérience a été réalisée sous une serre située à l'enceinte de la FAMV en dispositif complètement aléatoire en plan factoriel.

Les résultats obtenus ont montré que les effets du déficit hydrique se répercutent négativement sur la croissance végétative ainsi que sur la nodulation, l'efficacité des nodules et enfin sur les composantes du rendement de tous les cultivars de haricot utilisés. Par contre, avec un niveau de déficit hydrique de 50 % HCC le cultivar RIL 147 a donné des résultats aussi importants que les autres cultivars lorsqu'ils sont conduits à 100 % HCC pour la biomasse aérienne, le nombre et la longueur des gousses.

Cette étude pourrait servir à la définition de critères pertinents de résistance à la sécheresse utilisables en sélection variétale.

Mots clés : inoculation, rhizobium, haricot, résistance, serre, sécheresse

DÉDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ	iii
I. INTRODUCTION	1
1.1. Problématique	1
1.2. Objectifs.....	2
1.3. Hypothèse de travail	2
1.4. Limites de l'étude.....	2
II. REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1. Généralités sur le haricot	3
2.2. Importance agro-socioéconomique de la culture du haricot en Haïti.....	3
2.3. Nutrition azotée du haricot.....	4
2.4. Revue de littérature sur l'inoculation et le déficit hydrique chez le haricot	5
A. Réponse du haricot à l'inoculation	5
B. Le déficit hydrique chez le haricot	5
C. Inoculation et déficit hydrique chez le haricot.....	6
D. Raison d'être du travail.....	7
III. MATÉRIELS ET MÉTHODES	8
3.1. Site expérimental.....	8
3.2. Matériels biologiques	8
3.3. Préparation de l'inoculum.....	9
3.4. Détermination du volume d'eau à apporter pour mettre les pots à la capacité au champ	10
3.5. Vérification de la présence de Rhizobia dans le sol.....	10
3.6. Mise en place de l'essai proprement dit	11

3.7. La procédure expérimentale.....	13
3.7.1. Semis.....	13
3.7.2. L'inoculation.....	13
3.7.3. Arrosage et induction du déficit hydrique	14
3.7.4. Binage	14
3.8. Récolte	14
3.9. Les observations et mesures faites	14
3.10. Traitement des données	15
IV. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	16
4.1. La hauteur des plantes	16
4.2. Précocité à la floraison.....	18
4.3. La nodulation	20
4.3.1. Efficacité des nodules	20
4.3.2. La taille (diamètre) des nodules	21
4.3.3. Le nombre de nodules par plante.....	22
4.4. La biomasse aérienne.....	24
4.5. Les variables de production	26
4.5.1. Le nombre de gousses par plante.....	26
4.5.2. Longueur moyenne des gousses	27
V. CONCLUSION.....	29
VI. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	31
ANNEXES	A

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Résultats des analyses du substrat d'expérimentation	8
Tableau 2. Variation de la hauteur (en cm) des plantes au 30 ^{ème} jour du semis	17
Tableau 3. Variation de la hauteur (en cm) des plantes au 45 ^{ème} jour du semis	18
Tableau 4. Variation du nombre de jours à la floraison	19
Tableau 5. Présentation de l'efficacité nodulaire	21
Tableau 6. Présentation de la taille des nodules	22
Tableau 7. Variation du nombre de nodules par plante	23
Tableau 8. Variation de la biomasse aérienne des plantes (en gramme)	25
Tableau 9. Variation du nombre moyen de gousses par plante	27
Tableau 10. Variation de la longueur moyenne (en cm) des gousses	28

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Observation des racines des quatre cultivars de haricot sans inoculation au stade de floraison	10
Figure 2. Croquis du dispositif expérimental	12
Figure 3. Inoculation du haricot.....	13

LISTE DES ABRÉVIATIONS

- ANOVA** : Analysis Of Variance (Analyse de Variance)
- CIAT** : Centro International de Agronomía Tropical
- EAP** : Escuela Agrícola Panamericana
- FAMV** : Faculté d’Agronomie et de Médecine Vétérinaire
- HCC** : Humidité correspondant à la Capacité au champ
- INRA** : Institut National de la Recherche Agronomique
- MARNDR** : Ministère de l’Agriculture, des Ressources Naturelles et du Développement Rural
- pH** : Potentiel Hydrogène
- RIL** : Recombinant Inbred Lines (Lignées recombinantes)
- Y.M.A.** : Yeast Mannitol Agar
- Y.M.B.** : Yeast Mannitol Broth

LISTE DES ANNEXES

Annexe I. Normes d'interprétation des analyses de sol.....	A
Annexe II. Composition du milieu Y.M.A. (Yeast Mannitol Agar).....	A
Annexe III. Composition du milieu Y.M.B. (Yeast Mannitol Broth).....	A
Annexe IV. Observation des nodules du haricot inoculé.....	B
Annexe V. Échelles d'évaluation de la nodulation du haricot.....	B
Annexe VI. TABLEAUX DES ANALYSES DE VARIANCE.....	D

I. INTRODUCTION

1.1. Problématique

La culture du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.), de même que les autres cultures d'importance économique, est affectée durant sa croissance et son développement par des facteurs entraînant une baisse de la production et des rendements. La disponibilité en eau et en azote sont considérés comme les deux facteurs limitant essentiellement la production du haricot après les problèmes phytosanitaires (REYES-MATAMOROS *et al.*, 2014). En réponse à l'immense besoin en protéines de la population humaine de nos jours, certains chercheurs ont été amenés à s'intéresser davantage à l'amélioration des légumineuses alimentaires dont certaines espèces sont capables de s'adapter à ces conditions et de produire suffisamment de protéines nécessaires à la ration alimentaire (DIAW, 2002).

Le haricot est l'une des plus importantes légumineuses cultivées dans le monde, notamment dans les régions humides d'Haïti. Il est capable d'utiliser l'azote atmosphérique grâce à la symbiose avec des bactéries de la famille des rhizobiaceae pouvant fournir jusqu'à 50 % de son besoin en azote quand une symbiose effective est établie (ROSAS et BLISS, 1985) et parfois plus de 95 % s'il y a un reliquat d'azote dans le sol. Toutefois, la quantité d'azote fixée dépend de plusieurs facteurs qui influencent l'activité symbiotique tels que la souche bactérienne, la plante hôte et les conditions du milieu (LAZALI, 2009).

En Haïti, le haricot est cultivé sur environ 247 000 hectares représentant 59.6 % de la surface agricole occupée par les légumineuses (MARNDR, 2008-2009). La production du haricot en Haïti est passée de 92 070 tonnes en 2010 à 111 915 tonnes en 2016. Le haricot a un rendement national oscillant autour de 0.66 t/ha contre 2.5 t/ha pour les États-Unis pour le haricot nain (FAOSTAT, 2017). Ce faible niveau de rendement est dû à des périodes de sécheresse prolongées, à une baisse de la fertilité des sols, à la pression des agents pathogènes, à la faible nodulation naturelle dans les sols de culture et à l'utilisation de cultivars à faible potentiel de rendement.

De nos jours, beaucoup de chercheurs essayent de trouver des palliatifs à ce problème de faible niveau de rendement chez le haricot en optant pour l'utilisation de

variétés améliorées résistantes aux maladies et à la sécheresse, l'utilisation de fertilisants chimiques et de pesticides pour augmenter les rendements et combattre les ennemis de la culture, l'utilisation de rhizobium comme inoculum pour fixer l'azote atmosphérique et ainsi limiter l'utilisation des engrais chimiques azotés. De son côté, DIAW (2002) a déjà prouvé que les rendements en gousses du haricot obtenus avec des plantes inoculées étaient l'équivalent de ceux des pratiques paysannes au Sénégal avec utilisation de fertilisants azotés.

Cette étude se propose d'étudier le comportement de quatre (4) cultivars de haricot inoculés par un mélange de trois (3) souches de rhizobia (CIAT 632, CIAT 899 et EAP-1001) face au déficit hydrique.

1.2. Objectifs

L'objectif du travail consiste à étudier les effets du déficit hydrique sur la symbiose haricot/Rhizobium. Plus spécifiquement, le travail entend à étudier sous conditions de déficit hydrique:

- les paramètres de croissance du haricot inoculé;
- la nodulation du haricot inoculé ;
- les paramètres de production du haricot inoculé.

1.3. Hypothèse de travail

Il existe un seuil critique de déficit hydrique où la nodulation n'est pas efficace même dans le cas d'une variété résistante à la sécheresse.

1.4. Limites de l'étude

Cette étude conduite au départ sous une serre, en conditions semi-contrôlées, a été finalisée en conditions non contrôlées liées à la démolition de la serre aux fins de la reconstruction de la FAMV, ce qui a impliqué des niveaux de stress additionnel pour les plantules de haricot en fin de végétation. L'étude s'est donc limitée à la production au stade milieu de remplissage des gousses.

II. REVUE DE LITTÉRATURE

2.1. Généralités sur le haricot

Le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) est une plante herbacée annuelle qui a une croissance déterminée ou indéterminée. Il a une grande importance dans la fixation biologique de l'azote. Il constitue une importante source de protéines dans l'alimentation humaine. Il est originaire d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud (ROSAS *et al.*, 2000). La distribution géographique du haricot dans des zones très diversifiées, tant du point de vue climatique que du point de vue pédologique, en ont fait une culture adéquate pour des systèmes agro-cultureux très variés (MESSIAEN, 1992).

Le haricot est généralement à racines pivotantes à la germination, mais peu de temps après la germination quelques racines adventives d'environ 10 à 15 cm de long se développent sur toute la racine principale associées à un réseau de poils absorbants. Ces racines adventives et poils absorbants sont le siège du phénomène de nodulation (FÉLIX, 2016). Les nodules, excroissances provoquées par l'infestation par des bactéries du genre *Rhizobium*, sont le résultat de la fixation symbiotique et commencent à fonctionner environ vingt et un (21) jours après la symbiose. Ces bactéries vivent en symbiose avec la plante où elles en reçoivent de la sève des hydrates de carbone et lui fournissent de l'ammonium synthétisé à partir de l'Azote atmosphérique. Les principales espèces nodulant le haricot sont le *Rhizobium etli* et le *Rhizobium phaseoli* (DIAW, 2002).

2.2. Importance agro-socioéconomique de la culture du haricot en Haïti

En Haïti le haricot est cultivé soit en culture pure soit en association avec d'autres plantes comme le maïs, le sorgho, la patate douce, etc. En régions de plaine, le semis idéal se fait au mois de Décembre grâce aux pluies et/ou sous conditions irriguées; en moyenne altitude (400 à 500 m) le haricot est semé en Février-Mars et en fin de Septembre et entre 800 et 900 m d'altitude il est semé en Février, en Juillet et en Octobre (FÉLIX, 2016; MESSIAEN, 1992). Le haricot a la capacité d'assimiler l'azote de l'air par l'intermédiaire des bactéries du genre *Rhizobium* qui vivent en symbiose dans les racines. Dans la symbiose fixatrice d'azote chacun des deux symbiontes constitue pour l'autre une source d'un élément clé de leur métabolisme (DIAW, 2002).

Le haricot occupe une place importante dans la diète alimentaire de la majorité des haïtiens. Grâce à sa teneur en protéines de meilleure qualité que les protéines animales, il est considéré comme un substitut de la viande (MESSIAEN, 1992). Dans certaines régions du pays, le haricot représente la source principale de protéines pour ceux qui n'ont pas assez de ressources pour se procurer des produits carnés et est considéré comme la « viande du pauvre ». Associé aux céréales, aux cucurbitacées et à certains légumes, le haricot assure le bien-être de l'homme sans les protéines animales et constitue la base de l'alimentation des haïtiens (FÉLIX, 2016). C'est une espèce cultivée importante aussi bien pour sa valeur nutritionnelle que pour son potentiel commercial. Le commerce régional du haricot a un certain poids économique dans les exploitations agricoles haïtiennes.

2.3. Nutrition azotée du haricot

La nutrition azotée du haricot est assurée par deux voies : l'assimilation de l'Azote du sol et la fixation de l'Azote atmosphérique. L'assimilation de l'azote se fait par les racines. La nitratre réductase, enzyme essentiellement située dans les feuilles, réduisent les nitrates pour donner de l'ammoniac qui participe à la formation des acides aminés et des protéines. Ce métabolisme des nitrates se fait aussi au niveau de la racine. La teneur en azote du sol a de grands impacts sur le rendement et le développement du haricot alors que les sols tropicaux sont pour la plupart déficients en cet élément (GRAHAM, 1981 cité par MOÏSE, 2015).

Le haricot est capable de fixer l'azote de l'air grâce à des bactéries qui se trouvent en symbiose dans les racines. C'est une association à bénéfices réciproques entre le haricot et les Rhizobia. Dans cette symbiose, la plante fournit un microenvironnement très particulier nécessaire à la fixation de l'azote et synthétise les enzymes permettant l'assimilation rapide de l'ammoniac produit (DIAW, 2002).

L'infection des racines par les bactéries débouche sur des nodules capables de fixer l'azote atmosphérique. Plusieurs chercheurs travaillant sur le haricot l'ont décrit comme étant une légumineuse à faible capacité de fixation d'azote comparée à d'autres espèces de légumineuses comme le soja (DIAW, 2002). Cette faible capacité du haricot à

fixer l'azote résulte en partie des conditions des sols de la culture, mais aussi de la compétitivité des souches de rhizobiums indigènes ineffectifs.

2.4. Revue de littérature sur l'inoculation et le déficit hydrique chez le haricot

A. Réponse du haricot à l'inoculation

Une fois effectuée, l'inoculation est soumise à plusieurs facteurs pouvant affecter son succès. Les facteurs les plus importants qui affectent le succès de l'inoculation sont l'application de la fertilisation azotée, la sécheresse, la température élevée et les souches de rhizobiums locales peu efficaces. Plusieurs études ont mis en évidence les avantages de l'application de l'azote comme engrais starter, mais des doses d'azote élevées ont un impact négatif sur la nodulation et la fixation de l'azote (HUNGRIA *et al.*, 2005 cité par LAZALI, 2009). Le traitement des graines avec des fongicides affecte le succès de l'inoculation du haricot. Les insecticides et les herbicides appliqués au moment du semis peuvent également empêcher la nodulation et la fixation d'azote (EVANS *et al.*, 1991 cité par LAZALI, 2009). La formation des nodules chez le haricot est très sensible à la concentration en phosphore. La teneur en phosphore des nodules est plus élevée que celle des racines. Le phosphore joue donc un rôle particulier pour les nodules (DIAW, 2002).

B. Le déficit hydrique chez le haricot

Le stress hydrique provoque la diminution de la croissance, de la photosynthèse et l'altération du métabolisme carboné et azoté au niveau de la plante. Le stress hydrique entraîne une réduction considérable du développement et de la croissance des cellules (NUÑEZ-BARRIOS *et al.*, 1998). La croissance de la partie aérienne, et surtout celle des feuilles, est généralement plus sensible au stress hydrique que celle des racines (GUZMAN, 2010).

Le déficit hydrique affecte directement l'activité physiologique de la feuille, et plus particulièrement la photosynthèse. La réduction de la photosynthèse est liée à la diminution de la conductance stomatique et de la surface foliaire. Le stress hydrique induit la fermeture des stomates, avec pour conséquence une diminution de la conductance à la diffusion du CO₂ qui se répercute négativement sur le taux de la photosynthèse (NUÑEZ-

BARRIOS *et al.*, 1998). La plante se comporte comme un système biologique dont les caractéristiques physiologiques changent avec l'état hydrique. L'effet dépressif du stress hydrique sur la plupart des processus physiologiques et métaboliques de la plante se répercute sur les composantes du rendement, le rendement lui-même ainsi que sa qualité.

C. Inoculation et déficit hydrique chez le haricot

L'un des obstacles majeurs à l'exploitation de la fixation symbiotique de l'azote chez le haricot est son inhibition par le déficit hydrique (REYES-MATAMOROS *et al.*, 2014). Les nodules ont aussi besoin de l'eau pour assurer le maintien de la turgescence de leurs tissus et l'exportation des produits de la fixation de l'azote à travers le xylème.

Dans des conditions de déficit hydrique, la croissance et la survie des populations de rhizobia sont affectées, la formation, la longévité et le fonctionnement de nodules, la synthèse de leghémoglobine sont diminués (HUNGRIA et VARGAS, 2000). En outre, le mouvement de ces micro-organismes est entravé, ce qui induit la limitation des premières étapes de la symbiose. Les rhizobia deviennent donc moins mobiles dans le sol, ce qui limite le processus d'infection. L'effet du déficit hydrique sur la symbiose dépend généralement de la phase de la croissance et de développement de la plante, mais aussi de la sévérité de la contrainte hydrique. Un déficit hydrique modéré réduit seulement le nombre de nodules formés sur les racines, alors qu'un déficit sévère réduit le nombre et la taille des nodules (WILLIAMS et DEMALLORCA, 1984 cité par LAZALI, 2009). Le déficit hydrique affecte la fixation symbiotique de l'azote par la réduction de la leghémoglobine dans les nodules, la diminution de l'activité spécifique des nodules et la réduction du nombre et du poids sec des nodules. Le déficit hydrique retarde aussi la formation des nodules chez le haricot. La réduction du nombre et du diamètre des nodules a été également observée chez le haricot exposé au déficit hydrique (ASHRAF et IRAM, 2005). La symbiose fixatrice d'azote est plus sensible au déficit hydrique chez les cultivars à croissance déterminée par rapport à celle des cultivars à croissance indéterminée (FAGHIRE, 2012).

D. Raison d'être du travail

Les données de la littérature ont permis de constater que la culture du haricot est entravée par bon nombre de facteurs primordiaux qui contraignent la nodulation et limitent son rendement. En Haïti, cette culture n'est pas exempte de ces facteurs limitants et on peut en mentionner la très faible résistance des variétés locales au déficit hydrique, la faible nodulation naturelle dans les sols de culture et la baisse de la fertilité des sols. Toutes ces considérations ont conduit à mener cette étude sur les effets du déficit hydrique sur la symbiose fixatrice d'azote de quatre (4) cultivars de haricot inoculés par des souches de rhizobia efficaces pour en améliorer le rendement.

III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

3.1. Site expérimental

L'expérimentation a été conduite sous une serre à charpente métallique entourée d'une grille à maille anti-aphide et recouverte de plaques polycarbonates située dans la cour de la FAMV, à Damien, dans la Plaine du Cul de Sac. À partir de l'initiation de la floraison, les plantes semées en pots de 19 cm de diamètre à la base, 22 cm de diamètre au sommet et de 23 cm de hauteur ont été retirées de la serre et placées sous un abri recouvert de plaques polycarbonates.

Au cours des quarante-cinq (45) premiers jours de l'essai, les températures mesurées dans la serre ont varié de 21.1 °C à 47.2 °C. Le substrat utilisé est constitué en un mélange de sol prélevé sur la ferme de Damien et de Peet moss en proportion 3 pour 1. Un échantillon du substrat a été apporté au laboratoire pour les analyses des teneurs en azote, en phosphore, en potassium et de la texture. Les caractéristiques du substrat sont données par le tableau 1.

Tableau 1. Résultats des analyses du substrat d'expérimentation

	N estimé (%)	P ₂ O ₅ assimilable (ppm)	K ⁺ (meq/100 g)	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	Texture
	0.17	30	1.25	5	30	65	Limono-Sableux
Interprétation	Moyen	Bas	Élevé				
Méthodes d'analyse	Calculé à partir du pourcentage de matière organique	Olsen	Méthode à l'acétate				Bouyoucos

Source analyse : Laboratoire des Sols, FAMV
Référence : (SOLTNER, 1985)

3.2. Matériels biologiques

Pour réaliser cet essai, trois cultivars de haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) résistants à la sécheresse provenant de l'INRA de Montpellier (France) et un cultivar originaire du Porto-Rico communément cultivé en Haïti ont été utilisés. Ce dernier est reconnu sous le nom de XRAV-40-4 et les cultivars provenant de l'INRA sont respectivement codés RIL 29, RIL 83 et RIL 147. Le cultivar XRAV-40-4, résistant aux

virus de la mosaïque dorée et de la mosaïque commune, a été développé au Porto-Rico. Il résulte du croisement entre la lignée PR00003-124, qui est une lignée à graine blanche résistante aux virus de la mosaïque dorée et de la mosaïque commune et la lignée RAVEN, qui est une lignée à graine noire sélectionnée pour sa résistance au virus de la mosaïque commune et son adaptation aux tropiques. Les lignées RILs résultent du croisement entre la lignée BATT447 qui a été sélectionnée au Mexique pour sa résistance à la sécheresse et la lignée DOR364 qui a été sélectionnée pour sa résistance au virus de la mosaïque dorée. Les lignées RIL 29, 83 et 147 utilisées sont sensibles à la déficience en phosphore.

Les plantes ont été inoculées avec un mélange des souches de rhizobia CIAT 632 (*Rhizobium etli*), CIAT 899 (*Rhizobium tropici*) et EAP-1001.

3.3. Préparation de l'inoculum

La préparation des souches de rhizobium destinées à inoculer les plantules de haricot a été réalisée en deux (2) étapes:

1) Reprise des souches de rhizobium

L'ensemencement des souches de rhizobium a été fait sur gélose inclinée contenue dans des tubes à essai. Pour se faire, le milieu Yeast Mannitol Agar (Y.M.A.) (Annexe II) a été utilisé et le pH a été ajusté à 6.8. L'ensemencement a été fait en zigzag ascendant et en douceur pour éviter d'abîmer la gélose à l'aide d'une anse de platine préalablement trempée dans la culture bactérienne.

2) Préparation de l'inoculum proprement dite

Pour préparer la suspension bactérienne à inoculer, les bactéries ont été mises en culture liquide sur milieu Yeast Mannitol Broth (Y.M.B.) (Annexe III). Pour se faire, dans les tubesensemencés un (1) millilitre d'eau stérile a été ajouté et à l'aide d'une anse de platine la prolifération bactérienne a été mélangée à l'eau puis versée dans le milieu Yeast Mannitol Broth. Le milieu a été placé sous agitation magnétique à la température de la salle pendant sept (7) jours. Le constat de la multiplication bactérienne est fait avec l'apparition d'un milieu trouble qui correspond à une bonne concentration en bactéries dans la suspension, cette déduction est faite par la routine.

3.4. Détermination du volume d'eau à apporter pour mettre les pots à la capacité au champ

Pour commencer, un test a été effectué. À partir de ce dernier, le volume d'eau à apporter pour mettre les pots au niveau d'humidité correspondant à la capacité au champ (HCC¹) a été défini. L'expérience a été réalisée sur seize (16) pots remplis du substrat d'expérimentation. Un volume de 3 000 ml d'eau, mesuré à l'aide d'un cylindre gradué, a été versé dans chaque pot à l'aide d'un arrosoir et l'excès d'eau filtré, 300 ml en moyenne, a été récupéré après quinze minutes de ressuyage quand la vitesse de ressuyage a été suffisamment petite. En faisant la différence entre le volume d'eau versé et le volume d'eau recueilli, un volume d'eau égal à 2 700 ml a été considéré comme le volume d'eau nécessaire pour amener le sol au niveau d'humidité correspondant à la capacité au champ.

3.5. Vérification de la présence de Rhizobia dans le sol

Pour vérifier la présence de rhizobia spécifiques du haricot dans le sol d'expérimentation, un essai a été réalisé avec les quatre (4) cultivars dans un dispositif complètement aléatoire avec 4 répétitions. L'absence de nodules sur les racines jusqu'au moment de la floraison a permis de conclure que le sol utilisé ne contenait pas de souches de rhizobium spécifiques du haricot. Ce test a justifié la nécessité d'inoculer pour améliorer la fixation symbiotique de l'azote du haricot avec le sol utilisé (figure 1).



Figure 1. Observation des racines des quatre cultivars de haricot sans inoculation au stade de floraison

¹ Terme tiré de « Estimation des propriétés hydriques du sol (LABIDI, 2016) ». Disponible sur <http://www.agrimaroc.ma/estimation-des-proprietes-hydriques-du-sol>

3.6. Mise en place de l'essai proprement dit

o Description de l'expérimentation

Pour étudier la réponse des cultivars au déficit hydrique, un arrangement factoriel dans un dispositif complètement aléatoire a été utilisé. Les cultivars RIL 29, RIL 83, RIL 147 et XRAV-40-4 ont constitué le premier facteur et les apports d'eau A1 (100 % HCC), A2 (75 % HCC), A3 (50 % HCC) et A4 (25 % HCC) ont constitué le second facteur, d'où l'expérience a été faite avec seize (16) traitements.

La mise en place de l'essai a été faite avec cinq (5) répétitions par traitement pour évaluer les paramètres de croissance, les paramètres de précocité, la nodulation et les paramètres de production. De ce fait, l'essai a été constitué de quatre-vingt (80) unités expérimentales. Chaque unité expérimentale a été représentée par un pot rempli d'un mélange de terre et de peat moss ayant trois plantes disposées en quinconce et distantes de 10 cm. Ces pots sont caractérisés par un diamètre à la base de 19 cm, un diamètre au sommet de 22 cm et d'une hauteur de 23 cm. Ils sont perforés à la base à raison de cinq (5) trous pour faciliter le drainage des excès en eau.

Les pots sont placés sur des blocs pour éviter la stagnation des surplus d'eau directement sous les pots. Les blocs ont une longueur de 40 cm et sont distants de 30 cm. Des bordures de 30 cm ont été considérées des 4 côtés de la parcelle. Donc, l'expérimentation a été faite sur un espace de 7.30 m de long et de 5.90 m de large donnant une superficie de 43.07 m² (figure 2).

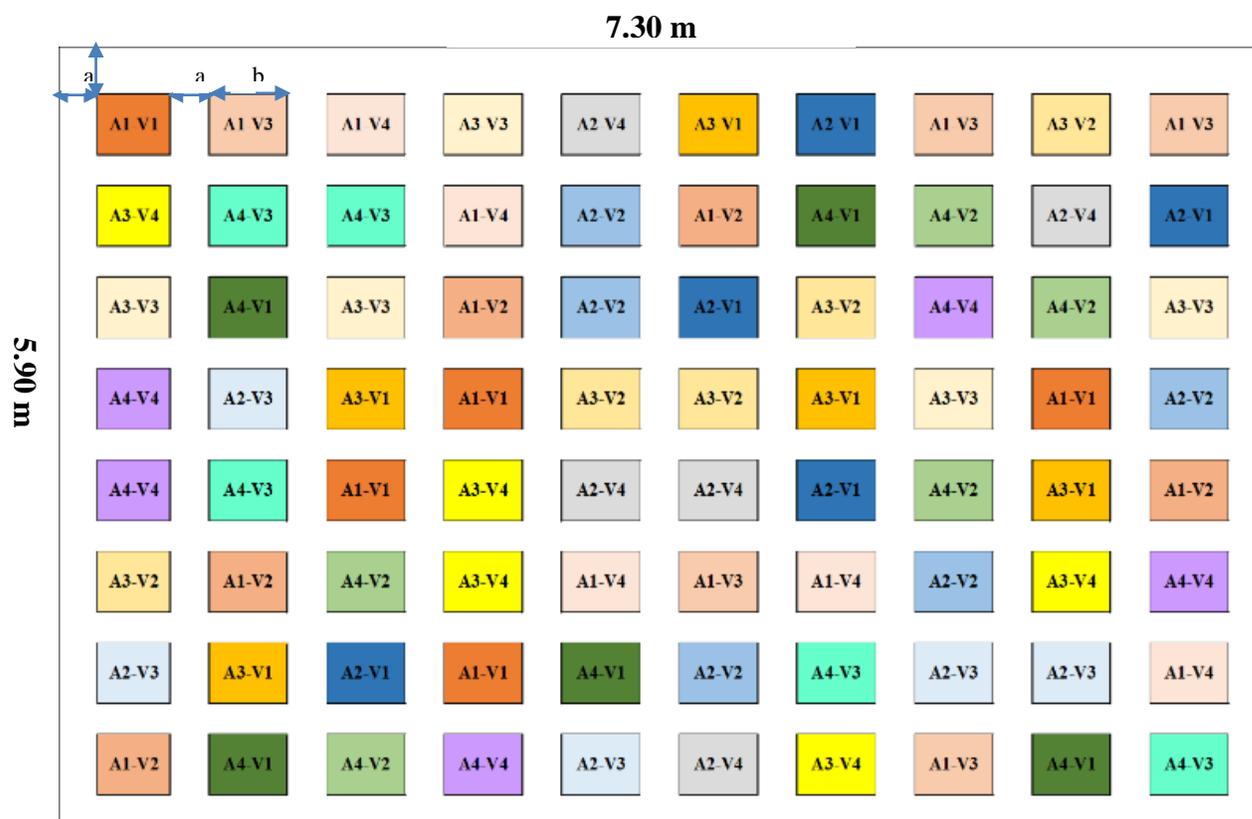


Figure 2. Croquis du dispositif expérimental

Légende :

<u>A: Apports d'eau</u>	<u>V: Cultivars</u>
A1 : Humidité correspondant à la capacité au champ (2 700 ml) A2 : 75% de A1 A3 : 50% de A1 A4 : 25% de A1	V1 : XRAV-40-4 V2 : RIL 29 (cultivar introduit) V3 : RIL 83 (cultivar introduit) V4 : RIL 147 (cultivar introduit)
$a = 30 \text{ cm}$	$b = 40 \text{ cm}$

3.7. La procédure expérimentale

3.7.1. Semis

Le semis a été fait dans des pots remplis du mélange de terre et de peat moss à raison de trois (3) semences par pot. Les semences ont été distribuées en forme de triangle de façon à avoir trois (3) plantes disposées en quinconce dans chaque pot.

3.7.2. L'inoculation

Après avoir confirmé l'absence de rhizobia spécifiques du haricot dans le sol destiné à l'expérimentation, les plantes ont été inoculées avec le mélange préparé avec les trois souches de rhizobium (CIAT 632, CIAT 899 et EAP-1001) qui ont été mises en culture au laboratoire. Deux inoculations ont été réalisées respectivement au stade de deux (2) feuilles cotylédonaires et au stade de trois (3) feuilles trifoliées en versant à chaque fois, à l'aide d'une pipette graduée, 3 ml du mélange d'inoculum au collet de chaque plante (figure 3). À noter que l'inoculation se fait tôt le matin pour éviter la détérioration des souches de rhizobium par la lumière.



Figure 3. Inoculation du haricot

A : Stade de 2 feuilles cotylédonaires

B : Stade de 3^{ème} feuille trifoliée

3.7.3. Arrosage et induction du déficit hydrique

Après la levée toutes les plantes ont été arrosées normalement jusqu'au HCC. Les apports d'eau ont été faits manuellement à l'aide d'un arrosoir en répartissant l'eau sur toute la surface des pots pour s'assurer d'une bonne uniformité des apports. En fonction de l'humidité du sol, deux apports d'eau à intervalle de dix (10) jours ont été faits avant l'induction du déficit hydrique.

Le déficit hydrique a été induit au 21^{ème} jour du semis, soit au stade du développement de la 3^{ème} feuille trifoliée. À partir de ce stade, les apports d'eau ont été faits à chaque fois que les plantes qui sont conduites au niveau d'humidité correspondant à la capacité au champ (HCC) ont commencé à présenter les premiers signes de flétrissement.

À partir de l'induction du déficit hydrique six apports d'eau à intervalle de sept (7) jours en moyenne ont été faits jusqu'à la fin de l'essai.

3.7.4. Binage

Pour favoriser la respiration racinaire, le médium a été remué soigneusement dans chaque pot de manière à casser les mottes tous les 3 à 4 jours après chaque séance d'arrosage à l'aide d'une fourchette.

3.8. Récolte

La récolte a été effectuée pendant le stade de développement des gousses, au 57^{ème} jour du semis. Elle a été faite au moyen d'un sécateur en coupant chaque plante à partir de la cicatrice cotylédonaire.

3.9. Les observations et mesures faites

Les différentes variables qui ont été prises en compte durant cette étude sont classées en variables de croissance (hauteur), variable de précocité (précocité à la floraison), la nodulation, la biomasse aérienne et variables de production.

Pour l'évaluation de la hauteur, la tige principale a été considérée en utilisant un ruban métrique aux 30^{ème} et 45^{ème} jours du semis pour faire les mesures.

La précocité à la floraison, nombre de jours entre le semis et l'initiation des fleurs, a été évaluée quand plus de 50 % des plantes de chaque unité expérimentale ont porté au moins une fleur. Les résultats obtenus sont arrondis au dixième près.

La nodulation a été évaluée en tenant compte de l'efficacité, de la taille et du nombre des nodules. L'efficacité, basée sur la couleur interne des nodules, a mis en évidence la présence ou non de la leghémoglobine. Elle a été évaluée par dissection au moyen de bistouri d'un échantillon de cinq nodules collectés au hasard sur les plantes utilisées pour évaluer la taille des nodules. La taille a été mesurée à l'aide d'un papier millimétré après avoir enlevé et lavé soigneusement les nodules d'une répétition choisie au hasard pour chaque traitement. Le nombre de nodules a été évalué en collectant et comptant les nodules issus des plantes soigneusement déterrées.

Pour évaluer la biomasse aérienne, les plantes ont été coupées, à l'aide d'un sécateur, à partir de la cicatrice cotylédonaire et mises à l'étuve à une température de 105 °C pendant 24 heures. Ces échantillons ainsi séchés ont été pesés à l'aide d'une balance électronique précise au dixième de gramme.

Pour les variables de production, le nombre et la longueur moyenne des gousses ont été pris en compte. La longueur moyenne des gousses a été mesurée à l'aide d'une règle graduée.

À noter que la nodulation, la biomasse aérienne et les variables de production ont été évaluées simultanément.

3.10. Traitement des données

Les données ci-dessus ont été collectées et soumises à une analyse de variance en vue de déterminer leur niveau de significativité (pour voir s'il y a des différences ou pas entre les traitements). Dans les cas où il y a eu des différences significatives, les moyennes ont été comparées au seuil de 5 % de probabilité à l'aide du logiciel R (version 2.13.2) en utilisant le test de Tukey.

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les différents paramètres étudiés tout au long de l'essai sont présentés et discutés dans ce chapitre du document.

4.1. La hauteur des plantes

Les résultats de l'Analyse de Variance ont montré qu'il y a des différences significatives à 5 % de probabilité entre les différents niveaux de déficit hydriques appliqués et entre les différents cultivars de haricot pour la hauteur enregistrée au 30^{ème} jour du semis (Annexe 6.1). L'analyse de variance a montré qu'il n'y a pas de différences significatives pour l'interaction entre les niveaux de déficit hydrique et les cultivars de haricot, mais le test de Tukey utilisé pour comparer les moyennes a quand même décelé certaines différences au niveau de l'interaction entre ces deux facteurs surtout entre les différents niveaux de déficit hydrique pour les cultivars RILs.

Selon le test de comparaison des moyennes, des différences significatives ont été enregistrées entre les différents niveaux de déficit hydrique appliqués pour les cultivars RIL 29, RIL 83 et RIL 147.

Le cultivar RIL 29 soumis au niveau de déficit 75 % de l'humidité correspondant à la capacité au champ (HCC) présente une hauteur significativement supérieure (41.60 cm) à la moyenne enregistrée pour les autres niveaux de déficit, mais il s'est montré significativement inférieur quand il est soumis au niveau de déficit 25 % HCC (31.33 cm) comme l'indique le tableau 2. Pour les niveaux de déficit 100 % et 50 % HCC il ne présente aucune différence significative. Le cultivar RIL 83 conduit avec le niveau de déficit 25 % HCC s'est montré significativement inférieur comparé aux autres niveaux de déficit. Il ne présente aucune différence significative entre les niveaux de déficit 100 %, 75 % et 50 % HCC. Le cultivar RIL 147 soumis au niveau de déficit 25 % HCC est significativement inférieur comparé aux autres niveaux de déficit. Conduit avec le niveau de déficit 50 % HCC, il s'est montré significativement inférieur à la moyenne des niveaux 100 % et 75 % HCC. Il ne présente pas de différence significative entre les niveaux de déficit 100 % et 75 % HCC.

Le cultivar XRAV-40-4 ne présente aucune différence significative entre les différents niveaux de déficit hydrique (tableau 2).

Tableau 2. Variation de la hauteur (en cm) des plantes au 30^{ème} jour du semis

Niveaux de déficit (% HCC)	Cultivars				Moyenne Niveaux de déficit
	XRAV-40-4	RIL 29	RIL 83	RIL 147	
100	36.92 ± 3.57 Aa	35.69 ± 5.37 Ab	37.07 ± 5.29 Aa	33.13 ± 6.69 Aa	35.70 ± 4.80 a
75	34.72 ± 7.89 Aa	41.60 ± 2.80 Aa	36.80 ± 6.24 Aa	36.14 ± 2.99 Aa	37.31 ± 5.65 a
50	36.33 ± 5.07 Aa	36.37 ± 2.40 Ab	37.07 ± 5.66 Aa	28.93 ± 5.98 Ab	34.68 ± 5.70 a
25	30.80 ± 4.31 Aa	31.33 ± 5.73 Ac	30.20 ± 5.37 Ab	24.13 ± 5.71 Ac	29.12 ± 5.71 b
Moyenne Cultivars	34.69 ± 5.58 AB	36.25 ± 5.46 A	35.28 ± 5.69 A	30.58 ± 6.87 B	34.20
Δ Tukey: Cultivars = 4.31 Apport d'eau = 4.31 Interaction = 11.65					

NB : Les moyennes accompagnées d'une même lettre majuscule dans une même ligne ne sont pas significativement différentes.

Les moyennes accompagnées d'une même lettre minuscule dans une même colonne ne sont pas significativement différentes. Les résultats sont présentés sous la forme de moyenne ± écart-type.

En moyenne, pour les différents niveaux de déficit hydrique la plus faible hauteur des plantes (29.12 cm) est enregistrée avec le niveau 25 % HCC et elle est significativement inférieure à la hauteur moyenne des trois autres niveaux de déficit hydrique. Pour les niveaux de déficit 100 %, 75 % et 50 % HCC il n'y a aucune différence significative (tableau 2).

Le cultivar RIL 147 présente une hauteur moyenne (30.58 cm) significativement inférieure à la moyenne des hauteurs des cultivars RIL 29 et RIL 83 (respectivement 36.25 et 35.28 cm), mais il n'est pas différent du cultivar XRAV-40-4 (34.69 cm) comme l'indique le tableau 2. Entre les cultivars XRAV-40-4, RIL 29 et RIL 83 aucune différence significative n'est observée.

Au 45^{ème} jour du semis, l'Analyse de Variance ont montré qu'il y a des différences significatives à 5 % de probabilité entre les différents niveaux de déficit hydriques appliqués et qu'il n'y a aucune différence significative entre les cultivars de haricot et l'interaction entre les niveaux de déficit hydrique et les cultivars (Annexe 6.2).

Pour les différents niveaux de déficit, la plus faible hauteur des plantes (38.35 cm) est enregistrée avec le niveau de déficit 25 % HCC. Cette valeur est significativement inférieure à la moyenne du niveau de déficit 75 % HCC (43.75 cm) (tableau 3). Les niveaux de déficit 100%, 75 % et 50 % HCC ne présentent aucune différence significative.

Également, il n'y a pas de différence significative entre les niveaux de déficit 100 %, 50 % et 25 % HCC.

Tableau 3. Variation de la hauteur des plantes au 45^{ème} jour du semis

Niveaux de déficit hydrique	Hauteur moyenne (cm)
100 % HCC	41.72 ± 4.07 ab
75 % HCC	43.75 ± 4.15 a
50 % HCC	40.74 ± 5.86 ab
25 % HCC	38.35 ± 5.69 b

Δ Tukey = 4.14

NB : Les moyennes accompagnées d'une même lettre ne sont pas significativement différentes. Les résultats sont présentés sous la forme de moyenne ± écart-type.

Ces résultats ont montré que la croissance végétative du haricot ralentit avec le déficit hydrique. Mais, un développement de liane est observé à partir du 15^{ème} jour jusqu'au 45^{ème} jour du semis, ce qui a contribué à l'accroissement de la hauteur des plantes. Mais de façon globale, la croissance optimale des plantules de haricot est obtenue avec le niveau de déficit 75 % HCC.

4.2. Précocité à la floraison

L'Analyse de Variance a montré qu'il y a des différences significatives à 5 % de probabilité entre les différents niveaux de déficit hydriques appliqués et entre les différents cultivars de haricot pour le nombre de jours d'entrée en floraison (Annexe 6.3). Ces résultats ont également montré qu'il y a des différences significatives au niveau de l'interaction entre les niveaux de déficit hydrique et les cultivars de haricot.

Les résultats montrent que le déficit hydrique a des répercussions sur l'entrée en floraison du haricot. Pour le niveau de déficit 100 % HCC le cultivar XRAV-40-4 s'est montrée significativement plus précoce à la floraison (35 jours) que le cultivar RIL 29 (39 jours) comme l'indique le tableau 4. Pour le niveau de déficit 75 % HCC les cultivars RIL 83 et RIL 147 se sont montrés significativement différents. Entre les niveaux de déficit 50 % et 25 % HCC aucune différence significative n'est pas enregistrée.

Pour les cultivars XRAV-40-4 et RIL 83, il n'y a pas de différence significative entre les différents niveaux de déficit hydrique. Pour le cultivar RIL 29, des différences sont observées entre 25 % et 75 % HCC. Par contre, aucune différence n'est observée entre les niveaux 100 %, 75 % et 50 % HCC, ni entre les niveaux 100 %, 50 % et 25 % HCC. Le cultivar RIL 147 soumis au niveau de déficit hydrique 25 % HCC s'est montré significativement moins précoce à la floraison (40 jours) comparativement aux niveaux 100 % et 75 % HCC (tableau 4).

Tableau 4. Variation du nombre de jours à la floraison

Niveaux de déficit (% HCC)	Cultivars				Moyenne Niveaux de déficit
	XRAV-40-4	RIL 29	RIL 83	RIL 147	
100	34.80 ± 0.45 Ba	38.80 ± 2.05 Aab	36.60 ± 1.34 ABa	35.40 ± 1.67 ABb	36.40 ± 2.09 bc
75	35.00 ± 2.24 ABa	36.00 ± 1.22 ABb	38.80 ± 2.59 Aa	34.80 ± 0.84 Bb	36.15 ± 2.37 c
50	36.40 ± 2.79 Aa	37.40 ± 1.95 Aab	39.80 ± 1.30 Aa	37.60 ± 2.70 Aab	37.80 ± 2.44 b
25	38.60 ± 2.41 Aa	41.00 ± 0.00 Aa	40.20 ± 0.45 Aa	40.40 ± 0.89 Aa	40.05 ± 1.50 a
Moyenne Cultivar	36.20 ± 2.53 C	38.60 ± 2.36 AB	38.85 ± 2.06 A	37.05 ± 2.74 BC	37.60
Δ Tukey: Cultivars = 1.48 Apport d'eau = 1.48 Interaction = 4.00					

NB : Les moyennes accompagnées d'une même lettre majuscule dans une même ligne ne sont pas significativement différentes.

Les moyennes accompagnées d'une même lettre minuscule dans une même colonne ne sont pas significativement différentes. Les résultats sont présentés sous la forme de moyenne ± écart-type.

Dans les mêmes conditions de stress, il y a donc une variation inter variétale pour l'entrée en floraison du haricot. Le cultivar XRAV-40-4 s'est montré significativement plus précoce à la floraison (36 jours) que les cultivars RIL 29 (39 jours) et RIL 83 (39 jours). Le cultivar RIL 147 s'est également montré significativement plus précoce à la floraison (37 jours) que le cultivar RIL 83 (39 jours) comme indiqué dans le tableau 4. Il n'y a aucune différence significative entre les cultivars XRAV-40-4 et RIL 147, entre les cultivars RIL 29 et RIL 83 et aussi entre RIL 29 et RIL 147.

Les plantes expérimentées avec le niveau de déficit 25 % HCC se sont montrées significativement moins précoces à la floraison que celles conduites aux niveaux de déficit 100 %, 75 % et 50 % HCC. Les plantes soumises au niveau de 75 % HCC se sont montrées significativement plus précoces à la floraison (36 jours) que celles conduites

avec le niveau 50 % HCC. Aucune différence significative n'est observée entre les niveaux 100 % et 75 % HCC et aussi entre les niveaux 100 % et 50 % HCC.

Ces résultats ont montré que la précocité à la floraison diminue avec la sévérité du déficit hydrique. Mais, elle varie également avec les génotypes en question.

4.3. La nodulation

Au cours de cette étude, l'efficacité (couleur), la taille (diamètre) et le nombre de nodules par plante ont été les paramètres pris en compte pour l'évaluation de la nodulation.

4.3.1. Efficacité des nodules

Après dissection des nodules collectés, ils sont classés en deux catégories suivant leur coloration interne. La première classe comprend les nodules de couleur rose due à la présence de la leghémoglobine et la deuxième classe comprend ceux de couleur blanc due à l'absence de la leghémoglobine. La première catégorie constitue la catégorie des nodules fonctionnels et la seconde catégorie constitue celle des nodules non fonctionnels. Les gros nodules sont révélés majoritairement fonctionnels.

L'efficacité nodulaire est dépendante du déficit hydrique et varie différemment avec les différents cultivars testés. Le plus grand pourcentage de nodules efficaces est enregistré avec les plantes conduites avec les niveaux de déficit 50 %, 75 % et 100 % HCC.

Globalement, les gros nodules sont majoritairement efficaces pour les différents niveaux de déficit hydrique. Mais, pour les niveaux de déficit 50 % et 25 % HCC l'efficacité des petits nodules diminue drastiquement (tableau 5).

Les cultivars RIL 89 et RIL 147 présentent moins de nodules efficaces en comparaison aux cultivars XRAV-40-4 et RIL 29 comme l'indique le tableau 5.

Tableau 5. Présentation de l'efficacité nodulaire

Cultivars	Niveaux de déficit appliqués (en % HCC)	EFFICACITÉ DES NODULES			
		Gros Nodules ($\geq 2\text{ mm}$ et $\leq 3\text{ mm}$)		Petits Nodules ($< 2\text{ mm}$)	
		% Rose	% Blanc	% Rose	% Blanc
XRAV-40-4	100	100.00	0.00	80.00	20.00
	75	100.00	0.00	60.00	40.00
	50	0.00	0.00	20.00	80.00
	25	60.00	40.00	60.00	40.00
RIL 29	100	100.00	0.00	100.00	0.00
	75	100.00	0.00	60.00	40.00
	50	80.00	20.00	60.00	40.00
	25	0.00	0.00	0.00	100.00
RIL 83	100	100.00	0.00	60.00	40.00
	75	80.00	20.00	60.00	40.00
	50	0.00	0.00	40.00	60.00
	25	0.00	0.00	0.00	100.00
RIL 147	100	0.00	0.00	20.00	80.00
	75	100.00	0.00	0.00	100.00
	50	100.00	0.00	0.00	100.00
	25	0.00	0.00	0.00	100.00

La contrainte hydrique a influencé la fonctionnalité des nodules en réduisant la synthèse de la leghémoglobine. Selon ces résultats, un déficit hydrique de plus de 50 % HCC réduit sévèrement la synthèse de la leghémoglobine rendant les nodules majoritairement non fonctionnels.

4.3.2. La taille (diamètre) des nodules

Les nodules collectés sont classés en deux catégories suivant leur diamètre : la catégorie des petits nodules qui regroupe les nodules ayant un diamètre inférieur à 2 mm et la catégorie des gros nodules regroupant ceux ayant un diamètre allant de 2 à 3 mm.

La taille des nodules est réduite avec le déficit hydrique, mais elle varie aussi avec les génotypes. Pour les cultivars XRAV-40-4 et RIL 29 le pourcentage de gros nodules aurait tendance à augmenter avec la sévérité du déficit hydrique. Les cultivars RIL 83 et RIL 147 ont présenté des pourcentages de gros nodules qui auraient tendance à diminuer avec la sévérité du déficit hydrique (tableau 6). Cependant, les pourcentages de petits nodules surabondent pour la majorité des traitements.

Tableau 6. Présentation de la taille des nodules

Cultivars	Niveaux de déficit appliqués (en % HCC)	TAILLE DES NODULES	
		% Gros Nodules ($\geq 2\text{mm}$ et $\leq 3\text{ mm}$)	% Petits Nodules ($< 2\text{mm}$)
XRAV-40-4	100	10.77	89.23
	75	24.00	76.00
	50	0.00	100.00
	25	61.54	38.46
RIL 29	100	9.30	90.70
	75	14.71	85.19
	50	27.59	72.41
	25	0.00	100.00
RIL 83	100	37.50	62.50
	75	20.83	79.17
	50	0.00	100.00
	25	0.00	100.00
RIL 147	100	0.00	100.00
	75	28.57	71.43
	50	20.00	80.00
	25	0.00	100.00

En fait, ces résultats ont montré que la taille des nodules est influencée par le déficit hydrique et le degré de sensibilité varie avec les génotypes en question. Mais, la surabondance des petits nodules serait due à une insuffisance d'aération du sol.

4.3.3. Le nombre de nodules par plante

L'Analyse de Variance a montré qu'il y a des différences significatives à 5 % de probabilité entre les différents niveaux de déficit hydriques appliqués, entre les différents cultivars de haricot pour le nombre de nodules par plante et aussi au niveau de l'interaction entre les niveaux de déficit hydrique et les cultivars de haricot (Annexe 6.4).

Avec le niveau d'humidité correspondant à la capacité au champ (HCC), le cultivar RIL 147 présente significativement moins de nodules (2.93 nodules/plante) que les cultivars XRAV-40-4 (20.20 nodules/plante) et RIL 83 (23.53 nodules/plante). Pour ce même niveau de déficit hydrique, les cultivars XRAV-40-4, RIL 29 et RIL 83 se sont montrés statistiquement identiques comme l'indique le tableau 7. Aucune différence significative n'est enregistrée pour les autres niveaux de déficit.

Le cultivar XRAV-40-4 présente un nombre de nodules à 100 % HCC qui est significativement supérieur aux autres niveaux de déficit avec un écart moyen de 17.13 nodules/plante. Le cultivar RIL 29 soumis au niveau de déficit 75 % HCC présente un nombre de nodules significativement plus élevé comparé aux niveaux de déficit 50 % et 25 % HCC. Il ne présente aucune différence significative pour les niveaux de déficit 100 %, 50 % et 25 % HCC. Le cultivar RIL 83 conduit à 100 % HCC présente un nombre de nodules significativement supérieur que lorsqu'il est soumis aux niveaux de déficit 50 % et 25 % HCC. Il ne présente aucune différence significative entre les niveaux de déficit 75 %, 50 % et 25 % HCC et également entre les niveaux 100 % et 75 % HCC. Le cultivar RIL 147 s'est montré identique à tous les niveaux de déficit hydrique (tableau 7).

En moyenne, les plantes conduites à 100 % HCC ont donné un nombre de nodules significativement plus élevé que celles soumises aux autres niveaux de déficit hydrique avec un écart moyen de 11.56 nodules/plante. Celles conduites avec le niveau de déficit 75 % HCC présentent un nombre de nodules significativement plus élevé que la moyenne de celles qui sont conduites à des niveaux de déficit 50 % et 25 % HCC comme indiqué dans le tableau 7.

Le cultivar RIL 147 présente un nombre de nodules significativement plus faible que la moyenne des cultivars RIL 29 et RIL 83 avec un écart moyen de 7.10 nodules/plante. Les cultivars XRAV-40-4, RIL 29 et RIL 83 ne présentent aucune différence significative. De même, les cultivars XRAV-40-4 et RIL 147 ne présentent aucune différence significative entre eux.

Tableau 7. Variation du nombre de nodules par plante

Niveaux de déficit (% HCC)	Cultivars				Moyenne niveaux de déficit
	XRAV-40-4	RIL 29	RIL 83	RIL 147	
100	20.20 ± 13.11 Aa	16.60 ± 14.10 ABab	23.53 ± 14.11 Aa	2.93 ± 3.61 Ba	15.82 ± 13.68 a
75	2.67 ± 3.48 Ab	17.83 ± 6.35 Aa	10.60 ± 6.97 Aab	3.00 ± 2.08 Aa	8.53 ± 7.94 b
50	3.13 ± 3.11 Ab	2.33 ± 4.13 Ab	1.13 ± 1.02 Ab	2.93 ± 2.63 Aa	2.38 ± 2.82 c
25	3.40 ± 1.19 Ab	1.40 ± 1.36 Ab	2.13 ± 1.77 Ab	0.53 ± 0.87 Aa	1.87 ± 1.63 c
Moyenne Cultivars	7.35 ± 9.95 AB	9.54 ± 10.80 A	9.35 ± 11.74 A	2.35 ± 2.54 B	7.15
Δ Tukey: Cultivars = 5.63 Apport d'eau = 5.63 Interaction = 15.23					

NB : Les moyennes accompagnées d'une même lettre majuscule dans une même ligne ne sont pas significativement différentes.

Les moyennes accompagnées d'une même lettre minuscule dans une même colonne ne sont pas significativement différentes. Les résultats sont présentés sous la forme de moyenne ± écart-type.

Le développement des nodules chez le haricot est donc dépendant du déficit hydrique et des cultivars. Ces résultats montrent que la formation des nodules diminue avec le déficit hydrique.

D'après l'échelle de CIAT (1992) (Annexe V), la nodulation est intermédiaire pour les cultivars XRAV-40-4 et RIL 83 (avec respectivement 20.20 et 23.53 nodules/plante) quand elles sont conduites à 100 % HCC, elle est médiocre pour le cultivar RIL 29 soumise aux niveaux de déficit 100 % et 75 % HCC (avec respectivement 16.60 et 17.83 nodules/plante) et pour le cultivar RIL 147 conduite au niveau de déficit 75 % HCC (10.60 nodules/plante). Elle est très mauvaise (moins de 10 nodules/plante) à tous les autres niveaux de déficit hydrique.

Dans sa globalité, la nodulation est médiocre pour les plantes conduites à 100 % HCC (15.82 nodules/plante) et très mauvaise (avec moins de 10 nodules/plante) pour les niveaux de déficit 75 %, 50 %, 25 % HCC et pour toutes les cultivars. Ce mauvais état de la nodulation pourrait résulter du fait que le sol utilisé aurait tendance à se tasser dans les pots avec la répétition des arrosages et aussi de la faible teneur du sol en phosphore.

4.4. La biomasse aérienne

Les résultats de l'Analyse de Variance ont montré qu'il y a des différences significatives à 5 % de probabilité entre les différents niveaux de déficit hydriques appliqués et entre les différents cultivars de haricot pour la biomasse aérienne enregistrée (Annexe 6.5). Bien que l'analyse de variance ait montré qu'il n'y a pas de différences significatives pour l'interaction entre les niveaux de déficit hydrique et les cultivars de haricot le test de Tukey utilisé pour comparer les moyennes a quand même décelé certaines différences au niveau de l'interaction entre ces deux facteurs surtout pour les cultivars RILs suivant les différents niveaux de déficit hydrique.

La biomasse aérienne est influencée par le déficit hydrique et a également varié en fonction des différents cultivars. Les plus faibles mesures de biomasse aérienne sont enregistrées avec les plantes conduites avec le niveau de déficit hydrique 25 % HCC (3.41 g) et aussi avec le cultivar XRAV-40-4 (4.86 g) (tableau 8).

Aucune différence significative n'est enregistrée entre les cultivars pour un même niveau de déficit et également pour le cultivar XRAV-40-4 soumis aux différents

niveaux de déficit hydrique. Le cultivar RIL 29 présente une biomasse aérienne avec le niveau de déficit hydrique 25 % HCC (4.02 g) significativement inférieure à celle enregistrée à 100 % HCC (8.88 g), mais qui est identique à la moyenne enregistrée avec le niveau 75 % HCC (8.12 g) et à celle enregistrée avec le niveau 50 % HCC (7.06 g). Le cultivar RIL 83 soumis au niveau de déficit 25 % HCC présente une biomasse aérienne significativement inférieure à la moyenne enregistrée pour les niveaux 100 % et 75 % HCC, mais qui est identique à la moyenne obtenue avec le niveau de déficit 50 % HCC. Pour ce même cultivar, aucune différence n'est pas enregistrée entre les niveaux 100 %, 75 % et 50 % HCC. Pour le cultivar RIL 147, il n'y a pas de différences significatives entre les niveaux 100 %, 50 % et 25 % HCC, mais des différences significatives sont observées entre les niveaux 75 % et 25 % HCC comme l'indique le tableau 8.

Le cultivar XRAV-40-4 présente une biomasse aérienne (4.86 g) significativement inférieure à la moyenne des autres cultivars. Les cultivars RILs ne présentent aucune différence significative pour la mesure de la biomasse aérienne.

Les plantes soumises au niveau de déficit 25 % HCC présentent une biomasse aérienne (3.41 g) significativement inférieure à la moyenne obtenue pour les autres niveaux de déficit hydrique. Aucune différence significative n'est pas observée entre les niveaux de déficit 100 %, 75 % et 50 % HCC (tableau 8).

Tableau 8. Variation de la biomasse aérienne des plantes (en gramme)

Niveaux de déficit (% HCC)	Cultivars				Moyenne Niveaux de déficit
	XRAV-40-4	RIL 29	RIL 83	RIL 147	
100	5.94 ± 2.01 Aa	8.88 ± 3.32 Aa	8.84 ± 2.61 Aa	7.96 ± 2.06 Aab	7.91 ± 2.65 a
75	5.44 ± 1.93 Aa	8.12 ± 3.45 Aab	9.40 ± 1.53 Aa	8.00 ± 1.22 Aa	7.74 ± 2.50 a
50	5.24 ± 1.19 Aa	7.06 ± 1.28 Aab	6.88 ± 2.02 Aab	6.58 ± 2.07 Aab	6.44 ± 1.71 a
25	2.80 ± 0.60 Aa	4.02 ± 0.95 Ab	3.22 ± 0.93 Ab	3.60 ± 0.89 Ab	3.41 ± 0.91 b
Moyenne Cultivars	4.86 ± 1.89 B	7.02 ± 2.99 A	7.09 ± 3.02 A	6.54 ± 2.38 A	6.38
Δ Tukey:		Cultivars = 1.61	Apport d'eau = 1.61	Interaction = 4.37	

NB : Les moyennes accompagnées d'une même lettre majuscule dans une même ligne ne sont pas significativement différentes.

Les moyennes accompagnées d'une même lettre minuscule dans une même colonne ne sont pas significativement différentes. Les résultats sont présentés sous la forme de moyenne ± écart-type.

Le plus faible niveau de biomasse aérienne enregistré avec le niveau de déficit 25 % HCC pourrait résulter d'un ralentissement de la croissance des plantes

soumises à ce niveau de déficit. Cette tendance est conforme aux résultats obtenus par REYES-MATAMOROS *et al.* (2014) sur le haricot soumis au déficit hydrique.

Avec le cultivar XR4V-40-4, le faible niveau de biomasse aérienne obtenu pourrait résulter de l'épaisseur et la largeur des feuilles et du diamètre des tiges qui sont, selon les observations, généralement inférieurs aux autres cultivars.

4.5. Les variables de production

4.5.1. Le nombre de gousses par plante

L'Analyse de Variance a montré qu'il y a des différences significatives à 5 % de probabilité seulement entre les différents niveaux de déficit hydriques appliqués pour le nombre moyen de gousses enregistré par plante (6.6). Mais, le test de Tukey utilisé pour comparer les moyennes a quand même décelé certaines différences au niveau de chaque cultivar suivant les différents niveaux de déficit hydrique.

Les cultivars XR4V-40-4 et RIL 29 présentent significativement moins de gousses avec le niveau de déficit 25 % HCC qu'à 100 % HCC. Mais, ils ne sont pas significativement différents pour les niveaux 75 %, 50 % et 25 % HCC. Les cultivars RIL 83 et RIL 147 conduits avec le niveau de déficit hydrique 25 % HCC présentent significativement moins de gousses que lorsqu'ils sont conduits aux niveaux 75 % et 100 % HCC. Le cultivar RIL 83 ne présente aucune différence significative pour les niveaux 75 % et 50 % HCC et le cultivar RIL 147 ne présente aucune différence pour les niveaux 50 % et 25 % HCC comme l'indique le tableau 9.

Le nombre de gousses formées par plante au 57^{ème} jour du semis varie significativement avec la contrainte hydrique. Les plantes conduites avec le niveau 25 % HCC présentent très peu de gousses par rapport à la moyenne retenue pour celles conduites aux autres niveaux de déficit avec un écart significatif de 1.59 gousse/plante. Celles conduites avec le niveau 50 % HCC présentent un nombre moyen de gousses significativement moins élevé que celles conduites à la capacité au champ avec un écart de 0.89 gousse/plante, mais elles ne sont pas différentes de celles conduites avec le niveau 75 % HCC. Les plantes conduites avec les niveaux 100 % et 75 % HCC ne présentent

aucune différence significative en termes de nombre moyen de gousses émises. Il n'y a pas différence significative entre les cultivars comme indiqué dans le tableau 9.

Tableau 9. Variation du nombre moyen de gousses par plante

Niveaux de déficit (% HCC)	Cultivars				Moyenne Niveaux de déficit
	XRAV-40-4	RIL 29	RIL 83	RIL 147	
100	2.27 ± 0.43 Aa	2.13 ± 0.93 Aa	2.80 ± 0.99 Aa	2.73 ± 0.86 Aa	2.48 ± 0.82 a
75	1.60 ± 0.64 Aab	1.60 ± 0.76 Aab	2.20 ± 1.14 Aab	2.53 ± 0.69 Aa	1.98 ± 0.87 ab
50	1.67 ± 0.53 Aab	1.83 ± 0.94 Aab	0.73 ± 0.43 Abc	2.13 ± 0.69 Aab	1.59 ± 0.82 b
25	0.33 ± 0.47 Ab	0.27 ± 0.43 Ab	0.40 ± 0.44 Ac	0.73 ± 1.01 Ab	0.43 ± 0.61 c
Moyenne Cultivars	1.47 ± 0.87 A	1.46 ± 1.03 A	1.53 ± 1.27 A	2.03 ± 1.10 A	1.62
	Δ Tukey:	Cultivars = 0.63	Apport d'eau = 0.63	Interaction = 1.69	

NB : Les moyennes accompagnées d'une même lettre majuscule dans une même ligne ne sont pas significativement différentes.

Les moyennes accompagnées d'une même lettre minuscule dans une même colonne ne sont pas significativement différentes. Les résultats sont présentés sous la forme de moyenne ± écart-type.

La formation des gousses est strictement dépendante de l'alimentation en eau des plantes. Pour tous les cultivars, les plantes ont émis davantage de gousses quand elles sont bien alimentées en eau.

4.5.2. Longueur moyenne des gousses

L'Analyse de Variance a montré qu'il y a des différences significatives à 5 % de probabilité seulement entre les différents niveaux de déficit hydriques appliqués pour la longueur moyenne des gousses enregistrée (Annexe 6.7). Mais, le test de Tukey utilisé pour comparer les moyennes a quand même décelé certaines différences au niveau de chaque cultivar suivant les différents niveaux de déficit hydrique.

Les cultivars XRAV-40-4 et RIL 147 présentent des gousses significativement moins longues lorsqu'elles sont conduites avec le niveau 25 % HCC (avec des écarts respectifs de 4.49 cm et de 4.78 cm). Le cultivar RIL 29 présente des différences significatives entre les niveaux 100 % et 25 % HCC. Elle ne présente aucune différence avec les autres niveaux. Le cultivar RIL 83 présente des différences significatives entre les niveaux 75 % et 25 % HCC. Par contre, aucune différence n'est

observée entre les niveaux 100 %, 75 % et 50 % HCC, ni entre les niveaux 100 %, 50 % et 25 % HCC (tableau 10).

La longueur moyenne des gousses varie significativement sous l'effet de la contrainte hydrique. Les plantes conduites au niveau 25 % HCC présentent des gousses significativement moins longues que celles qui sont moins stressées avec un écart moyen de 4.03 cm. Les plantes se sont donc montrées plus sensibles lorsqu'elles sont soumises au niveau 25 % HCC.

Tableau 10. Variation de la longueur moyenne (en cm) des gousses

Niveaux de déficit (% HCC)	Cultivars				Moyenne Niveaux de déficit
	XRAV-40-4	RIL 29	RIL 83	RIL 147	
100	6.81 ± 0.72 Aa	6.53 ± 0.41 Aa	6.33 ± 0.41 Aab	7.33 ± 0.93 Aa	6.75 ± 0.72 a
75	6.33 ± 0.52 Aa	5.57 ± 0.79 Aab	6.93 ± 0.51 Aa	6.64 ± 0.66 Aa	6.37 ± 0.78 a
50	6.39 ± 1.25 Aa	5.74 ± 1.09 Aab	4.70 ± 2.75 Aab	7.01 ± 0.88 Aa	5.96 ± 1.76 a
25	2.02 ± 2.79 Ab	2.13 ± 3.04 Ab	2.93 ± 2.77 Ab	2.21 ± 3.05 Ab	2.33 ± 2.70 b
Moyenne Cultivars	5.39 ± 2.48 A	4.99 ± 2.32 A	5.22 ± 2.42 A	5.80 ± 2.64 A	5.35
Δ Tukey: Cultivars = 1.45 Apport d'eau = 1.45 Interaction = 3.92					

NB : Les moyennes accompagnées d'une même lettre majuscule dans une même ligne ne sont pas significativement différentes.

Les moyennes accompagnées d'une même lettre minuscule dans une même colonne ne sont pas significativement différentes. Les résultats sont présentés sous la forme de moyenne ± écart-type.

La longueur moyenne des gousses est tributaire de l'alimentation en eau des plantes. Les plantes se sont donc montrées plus sensibles lorsqu'elles sont soumises au niveau 25 % HCC.

V. CONCLUSION

Se référant aux différents résultats obtenus, nous pouvons conclure que le déficit hydrique a des effets néfastes sur la croissance et le développement, la production de gousses et sur la nodulation chez le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) et qu'un niveau de déficit de 25 % de l'humidité correspondant à la capacité au champ (HCC) est limitant pour tous ces paramètres précités. Des différences importantes sont décelées entre les plantes soumises à 25 % HCC et celles soumises aux autres niveaux de déficit hydrique pour la hauteur et la biomasse aérienne. Par contre, avec un déficit hydrique modéré à 75 % HCC la nodulation est encore importante pour les cultivars RIL 29 et RIL 83, mais très critique pour les cultivars XRAV-40-4 et RIL 147 et avec un déficit hydrique de 50 % HCC la biomasse aérienne enregistrée reste encore importante pour toutes les cultivars.

De même, la floraison du haricot diminue considérablement avec le déficit hydrique où les plantes soumises à 25 % HCC sont révélées moins précoces à la floraison avec un écart moyen de 4 jours par rapport à celles conduites à 100 % et à 75 % HCC qui sont considérées comme les plus précoces.

Le nombre de nodules formés diminue avec le déficit hydrique avec un écart moyen de 3.95 nodules par plante entre le niveau de déficit 25 % HCC qui est plus faible et la moyenne des autres niveaux de déficit hydrique. Il est aussi démontré qu'à 25 % HCC il y a très peu de nodules fonctionnels alors que pour les niveaux 100 % et 75 % HCC les nodules sont majoritairement fonctionnels.

Le déficit hydrique affecte négativement la production de gousses chez le haricot tant en nombre qu'en longueur. Les niveaux de déficit hydrique 50 % et 25 % HCC réduisent le nombre de gousses significativement par rapport aux autres niveaux.

Par rapport à ces résultats et aux conditions de l'essai, il est souhaitable de garder le cultivar RIL 147 et de continuer à l'expérimenter car cette cultivar présente des résultats en termes de biomasse aérienne, de nombre et longueur de gousses à 50 % HCC qui sont supérieurs ou égaux à ceux obtenus à 100 % HCC pour les autres cultivars. Puisque ce cultivar a présenté un nombre restreint de nodules dans les conditions de cette étude, d'autres essais devraient être réalisés avec les différentes souches de rhizobia en conditions contrôlées pour permettre à ce cultivar de mieux mettre en évidence son pouvoir nodulant. Étant sensible à la déficience en phosphore, une fertilisation phosphatée

adéquate est donc recommandée dans les essais d'expérimentation de ce cultivar. Ces essais devraient être réalisés en plein champ afin de prendre en compte la capacité de développement racinaire du haricot qui est le siège de la nodulation et constitue un mécanisme important d'adaptation à la sécheresse. Si toutes ces potentialités sont prouvées au champ, ce cultivar devrait être conservé pour être utilisé comme parent dans les programmes d'amélioration végétale.

VI. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. ASHRAF, M. et IRAM, A. (2005). Drought deficit induced changes in some organic substances in nodules and other plant parts of two potential legumes differing in salt tolerance. *Flora* 200: 535-546
2. CIAT (Centro Internacional de Agronomía Tropical). (1992). Système standard pour l'évaluation du germoplasme du haricot. Cali, Colombie. 60 p.
3. DIAW, N. F. (2002). Utilisation des inoculums de rhizobium pour la culture du haricot (*Phaseolus vulgaris*) au Sénégal. Thèse de docteur de biologie végétale. 97 p. Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal.
4. FAGHIRE, M. (2012). Rôle des microorganismes symbiotiques (cas de rhizobia) dans l'amélioration de la production agricole de *Phaseolus vulgaris* sous déficit salin. Thèse de Doctorat en Biotechnologie et Bio-ingénierie de la Production Végétale, Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech. 110 p.
5. FAOSTAT. (2017). Production agricole, base de données primaires sur les cultures. Consulté en ligne le 15/01/2018 sur <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QC>
6. FÉLIX, J.-F. (2016). Cours de Phytotechnie Spéciale des Légumineuses et Oléagineuses, 4^{ème} Année PHY, FAMV.
7. GUZMAN, G. (2010). Evaluación bajo condiciones controladas de estrés hídrico las diferencias fenotípicas del crecimiento y desarrollo de raíces de genotipos promisorios de frijol rojo (*Phaseolus vulgaris* L.), Centro Experimental Campos Azules. Instituto de Nicaragua de Tecnología Agropecuaria.
8. HUNGRIA, M. et VARGAS, M. A. T. (2000). Environmental factors affecting Nitrogen fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. *Field Crops Research*. 65: 151-164
9. LAZALI, M. (2009). Etude de la symbiose à rhizobium chez l'arachide (*Arachis hypogaea* L.) cultivée sous contrainte hydrique: aspects morpho-physiologiques et agronomiques. Mémoire de Magister en Biotechnologies végétales, Institut National Agronomique – Algérie. 136 p.

10. MARNDR (Ministère de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et du développement Rural). (2008-2009). Synthèse nationale des résultats du Recensement Général de l'Agriculture (RGA). Port-au-Prince, Haïti.
11. MESSIAEN, C. M. (1992). L'intérêt de lignées collectées en Haïti pour l'amélioration variétale du haricot grain (*Phaseolus vulgaris* L). Agronomie, EDP Sciences, 1992, 12 (7): 503-513. Consulté en ligne le 10/04/2018 sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00885494/document>
12. MOÏSE, P. (2015). Évaluation de la nodulation naturelle et du rendement du haricot (*Phaseolus vulgaris*, L.) au niveau des plaines de l'Arcahaie et du Cul-de-Sac. FAMV, Haïti, mémoire 48p.
13. NUÑEZ-BARRIOS, A., RITCHIE, J. et SMUCKER, A. (1998). El efecto de sequía en el crecimiento, la fotosíntesis y la intercepción de luz en frijol común", Agronomía Mesoamericana, 9(2): 1-8.
14. REYES-MATAMOROS, J., MARTINEZ-MORENO, D., RUEDA-LUNA, R. et RODRIGUEZ-RAMIREZ, T. (2014). Efecto del estrés hídrico en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en condiciones de invernadero. Revista Iberoamericana de Ciencias. 1(2) :191-203.
15. ROSAS, J. C. et BLISS, F. (1985). Mejoramiento de la capacidad de fijación de nitrógeno en frijol común. 14(1) 95-104.
16. ROSAS, J. C., CASTRO, J. A. et FLORES, E. (2000). Mejoramiento Genético del Frijol Rojo y Negro Mesoamericano para Centroamérica y El Caribe. Agronomía Mesoamericana 11(2): 37-46.
17. SOLTNER, D. (1985). Les bases de la production végétale. Tome 2, 3^{ème} Éd. Paris, Imprimerie praizelin, 458 p.

ANNEXES

Annexe I. Normes d'interprétation des analyses de sol

Paramètres	Unité	Classe I (Très bas)	Classe II (bas)	Classe III (moyen)	Classe IV (élevé)
N	%	0.01 - 0.08	0.09 - 0.15	0.16 - 0.25	
P ₂ O ₅	ppm	< 25	25 - 50	50 - 130	> 130
K	még/100g	0 - 0.25	0.26 - 0.45	0.46 - 0.60	> 0.60

Source : (SOLTNER, 1985)

Annexe II. Composition du milieu Y.M.A. (Yeast Mannitol Agar)

Produits	Quantité recommandée (g)
Eau distillée	1000.0
Mannitol	12.8
Agar Agar	15.0

Annexe III. Composition du milieu Y.M.B. (Yeast Mannitol Broth)

Produits	Quantité recommandée (g)
Eau distillée	1000.0
Mannitol	10.0
K ₂ HPO ₄	0.5
MgSO ₄ .7H ₂ O	0.2
NaCl	0.1
Yeast Extract (Extrait de levure)	0.5

Annexe IV. Observation des nodules du haricot inoculé**Annexe V. Échelles d'évaluation de la nodulation du haricot**

Échelles	Nombre de nodules
1 : Excellent	Plus de 80
3 : Bon	41 - 80
5 : Intermédiaire	21 - 40
7 : Médiocre	10 - 20
9 : Très mauvais	Moins de 10

Source : (CIAT, 1992)

Annexe VI. TABLEAUX DES ANALYSES DE VARIANCE

Annexe 6.1. Analyse de variance pour la hauteur des plantes au 30^{ème} jour du semis

SV	DI	SC	CM	Valeur F	Pr(>F)
Apport.Eau (A)	3	760.19	253.398	9.4922	2.839x10 ⁻⁵ DS
Cultivars (V)	3	373.79	124.597	4.6674	0.005187 DS
INTERACTION (A*V)	9	200.15	22.239	0.8331	0.588413 DNS
Erreur	64	1708.50	26.695		
TOTAL	79	3042.63			

DS : Différence significative à 5 % de probabilité ; DNS : Différence Non significative à 5 % de probabilité

SV : Sources de Variation ; DI : Degré de liberté ; SC : Somme des Carrés ; CM : Carré Moyen

Annexe 6.2. Analyse de variance pour la hauteur des plantes au 45^{ème} jour du semis

SV	DI	SC	CM	Valeur F	Pr(>F)
Apport.Eau (A)	3	302.03	100.675	4.0916	0.01014 DS
Cultivars (V)	3	140.46	46.819	1.9028	0.13803 DNS
INTERACTION (A*V)	9	192.29	21.365	0.8683	0.55776 DNS
Erreur	64	1574.73	24.605		
TOTAL	79	2209.51			

DS : Différence significative à 5 % de probabilité ; DNS : Différence Non significative à 5 % de probabilité

SV : Sources de Variation ; DI : Degré de liberté ; SC : Somme des Carrés ; CM : Carré Moyen

Annexe 6.3. Analyse de variance pour le nombre de jours d'entrée en floraison

SV	DI	SC	CM	Valeur F	Pr(>F)
Apport.Eau (A)	3	191.7	63.900	20.3260	2.291x10 ⁻⁹ DS
Cultivars (V)	3	86.3	28.767	9.1504	4.009x10 ⁻⁵ DS
INTERACTION (A*V)	9	58.0	6.444	2.0499	0.04768 DS
Erreur	64	201.2	3.144		
TOTAL	79	537.2			

DS : Différence significative à 5 % de probabilité ; DNS : Différence Non significative à 5 % de probabilité

SV : Sources de Variation ; DI : Degré de liberté ; SC : Somme des Carrés ; CM : Carré Moyen

Annexe 6.4. Analyse de variance pour le nombre de nodules par plante

SV	DI	SC	CM	Valeur F	Pr(>F)
Apport.Eau (A)	3	2552.57	850.86	18.6495	8.351e-09 DS
Cultivars (V)	3	672.73	224.24	4.9151	0.00390 DS
INTERACTION (A*V)	9	1367.27	151.92	3.3298	0.00215 DS
Erreur	64	2919.90	45.62		
TOTAL	79	7512.47			

DS : Différence significative à 5 % de probabilité ; DNS : Différence Non significative à 5 % de probabilité

SV : Sources de Variation ; DI : Degré de liberté ; SC : Somme des Carrés ; CM : Carré Moyen

Annexe 6.5. Analyse de variance pour la biomasse aérienne des plantes

SV	DI	SC	CM	Valeur F	Pr(>F)
Apport.Eau (A)	3	259.991	86.664	23.1258	2.946x10 ⁻¹⁰ DS
Cultivars (V)	3	65.122	21.707	5.7925	0.001442 DS
INTERACTION (A*V)	9	18.881	2.098	0.5598	0.824635 DNS
Erreur	64	239.840	3.747		
TOTAL	79	583.83			

DS : Différence significative à 5 % de probabilité ; DNS : Différence Non significative à 5 % de probabilité

SV : Sources de Variation ; DI : Degré de liberté ; SC : Somme des Carrés ; CM : Carré Moyen

Annexe 6.6. Analyse de variance pour le nombre moyen de gousses par plante

SV	DI	SC	CM	Valeur F	Pr(>F)
Apport.Eau (A)	3	45.726	15.2422	27.0461	2.04x10 ⁻¹¹ DS
Cultivars (V)	3	4.573	1.5244	2.7049	0.05267 DNS
INTERACTION (A*V)	9	6.424	0.7137	1.2665	0.27245 DNS
Erreur	64	36.068	0.5636		
TOTAL	79	92.79			

DS : Différence significative à 5 % de probabilité ; DNS : Différence Non significative à 5 % de probabilité

SV : Sources de Variation ; DI : Degré de liberté ; SC : Somme des Carrés ; CM : Carré Moyen

Annexe 6.7. Analyse de variance pour la longueur moyenne des gousses par plante

SV	DI	SC	CM	Valeur F	Pr(>F)
Apport.Eau (A)	3	250.343	83.448	27.5758	1.446x10 ⁻¹¹ DS
Cultivars (V)	3	6.875	2.292	0.7573	0.5222 DNS
INTERACTION (A*V)	9	18.142	2.016	0.6661	0.7362 DNS
Erreur	64	193.672	3.026		
TOTAL	79	469.03			

DS : Différence significative à 5 % de probabilité ; DNS : Différence Non significative à 5 % de probabilité

SV : Sources de Variation ; DI : Degré de liberté ; SC : Somme des Carrés ; CM : Carré Moyen